



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Πολυ-Κριτηριακή Αξιολόγηση Δικτύων Ασυρμάτων**  
**Αισθητήρων Υψηλής Χωρικής Πυκνότητας για**  
**Περιβαλλοντικές Εφαρμογές**

**Διδακτορική Διατριβή**

**ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΔΗΜ. ΚΟΛΕΓΑ**

Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ ΕΜΠ, M.Sc.

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΒΕΣΚΟΥΚΗΣ**

**Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2014**





**Ευαγγελία Δημ. Κολεγά**

**Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ, ΕΜΠ**

**MSc στα Δικτυοκεντρικά Πληροφοριακά Συστήματα, Παν. Πειραιά**

**ekol@cs.ntua.gr**

**Copyright © Ευαγγελία Κολεγά, 2014**

**Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.



**Στα παιδιά μου Αναστάση και Φανή**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή ανατέθηκε από το τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με σκοπό την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου, υψηλής πυκνότητας και ευρείας κλίμακας δικτύου αισθητήρων, το οποίο θα καλύπτει μια εκτεταμένη περιοχή – πεδίο με στόχο την ανίχνευση συμβάντων και γεγονότων. Η δημιουργία και εγκατάσταση ενός αποτελεσματικού δικτύου αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και επ' ακόλουθων πυροδοτούμενων δράσεων.

Η επιστήμη του Μηχανικού Υπολογιστών και Πληροφορικής εκτείνεται σε ένα ευρύ πεδίο αντικειμένων, με πιο αντιπροσωπευτικά εξ αυτών τα πεδία των πληροφοριακών συστημάτων, των δικτύων και των τηλεπικοινωνιών. Επιπροσθέτως, η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια, το μειούμενο κόστος της παραγωγής αισθητήρων, οι νέες δυνατότητες αυτών καθώς και η δημιουργία νέων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, έδωσε οπτικές και δυνατότητες στους μηχανικούς δικτύων που δεν υπήρχαν πριν. Συνεπώς η τεράστια πρόοδος που υπήρξε στις τεχνολογίες του Διαδικτύου ήταν αναμενόμενο να μετουσιωθεί και σε κάτι πιο ρηξικέλευθο, όπως είναι για παράδειγμα τα Δίκτυα Ασυρμάτων Αισθητήρων και μαζί με παρελκόμενες εφαρμογές και τεχνολογίες να αποτελέσουν το Internet of Things.

Στο πλαίσιο αυτό και παράλληλα με το μεγάλο μου ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες Δικτύων Υπολογιστών, ανέλαβα την εκπόνηση της ανά χείρας διδακτορικής διατριβής, θέλοντας να ερευνήσω ένα νέο επιστημονικό πεδίο αυτό της ανάπτυξης Δικτύων Ασυρμάτων Αισθητήρων Ευρείας Κλίμακας και Υψηλής Χωρικής Πυκνότητας με πλείστες εφαρμογές σε αφιλόξενα περιβάλλοντα και πεδία γενικότερα. Για την επίλυση των νέων ερευνητικών προβλημάτων που απαιτούν γνώσεις από τον τομέα δικτύων, την προσομοίωσης αλλά και της μελέτης των τοπογραφικών χαρακτηριστικών του φυσικού περιβάλλοντος, αξιολογήθηκαν μοντέλα εξομοίωσης εξασθένισης σήματος ανά περιοχή, αναπτύχθηκε λογισμικό για την εφικτή χωροθέτηση των αισθητήρων και ευριστικός αλγόριθμος ο οποίος συνδυάζει την χωροθέτηση των αισθητήρων και την αξιοπιστία- συνδεσιμότητα του δικτύου.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της έρευνάς μου και την ολοκλήρωση της διατριβής μου, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην εκπόνησή της. Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κ. Βασίλειο Βεσκούκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και μου ανέθεσε το συγκεκριμένο προς έρευνα θέμα, το πραγματικά πολύ καλό κλίμα συνεργασίας που είχα και τις σημαντικές συμβουλές του. Ομολογώ ότι οι ερευνητικοί του ορίζοντες εμπλούτισαν τον τρόπο σκέψης μου και η καθοδήγησή του υπήρξε καθοριστική στις διάφορες ερευνητικές αναζητήσεις που είχα.

Επίσης αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ Ρωμόλο Κορακίτη για τον χρόνο που αφιέρωσε διαβάζοντας και παρατηρώντας διεξοδικά την διατριβή μου καθώς και τον καθηγητή κ. Χρήστο Κυρανούδη για την υποστήριξή του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον διπλωματούχο, πλέον, Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό κ. Διονύσιο Βούτο, ο οποίος εκπόνησε διάφορα σενάρια εξομοίωσης δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων, παρέχοντάς μας με αυτόν τον τρόπο δεδομένα, ώστε να μπορέσουμε να εξετάσουμε εμπειριστικά την απόκριση και την αξιοπιστία πιθανών διατάξεων δικτύων αισθητήρων ανά κατηγορίες περιοχών.

Θα ήταν αδύνατο κλείνοντας να μην ευχαριστήσω τους γονείς μου για τις αξίες και τα ιδανικά που μου μετέδωσαν και με τα οποία έμαθα να πορεύομαι στη ζωή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον σύζυγό μου του οποίου είχα την αμέριστη κατανόηση και συμπαράσταση.



---

**ΠΟΛΥ-ΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ  
ΥΨΗΛΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

---

**Ευαγγελία Κολεγά**

Διδακτορική Διατριβή

Ιούλιος 2014

## Περίληψη

Η τεχνολογία των δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων (WSN) έχει εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια και αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο σε θέματα Γεωπληροφορικής. Σημαντικής βαρύτητας εφαρμογή, ανάμεσα σε άλλες, αποτελεί η εποπτεία περιβάλλοντος για διάφορους σκοπούς και τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Παρόλο που η χρησιμότητα της εφαρμογής διατάξεων δικτύων αισθητήρων στο περιβάλλον ήταν γνωστή εδώ και μερικά χρόνια, μόλις το τελευταίο διάστημα η εξέλιξη της τεχνολογίας τους και το συνεχές μειούμενο κόστος τους αφενός επέτρεψαν και αφετέρου υπέδειξαν την έρευνα σχετικά με την εφαρμογή τους σε ευρεία κλίμακα.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η εκ των προτέρων αξιολόγηση και σχεδίαση διατάξεων ασύρματων δικτύων αισθητήρων υψηλής χωρικής πυκνότητας και ευρείας κλίμακας, τα οποία προορίζονται για λειτουργία σε αφιλόξενα φυσικά περιβάλλοντα. Η ανάπτυξη σε ευρεία κλίμακα ενός αξιόπιστου δικτύου αισθητήρων και μάλιστα σε περιβάλλον μη φιλικό το οποίο δεν μπορεί να περιγραφεί συστηματικά αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα το οποίο χρήζει συντονισμένων προσεγγίσεων, αυτής της καθαρά δικτυακής αλλά και της τοπογραφικής – τοπολογικής διάταξης των αισθητήρων. Όσο αφορά την δικτυακή πτυχή του προβλήματος εξετάστηκαν αρκετοί εξομοιωτές WSN, επελέγη ο πιο κατάλληλος και παρήχθησαν μοντέλα εξομοίωσης σχετικά με την εξασθένιση του σήματος ανά κατηγορία περιοχής. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε λογισμικό για την χωροθέτηση των αισθητήρων στο πεδίο. Παράλληλα αναπτύχθηκε ευριστικός αλγόριθμος ο οποίος μέσω ανατροφοδότησης μεταξύ ενός αρχικού σεναρίου χωροθέτησης των αισθητήρων και προσομοίωσης της αξιοπιστίας του δικτύου (συνδεσιμότητα) καταλήγει στην εύρεση μιας εφικτής λύσης για το πρόβλημα, η οποία θα εξασφαλίζει και τις όποιες σχεδιασμένες εφεδρείες του δικτύου. Έπεται ο ορισμός του προβλήματος και η ανάλυση των δύο βασικών συνιστωσών του, τα αποτελέσματα που παρήχθησαν καθώς και τα θέματα που παραμένουν ανοικτά για μελλοντική ανάπτυξη.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, Γεωπληροφορική, Προσομοίωση, Ευριστικός Αλγόριθμος, Υψηλή Χωρική Πυκνότητα, Ευρεία Κλίμακα, Συνδεσιμότητα, Τοπολογίες, Εξασθένιση Σήματος, Χωροθέτηση, Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης.





---

**MULTI – CRITERIAL EVALUATION OF HIGH DENSITY WIRELESS SENSOR  
NETWORK STRUCTURES FOR ENVIRONMENTAL PUPROSES**

---

**Evangelia Kolega**

Doctoral Dissertation

July 2014

## Abstract

In the past few years, Wireless Sensor Networks (WSN) technology has rapidly evolved and it therefore comprises a powerful tool in the field of Geoinformatics. Area monitoring not only for environment sake but also for a number of purposes and early warning systems, is an in-season application today of high importance. Despite the fact that the significance of large scale WSN deployment for environmental applications has been known for a number of years, only lately was it made possible for researchers to proceed to further investigation, due to technology advances in sensor platforms and their reduced cost.

This doctoral dissertation aims to an ex-ante evaluation and design of High Density Wireless Sensor Networks in large areas, which are not systematically described. The deployment of reliable WSNs in hostile environments constitutes a multi-dimensional problem, which calls for two main ways of approach; the mere network approach and the one of topography – topology localization of sensors. As far as the network matter is concerned, various WSN simulators have been examined and the most appropriate of them has been chosen to be put into practice. Various simulation models have been produced with respect to signal attenuation per characteristic area. In the sequel, a piece of software for sensor localization purposes has been developed. What is more, a heuristic algorithm has been proposed which suggests an initial localization scheme for sensors and through network simulation procedures regarding the reliability and connectivity of the network, produces feedback to it. The execution of the heuristic algorithm resolves to a feasible solution of the problem with respect to network redundancy as well. Attending, the problem definition along with its two main components, are referenced. In the sequel, the produced results of the research are analyzed and further challenges regarding large scale area coverage with high density WSNs are discussed.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks (WSNs), Geoinformatics, Simulation, Heuristic Algorithm, High Density, Large Scale, Connectivity, Topologies, Signal Attenuation, Localization, Early Warning Systems.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....</b>	<b>19</b>
<b>Περίγραμμα της Έρευνας .....</b>	<b>1</b>
1.1. Εισαγωγή .....	1
1.2. Το πρόβλημα .....	1
1.3. Η προσέγγιση .....	3
1.4. Συνεισφορά και Πρωτοτυπία .....	5
<b>2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....</b>	<b>7</b>
<b>Οριοθέτηση του προβλήματος.....</b>	<b>7</b>
2.1. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων .....	7
2.1.1. Τεχνολογία και Γενικές Εφαρμογές.....	7
2.1.1.1. Ιατρική .....	8
2.1.1.2. Άμυνα .....	9
2.1.1.3. Εποπτεία κρίσιμων υποδομών.....	9
2.1.1.4. Internet of Things .....	10
2.1.1.5. Πυροδοτούμενα γεγονότα .....	10
2.1.2. Περιβάλλον.....	11
2.1.2.1. Γεωργία.....	11
2.1.2.2. Προστασία περιβάλλοντος.....	11
2.1.2.3. Ανίχνευση μικρομετατοπίσεων.....	12
2.1.2.4. Ανίχνευση Ραδιενέργειας.....	13
2.1.2.5. Φυσικές καταστροφές.....	14
2.2. Απαιτήσεις Αξιολόγησης Καταλληλότητας.....	15
2.3. Τοπολογίες .....	16
2.3.1. Τοπολογία Αρτηρίας – Bus.....	16
2.3.2. Τοπολογία Δακτυλίου – Ring.....	18
2.3.3. Τοπολογία Multihop / Multihop Routing.....	19
2.3.4. Τοπολογία Δέντρου / Tree .....	20
2.3.5. Τοπολογία Πλέγματος / Grid.....	21
2.3.6. Τοπολογία Διχτιού / Mesh .....	22
2.3.7. Τοπολογία Fully Connected.....	23
2.3.8. Τοπολογία Τριγώνου (υποκατηγορία fully connected) .....	24
2.3.9. Τοπολογία Αστέρα – Κυψέλη.....	25
2.3.10. Τοπολογία Πλέγματος Αστέρων - Κυψελών με Επικαλύψεις.....	26
2.4. Διευρυμένη Τοπολογία Πλέγματος Κυψελών με Επικαλύψεις.....	27

2.5.	Τεχνολογίες και Λειτουργικά Περιβάλλοντα .....	31
2.5.1.	Είδη Αισθητήρων.....	31
2.5.2.	Τεχνολογίες Αισθητήρων .....	32
2.5.2.1.	Τεχνολογία XBOW .....	32
2.5.2.2.	Τεχνολογία iSense.....	33
2.5.2.3.	Τεχνολογία ArchRock (CISCO).....	33
2.5.2.4.	Τεχνολογία Libellium .....	34
2.5.2.5.	Τεχνολογία Sensible Solutions .....	39
2.5.2.6.	Τεχνολογία Advanticsys.....	40
2.5.3.	Λειτουργικά Συστήματα Ασυρμάτων Αισθητήρων .....	41
2.5.3.1.	Το TinyOS .....	41
2.5.3.2.	Δομή του TinyOS.....	41
2.5.3.3.	Η γλώσσα προγραμματισμού NESC .....	43
2.5.3.4.	Το ContikiOS.....	43
2.5.4.	Πρωτόκολλα επικοινωνίας (Radio) .....	44
2.5.4.1.	Πρωτόκολλο ZigBee .....	44
2.5.4.2.	Πρωτόκολλο 6LoWPAN .....	45
2.5.4.3.	Πρωτόκολλο Bluetooth.....	45
2.5.4.4.	Πρωτόκολλο GSM .....	45
2.5.4.5.	Πρωτόκολλο GPRS .....	46
2.5.4.6.	Πρωτόκολλο WiMAX .....	46
2.5.4.7.	Πρωτόκολλο WiFi .....	46
2.5.5.	Επισημάνσεις στα πρωτόκολλα και στα λειτουργικά.....	47
2.5.6.	Ενέργεια .....	47
2.5.7.	Ενδεικτικά σχετικά έργα.....	48
2.5.7.1.	Το ερευνητικό έργο WiseBed .....	48
2.5.7.2.	Η έννοια Smart Cities.....	48
2.5.7.3.	Φροντίδα υγείας .....	48
2.5.7.4.	Ερευνητικό έργο TIBUCON .....	49
2.5.7.5.	Ερευνητικό έργο makeSense .....	49
<b>3.</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....</b>	<b>50</b>
	<b>Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων για Περιβαλλοντικές Εφαρμογές.....</b>	<b>50</b>
3.1.	Γενικές Απαιτήσεις .....	50
3.2.	Δείκτες Αξιολόγησης πιθανών διατάξεων .....	51

3.3.	Ερευνητική προσέγγιση .....	52
3.4.	Εξομοίωση Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων.....	54
3.4.1.	Εισαγωγή .....	54
3.4.2.	Η τρέχουσα κατάσταση .....	55
3.4.3.	Λογισμικά εξομοίωσης Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων .....	58
3.4.3.1.	TOSSIM .....	58
3.4.3.2.	VIPTOS .....	59
3.4.3.3.	NetTopo.....	60
3.4.3.4.	OMNET++ .....	61
3.4.3.5.	CASTALIA .....	64
3.4.3.6.	SHAWN .....	66
3.5.	Επιλογή Λογισμικών Εξομοίωσης .....	69
<b>4.</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....</b>	<b>71</b>
	<b>Εξομοίωση Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων Μεγάλης Κλίμακας.....</b>	<b>71</b>
4.1.	Εισαγωγή.....	71
4.2.	Συνθήκες Φυσικού Περιβάλλοντος.....	71
4.2.1.	Μοντέλα Εξασθένισης Σήματος .....	71
4.2.2.	Απώλεια Διαδρομής Σήματος .....	72
4.3.	Μετρήσεις Πεδίου.....	75
4.4.	Εξομοίωση και αποτελέσματα .....	80
4.5.	Μοντελοποίηση φυσικού περιβάλλοντος .....	83
4.6.	Συμπεράσματα.....	86
<b>5.</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ .....</b>	<b>87</b>
5.1.	Ομαδοποίηση κόμβων με χωρικά κριτήρια.....	87
5.1.1.	Αλγόριθμος Bellman-Ford.....	87
5.1.2.	Αλγόριθμος Quad – Trees .....	88
5.1.3.	Αλγόριθμος K-means.....	89
5.2.	Ευριστικός Αλγόριθμος Κάλυψης Περιοχής .....	90
5.2.1.	Παραδοχές – Ανάλυση .....	90
5.2.2.	Βασικές Αρχές Ευριστικού Αλγορίθμου Διαχείρισης και Κάλυψης Πεδίου .....	94
5.2.3.	Σχηματική Περιγραφή του Αλγορίθμου.....	96
5.2.4.	Μια αντικειμενοστρεφής υλοποίηση .....	98
5.3.	Στιγμιότυπα εκτέλεσης.....	100
5.3.1.	Εφαρμογή στο σύνολο μιας υποθετικής περιοχής.....	101
5.3.2.	Εφαρμογή σε quad.....	107

5.4. Συμπεράσματα και Μελλοντικοί Στόχοι .....	112
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>114</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Γενική Δομή συστήματος επιτήρησης.....	2
Εικόνα 2: Διάγραμμα της πορείας της έρευνας .....	4
Εικόνα 3: Ιατρικές Εφαρμογές - Δίκτυο Σώματος [12].....	9
Εικόνα 4: Στρατιωτικές Εφαρμογές [13] .....	9
Εικόνα 5: Παράμετροι Αξιολόγησης Τοπολογιών WSNs .....	16
Εικόνα 6: Παράδειγμα τοπολογίας αρτηρίας με WSN.....	17
Εικόνα 7: Παράδειγμα τοπολογίας δακτυλίου με WSN .....	18
Εικόνα 8: Παράδειγμα τοπολογίας πολλαπλών σημείων με WSN .....	19
Εικόνα 9: Παράδειγμα δενδροειδούς τοπολογίας με WSN .....	20
Εικόνα 10: Παράδειγμα τοπολογίας πλέγματος γραμμών με WSN .....	21
Εικόνα 11: Παράδειγμα τοπολογίας πλέγματος με WSN .....	23
Εικόνα 12: Παράδειγμα τοπολογίας πλήρους σύνδεσης με WSN .....	24
Εικόνα 13: Παράδειγμα τοπολογίας τριγώνου με WSN .....	24
Εικόνα 14: Παράδειγμα τοπολογίας αστέρα με WSN.....	25
Εικόνα 15: Παράδειγμα τοπολογίας πλέγματος κυψελών WSN με επικαλύψεις [32] .....	26
Εικόνα 16: Διευρυμένο παράδειγμα τοπολογίας πλέγματος κυψελών WSN με επικαλύψεις [33], [34] .....	28
Εικόνα 17: Ασύμμετρη περιοχή Eureka .....	29
Εικόνα 18: Στοιχειώδης ψηφίδα βελτιστοποίησης της διευρυμένης τοπολογία πλέγματος κυψελών με επικαλύψεις. ....	29
Εικόνα 19: Χαρακτηριστικές πλακέτες τεχνολογίας X-BOW [35] .....	32
Εικόνα 20: Το Kit WASPMote [38].....	34
Εικόνα 21: Είδη αισθητήρων .....	35
Εικόνα 22: Μέγιστη ακτίνα κάλυψης.....	35
Εικόνα 23: On the air Programming [38] .....	36
Εικόνα 24: Ενδεικτική Λίστα εφαρμογών Internet of Things [39]. ....	38
Εικόνα 25: Ιστοσελίδα δημιουργίας κώδικα για Libellium Waspmote Plug & Sense [39]. ....	39
Εικόνα 26: Sensible Solutions Kit για περιβαλλοντικούς σκοπούς [41] .....	40
Εικόνα 27: Ο αισθητήρας CM5000, συμβατός με το IEEE 802.15.4 και με το πρότυπο TelosB [42] ...	40
Εικόνα 28: Περιγραφή του TinyOS distribution [43]. ....	42
Εικόνα 29: Το γραφικό περιβάλλον απεικόνισης του TinyOS API [43]. ....	42

Εικόνα 30: Ο εξομοιωτής Cooja του Gontiki OS [44].	44
Εικόνα 31: Το διάγραμμα ροής επίλυσης του προβλήματος.	54
Εικόνα 32: Multihop routing στο VIPTOS [77].	59
Εικόνα 33: Στιγμιότυπο του εξομοιωτή NetTopo [79].	61
Εικόνα 34: Τυπικός ορισμός δικτύου σε NED [83].	62
Εικόνα 35: Στιγμιότυπο τοπολογίας ενός δικτύου [83].	62
Εικόνα 36: Βασικό tk περιβάλλον και μηνύματα εξόδου [83].	63
Εικόνα 37: Απόσπασμα του omnetpp.ini [84].	64
Εικόνα 38: Στιγμιότυπο του omnetpp.ini [84].	65
Εικόνα 39: Τυπικό παράδειγμα αρχείου ρυθμίσεων σεναρίου [88].	66
Εικόνα 40: Απόσπασμα xml αρχείου αρχικοποίησης κόμβων στον “κόσμο” του Shawn [84].	67
Εικόνα 41: Παραμετροποίηση RFNT model ("RF" Group Tag – ομαδική ετικέτα) [84].	69
Εικόνα 42: Περιοχή Καισαριανής – Πυκνή βλάστηση	78
Εικόνα 43: Περιοχή Πεντέλης – Αραιή βλάστηση	79
Εικόνα 44: Δειγματικές τιμές πεδίου Καισαριανής (πυκνή βλάστηση) και Πεντέλης (αραιή βλάστηση) σε σχέση με την FSPL καμπύλη.	80
Εικόνα 45: Περιοχές συχνοτήτων για αποδεκτό δίκτυο και απώλειας σήματος	86
Εικόνα 46: Στιγμιότυπο Quad Trees [96].	89
Εικόνα 47: Στιγμιότυπο ομαδοποίησης αισθητήρων με τον αλγόριθμο Kmeans [98].	90
Εικόνα 48: Στοιχειώδες πεδίο με δέντρα και ιδανικό πλέγμα αισθητήρων [99], [32].	91
Εικόνα 49: Matched sensors [99], [32]	92
Εικόνα 50: Πραγματικό – Στοιχειώδες πλέγμα που μπορεί να αναπτυχθεί στο πεδίο \$, σε σύγκριση με το ιδανικό * [99].	92
Εικόνα 51: Χαρακτηρισμός του πεδίου ανά πλήθος αισθητήρων και E0.	94
Εικόνα 52: Λογικό Διάγραμμα του ευριστικού αλγορίθμου κάλυψης πεδίου	97
Εικόνα 53: Αντικειμενοστρεφής προσέγγιση των συστατικών του αλγορίθμου σε C#.	98
Εικόνα 54: Συστατικά του λογισμικού και εξαρτήσεις	100
Εικόνα 55: Τυχαία διασπορά δέντρων.	101
Εικόνα 56: Πρώτο βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου των quad trees	102
Εικόνα 57: Δεύτερο βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου των quad trees	103
Εικόνα 58: Matched sensors, οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε δέντρα εγγύτητας E0(m).	104



---

Εικόνα 59: Τοποθέτηση των δρομολογητών στα quads με πληθυσμό matched sensors >M. ....	105
Εικόνα 60: Το πεδίο με τα quads και τους δρομολογητές .....	106
Εικόνα 61: Το παραγόμενο quad tree .....	106
Εικόνα 62: Τυχαία διασπορά 400 δέντρων σε 350 x 350m. ....	107
Εικόνα 63: Εφαρμογή πλέγματος αισθητήρων στην διασπορά των δέντρων.....	108
Εικόνα 64: Απεικόνιση αισθητήρων που έχουν γίνει “matched” – σύμβολο \$. ....	108
Εικόνα 65: Πραγματικό πλέγμα αισθητήρων που μπορεί να τοποθετηθεί στο πεδίο. ....	109
Εικόνα 66: Τοποθέτηση δρομολογητή και δημιουργία κυψέλης .....	109
Εικόνα 67: Συντεταγμένες και στατιστικά στοιχεία του προγράμματος .....	110
Εικόνα 68: Τοπολογία με grid που έχει υποστεί ολίσθηση κατά 20m στο Dx και Dy.....	111
Εικόνα 69: Αρχείο καταγραφών με όλα τα δεδομένα εισόδου και εξόδου του προβλήματος .....	111

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 1: Ενδεικτική κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την κατάσταση.....	35
Πίνακας 2: Καισαριανή – Πυκνή βλάστηση- μετρήσεις .....	76
Πίνακας 3: Πεντέλη – Αραιή βλάστηση- μετρήσεις.....	77
Πίνακας 4: Αποτελέσματα εκτέλεσης κοινού σεναρίου στους τρεις εξομοιωτές [74].....	81
Πίνακας 5: Αποτελέσματα των τριών εξομοιωτών σε αντιπαραβολή με τα δείγματα [74] .....	81
Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης των χαρακτηριστικών των εξομοιωτών [74] .....	82
Πίνακας 7: Συνδυασμοί μοντέλων εξασθένισης σήματος και βλάστησης. [93] .....	84
Πίνακας 8: Ισχύς σήματος δέκτη αναλόγως αποστάσεων [93]. .....	84
Πίνακας 9: Γραφική παράσταση ισχύος λαμβανομένου σήματος και απόστασης [93].....	84
Πίνακας 10: Πεντέλη (αραιή -sparse): Επίδραση της βλάστησης στην εξασθένιση σήματος .....	85
Πίνακας 11: Καισαριανή (πυκνή –dense ): Επίδραση της βλάστησης στην εξασθένιση σήματος.....	85
Πίνακας 12: Πίνακας αποστάσεων - Αλγόριθμος Bellman Ford .....	87
Πίνακας 13: Πλήθος και ποσοστό αισθητήρων που μπορούν να μετακινηθούν ανά Ε0. ....	93

# 1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## Περίγραμμα της Έρευνας

### 1.1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχουν συμβεί πολλές παρεμβάσεις σε βάρος του περιβάλλοντος, οι οποίες υπονομεύουν την ποιότητα ζωής, την υγεία και κληροδοτούν στις νέες γενιές «λιγότερο» και πιο ακατάλληλο περιβάλλον, με ανυπολόγιστες συνέπειες για το μέλλον.

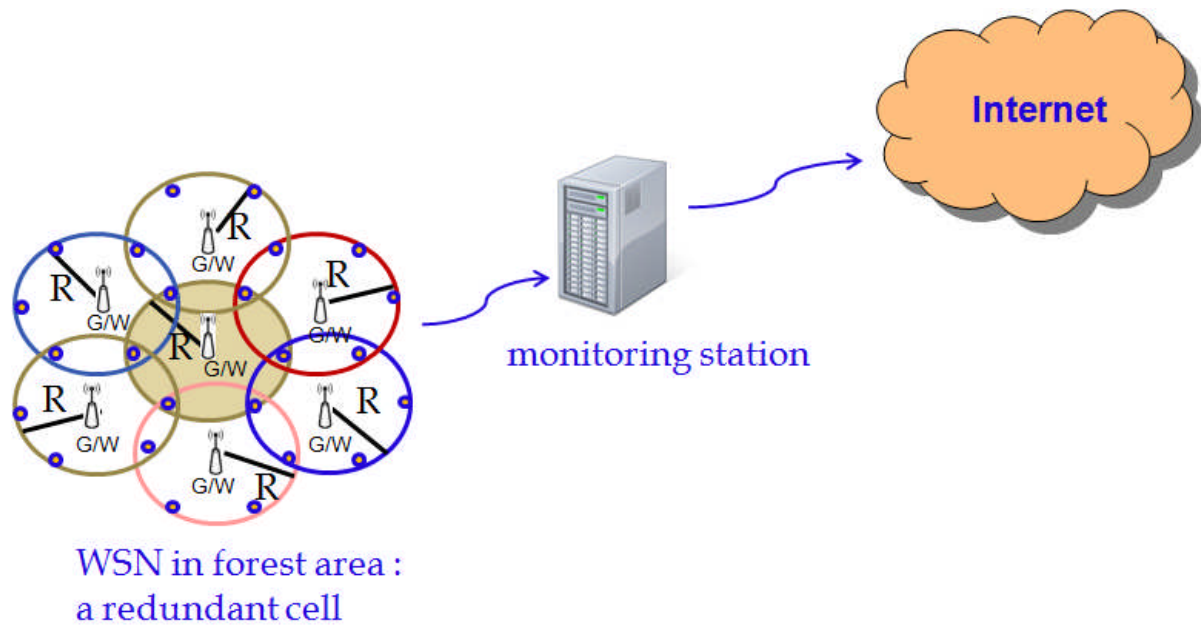
Κίνητρο για την παρούσα εργασία αποτέλεσε το μεγάλο ενδιαφέρον για την τεχνολογία της πληροφορικής και οι δυνατότητες αξιοποίησής της σε εφαρμογές σχετικές με το περιβάλλον. Μέσα στην τόση καταστροφή θεωρείται λογικό να σκεφτεί κανείς τον τρόπο που θα διαθέσει τις γνώσεις και τα μέσα που κατέχει, στη συμβολή της επίλυσης ενός τέτοιου σημαντικού προβλήματος αξιοποιώντας τα ιδιαίτερα ισχυρά σημερινά τεχνολογικά μέσα.

Επίσης σημαντικό κίνητρο, αποτέλεσε η δυνατότητα υλοποίησης δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων πολύ υψηλής χωρικής πυκνότητας, καθώς και υποστηρικτικών πληροφοριακών συστημάτων όχι μόνο ως μέσο έγκαιρης προειδοποίησης έκτακτων περιβαλλοντικών γεγονότων, αλλά ως μιας πλατφόρμας η οποία με κατάλληλη γενίκευση-επέκταση (π.χ. με αλλαγή του είδους των αισθητήρων) μπορεί να συνεισφέρει σε πλειάδα εφαρμογών του επίκαιρου πεδίου “Internet of Things”.

Ο στόχος της παρούσας διατριβής είναι η συμβολή στην λύση του προβλήματος της επιτήρησης του περιβάλλοντος, με ιδιαίτερη έμφαση στην εντός πεδίου (in-situ) επιτήρηση δασικών εκτάσεων μεγάλης κλίμακας μέσω ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης, παρακολούθησης γεγονότων και κινδύνων. Το ίδιο σύστημα μπορεί να συνεισφέρει και στην διαχείριση της κρίσης που ενδεχομένως θα προκύψει μετά από τον εντοπισμό μιας κατάστασης, δίνοντας κρίσιμες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο.

### 1.2. Το πρόβλημα

Το βασικό πρόβλημα συνίσταται στο γεγονός ότι η εποπτεία του περιβάλλοντος σε μεγάλη εμβέλεια θα πρέπει να γίνει με τρόπο εφικτό, αποτελεσματικό και αξιόπιστο. Ωστόσο, αυτό δεν είναι τόσο εύκολο όσο ακούγεται γιατί στο δάσος, το οποίο ως περιβάλλον χώρος μας ενδιαφέρει περισσότερο, οι συνθήκες δεν μπορούν να περιγραφούν πλήρως και ομοιόμορφα για όλες τις περιοχές. Η πρώτη προσέγγιση στην συμβολή της λύσης αυτού του προβλήματος είναι η εγκατάσταση ενός ευρείας κλίμακας και ιδιαίτερα πυκνού δικτύου ασυρμάτων αισθητήρων στο πεδίο με σκοπό τη συλλογή μετρήσεων φυσικών μεγεθών, όπως θερμοκρασία και υγρασία και την αποστολή σημάτων μόνο σε περίπτωση ανίχνευσης έκτακτου συμβάντος π.χ. πυρκαγιάς. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει δικτυακές υποδομές και υπηρεσίες αλλά και υλικό, δηλαδή αισθητήρες, δρομολογητές και έναν κεντρικό σταθμό παρακολούθησης. Μια εφικτή λύση αποτυπώνεται ιδανικά στην εικόνα 1.



Εικόνα 1: Γενική Δομή συστήματος επιτήρησης

Σημαντικά συστατικά του προβλήματος σε επίπεδο αισθητήρων αποτελούν η τεχνολογία και ο τρόπος λειτουργίας τους. Ο σημαντικότερος ίσως προβληματισμός σχετικά με τους αισθητήρες έχει να κάνει με την διάρκεια ζωής της μπαταρίας και το πόσο συχνά αυτοί θα εκπέμπουν το σήμα τους. Εδώ θα πρέπει να εξεταστούν οι διάφορες υπάρχουσες τεχνολογίες και να αξιολογηθούν ως προς κρίσιμες για την οπτική γωνία μας παραμέτρους, όπως ο χρόνος ζωής της μπαταρίας των συσκευών. Σε κάθε περίπτωση, ως γνωστόν, η κατανάλωση αποκλίνει από τα θεωρητικά και κατασκευαστικά μεγέθη σε πραγματικές συνθήκες «αφιλόξενου» περιβάλλοντος, γεγονός που στην πράξη μεταβάλλει τους όρους του παιχνιδιού.

Επιπρόσθετα, σημαντικό μέρος του προβλήματος αποτελεί η επικοινωνία, η οποία θα πρέπει να εξασφαλίζεται, και πιο συγκεκριμένα ο τρόπος διαβίβασης του μηνύματος από κάθε αισθητήρα στον κεντρικό κόμβο. Εξετάζεται αν οι αισθητήρες θα πρέπει να συνδέονται με τους γειτονικούς τους, δεδομένου ότι υποστηρίζονται αρκετά σύγχρονα πρωτόκολλα (multi-hop) ή αν θα πρέπει να επικοινωνούν μόνο με τον δρομολογητή / πύλη. Καλό θα είναι να υπάρχει το λιγότερο ένας κόμβος που θα παίζει τον ρόλο της πύλης και θα δρομολογεί τα δεδομένα του συστήματος των αισθητήρων σε άλλα συστήματα. Το αμέσως επόμενο θέμα είναι ο τρόπος που ο δρομολογητής θα επικοινωνεί με τον έξω κόσμο, η τεχνολογία του και η αξιοπιστία του γενικότερα. Η εξασφάλιση συνδεσιμότητας μεταξύ αισθητήρων και δρομολογητή είναι σημαντική καθώς η κρισιμότητα του στόχου της εφαρμογής απαιτεί μικρή ανοχή σε αστοχίες. Ένα σήμα ενδεχόμενης εκδήλωσης πυρκαγιάς λ.χ. που δεν θα ληφθεί εγκαίρως ή ακόμη και καθόλου μπορεί να μεταφραστεί σε μεγάλη καταστροφή. Παράλληλα, όλα τα παραπάνω συζητούνται με αναφορά και στο κόστος μιας εγκατάστασης αυτού του διαμετρήματος, το οποίο παραμένει υψηλό και οφείλει να είναι ανταποδοτικό.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθούν οι πολλές και διαφορετικές δυνατότητες που δίνονται μέσω της καλής και αξιόπιστης λειτουργίας αυτού του δικτύου. Προοπτικά, η εφαρμογή αυτού του δικτύου μπορεί με μικρές αλλαγές να αξιοποιηθεί σε άλλες κρίσιμες εφαρμογές, όπως η φύλαξη συνόρων, η

εποπτεία κρισίμων υποδομών (π.χ. αγωγοί πετρελαίου, δίκτυο ύδρευσης, δίκτυο ηλεκτροδότησης, δίκτυο δεδομένων) και γενικότερα σε εφαρμογές βασισμένες στον όρο “Internet of Things”.

Ωστόσο, η συνδεσιμότητα του δικτύου αισθητήρων, η οποία απλά αναφέρθηκε παραπάνω, για να εξασφαλιστεί χρειάζεται ιδιαίτερη μελέτη σε διάφορες δασικές περιοχές με διαφορετική βλάστηση και μορφολογία εδάφους. Οι μετεωρολογικές συνθήκες έχουν κι εκείνες επίπτωση σε θέματα συνδεσιμότητας, οι οποίες, αν και πιθανόν κρίνονται ως μικρότερης σημασίας σε σχέση με τα ζητήματα που έχουν ήδη τεθεί, είναι υπαρκτές.

Σημαντικό παράγοντα αποτελεί και ο τρόπος επικοινωνίας του δρομολογητή με τον κεντρικό σταθμό εποπτείας. Μόνη επιλογή εδώ είναι η ασύρματη επικοινωνία. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι μέσα σε ανοιχτά φυσικά περιβάλλοντα όπως ένα δάσος δεν μπορούμε να μιλάμε για παροχή ενέργειας άλλης μορφής εκτός από αυτής της μπαταρίας των αισθητήρων ή του δρομολογητή. Συνεπώς οι έννοιες της ηλεκτρικής γραμμής ή των ενσύρματων γραμμών μεταφοράς δεδομένων δεν αποτελούν επιλογές.

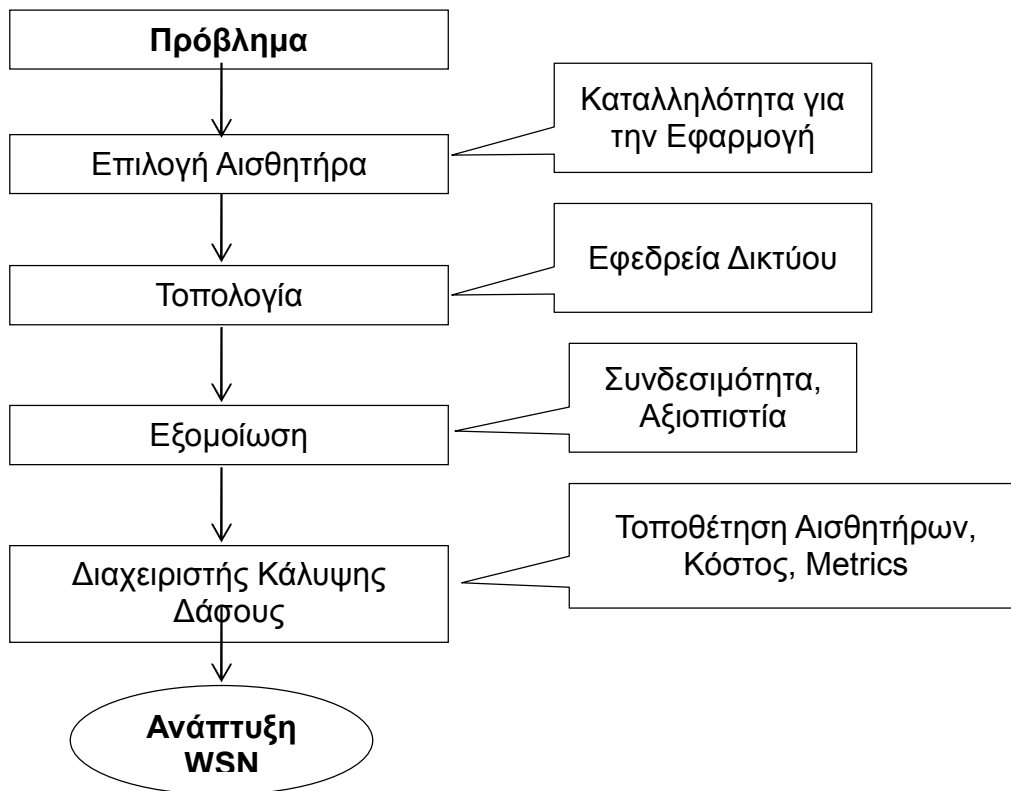
Όσον αφορά την πλευρά του σημείου εποπτείας του συστήματος, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα αναφορικά με θέματα διαθεσιμότητας και εφεδρείας, τα οποία σήμερα ασφαλώς είναι εφικτά με πλήθος τεχνολογιών. Παράλληλα, θα πρέπει να τρέχει συγκεκριμένο λογισμικό στο οποίο άλλωστε θα γίνει αναφορά στην πορεία.

Τέλος, ιδιαίτερα σημαντική συνιστώσα του προβλήματος αποτελεί η εύρεση της καλύτερης δυνατής τοποθέτησης των αισθητήρων σε συνάρτηση με την επιλεγμένη δικτυακή τοπολογία, την πυκνότητα και τη χωρική κατανομή πιθανών σημείων τοποθέτησης (δέντρων, για την περίπτωση του δάσους), καθώς και τη δυνατότητα φυσικής τοποθέτησής τους.

### 1.3. Η προσέγγιση

Προσεγγίζοντας το πρόβλημα, η πρώτη μας μέριμνα ήταν η έρευνα σχετικά με τους τύπους αισθητήρων που υπάρχουν. Ως πρώτη επιλογή, διερευνήθηκε η χρήση αισθητήρων X-bow και του λειτουργικού TinyOS. Η συγκεκριμένη ήταν πολλά υποσχόμενη για το δικό μας πείραμα και ανάγκες. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι η εν λόγω τεχνολογία δεν απευθύνεται σε προβλήματα της κλίμακας που εξετάζουμε. Σχετικά σύντομα, η έρευνα οδηγήθηκε σε διαφορετικές λύσεις μη-TinyOS και μη X-bow. Επιλέχθηκαν αισθητήρες άλλης τεχνολογίας η οποία δεν “υποφέρει” από ενεργειακή κατανάλωση που κάνει ανέφικτη τη λύση. Για την ακρίβεια, επιλέχθηκαν αισθητήρες οι οποίοι με κατάλληλη τεχνολογία στέλνουν ένα σήμα συναγερμού στον δρομολογητή μόνο κατά την καύση τους, χωρίς να έχουν άλλη σταθερή επικοινωνία με αυτόν, γεγονός που επιβάλλει και τη λήψη άλλων αποφάσεων δικτυακής αρχιτεκτονικής.

Ένα μπλοκ διάγραμμα της πορείας της έρευνας και της διατριβής δεικνύεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2: Διάγραμμα της πορείας της έρευνας

Στην πορεία αναζητήθηκε η κατάλληλη τοπολογία ανάπτυξης δικτύου η οποία θα εξασφάλιζε συνδεσιμότητα στους κόμβους και θα παρείχε ανοχές σε πιθανές αστοχίες. Συνεπώς η τοπολογία που θα επιλεγεί θα πρέπει να διευκολύνει την επικοινωνία και την εφεδρεία (redundancy/ανοχή σε αστοχίες) του δικτύου στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, με δεδομένους πάντα τους περιορισμούς κόστους.

Η εξασφάλιση της συνδεσιμότητας μεταξύ των αισθητήρων και του δρομολογητή επιτυγχάνεται μέσω της εξομοίωσης ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων με κατάλληλο λογισμικό. Μια εφαρμογή ανάπτυξης δικτύου αισθητήρων σε ευρεία κλίμακα με χαρακτηριστικά κρίσιμης υποδομής σχετικά την ανίχνευση έκτακτων γεγονότων, δεν ενδείκνυται να υλοποιηθεί χωρίς την προηγούμενη εξομοίωση της συμπεριφοράς της, ιδιαίτερα με δεδομένο το κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης. Η εξομοίωση έρχεται να μοντελοποιήσει μια κατηγοριοποιημένη δασική περιοχή και να αποφανθεί σχετικά με την επικοινωνία μεταξύ κόμβων και δρομολογητή αναλόγως της εξασθένισης της μετάδοσης του σήματος, της εξασθένισης λόγω βλάστησης και αναγλύφου και πάντα σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της κεραίας του αισθητήρα και του δρομολογητή. Είναι πολύ λογικό πριν στηθεί ένα εκτενές και ακριβό δίκτυο να μπορούμε εκ των προτέρων να προσεγγίσουμε τον βαθμό αξιοπιστίας του.

Η τοπολογία και η εξομοίωση αποτελούν ίσως τα σημαντικότερα προς επίλυση ζητήματα για την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου δικτύου αισθητήρων, το οποίο τουλάχιστον λόγω της μεγάλης του έκτασης έχει και υψηλό κόστος.

Τέλος, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της "βέλτιστης" τοποθέτησης του αισθητήρα στο δάσος με βάση την τοπολογία και τις μετρικές που έχουν ήδη επιλεγεί από τα προηγούμενα βήματα. Ο όρος

"βέλτιστη" χρησιμοποιείται εδώ καταχρηστικά και αυτό γιατί σε ανοικτά φυσικά περιβάλλοντα δεν είναι δυνατός ο ορισμός ενός μαθηματικού προβλήματος βελτιστοποίησης διότι δεν μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τις δυνατές θέσεις τοποθέτησης, λ.χ. τις χωρικές συντεταγμένες των δέντρων στο δάσος. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι εκεί που θα πρέπει να τοποθετηθεί ένας αισθητήρας ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις πυκνότητας και κάλυψης, είναι δυνατό να μην υπάρχει για παράδειγμα δέντρο και να πρέπει να βρεθεί μια θέση που συγκλίνει όσο το δυνατό περισσότερο στην επιθυμητή. Συνεπώς, χρειάζεται ένας ευριστικός αλγόριθμος και το αντίστοιχο λογισμικό το οποίο παίζει το ρόλο του Διαχειριστή Κάλυψης και ο οποίος τοποθετεί τους αισθητήρες στα κοντινότερα εφικτά σημεία. Επίσης, αναπτύσσει το πλέγμα των αισθητήρων σύμφωνα με την επιδιωκόμενη δικτυακή τοπολογία, βρίσκοντας τις συντεταγμένες των αισθητήρων, το πλήθος τους και μετρικές πάνω στην ανάπτυξη δικτύου.

Ο συνδυασμός των εργαλείων της εξομοίωσης και του Διαχειριστή Κάλυψης, προσεγγίζει το πρόβλημα της ανάπτυξης ενός αξιόπιστου δικτύου αισθητήρων με ανοχή σε βλάβες σε δασικές περιοχές και συνεισφέρει στη λύση του, καθώς παρέχει βασικούς άξονες και μετρήσεις πάνω στα οποία μπορεί κανείς να στηριχθεί σε θεμελιώδη ζητήματα για την υλοποίηση του δικτύου.

Θεμελιώδεις άξονες της μελέτης αποτέλεσαν η βασική κατηγοριοποίηση (classification) δασικών περιοχών σε περιοχές με πολύ πυκνή, πυκνή, μέση, αραιή και πολύ αραιή βλάστηση. Παράλληλα συλλέχθηκαν μετρήσεις και στιγμιότυπα από το πραγματικό περιβάλλον από δύο προτυποποιημένες περιοχές, τα οποία συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της εξομοίωσης και αποτέλεσαν τα πρότυπα μοντέλα εξομοίωσης για αντίστοιχες περιοχές.

Για την επαλήθευση των παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου σε πραγματικές συνθήκες δασικού περιβάλλοντος, και συγκρίθηκαν με τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές καθώς και με τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών λογισμικών εξομοίωσης ασύρματων επικοινωνιών. Η επιλογή των εργαλείων εξομοίωσης αποτέλεσε μια επίπονη διαδικασία και μέσω αυτής, με αξιολόγηση της ακρίβειας αλλά και άλλων χαρακτηριστικών τους, επιλέχτηκε το τελικό λογισμικό - εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια τεκμηριώθηκε και πειραματικά η προτεινόμενη τοπολογία και αναπτύχθηκε και ο αλγόριθμος κάλυψης μιας ευρείας δασικής περιοχής.

#### **1.4. Συνεισφορά και Πρωτοτυπία**

Η διατριβή καταπιάνεται με ένα σημαντικό πρόβλημα, αυτό της σχεδίασης και της εκ των προτέρων αξιολόγησης διατάξεων ασύρματων δικτύων αισθητήρων υψηλής χωρικής πυκνότητας τα οποία προορίζονται για λειτουργία σε αφιλόξενα φυσικά περιβάλλοντα. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά είναι σημαντικά ταυτοποιητικά στοιχεία μιας νέας οικογένειας ερευνητικών προβλημάτων τα οποία συνδυάζουν απαιτήσεις γνώσεων τόσο από τον τομέα των δικτύων και ιδιαίτερα της προσομοίωσης, όσο και από τον τομέα της μελέτης των τοπογραφικών χαρακτηριστικών του φυσικού περιβάλλοντος.

Η απαίτηση υψηλής χωρικής πυκνότητας και της μεγάλης κλίμακας οδηγεί στη σχεδίαση δικτύων με χιλιάδες κόμβους, τα οποία προορίζονται για εγκατάσταση σε περιβάλλοντα όπου δεν μπορεί να θεωρείται διαθέσιμη καμία πηγή ενέργειας, ούτε είναι εφικτό να αναζητηθούν άλλες λύσεις όπως η

ηλιακή ενέργεια, τόσο για λόγους κόστους, όσο και εξ αιτίας φυσικών περιορισμών όπως φύλλωμα δέντρων κ.ά. Ως εκ τούτου, "ευφυή" πρωτόκολλα οργάνωσης τέτοιων δικτύων όπως multi-hop κ.ά. με απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος σε κάθε κόμβο του δικτύου δεν είναι κατάλληλα για αυτή την κλίμακα προβλημάτων. Επιπλέον των περιορισμών που προαναφέρθηκαν, η ταχύτητα της εξέλιξης των φυσικών φαινομένων που επιτηρούνται από τέτοια δίκτυα, μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα αναδιοργάνωσης του δικτύου.

Η απαίτηση λειτουργίας σε αφιλόξενα φυσικά περιβάλλοντα εισάγει επιπλέον περιορισμούς στη δυνατότητα χωροθέτησης τέτοιων δικτύων, εφόσον οι διαθέσιμες πιθανές θέσεις των κόμβων ακολουθούν τα μη ελεγχόμενα χαρακτηριστικά του φυσικού περιβάλλοντος και καθιστούν μη εφικτό τον ορισμό προβλημάτων βέλτιστης χωροθέτησης η επίλυση των οποίων να μπορεί να έχει εφαρμογή στο πεδίο, καθότι στη γενική περίπτωση το μεγάλο πλήθος πιθανών θέσεων εγκατάστασης αισθητήρων δεν μπορεί να είναι γνωστό.

Τέλος, τα λογισμικά προσομοίωσης ασύρματων δικτύων χρησιμοποιούν προκαθορισμένες ταξινομήσεις συντελεστών εξασθένησης σήματος οι οποίες δεν περιγράφουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των δικτύων στην κλίμακα της τάξης των 20 μέτρων με διαφορετικούς τύπους φυλλώματος, υγρασίας, πυκνότητας στον κύκλο του έτους κλπ.

Η διατριβή καταπιάνεται με το πρόβλημα αξιολόγησης δικτύων ασύρματων αισθητήρων με τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω και ασχολείται τόσο με τον ορισμό όσο και με την αντιμετώπιση του προβλήματος, ως ένα πολυ-παραμετρικό πρόβλημα εκτίμησης δεικτών χρήσιμων στην αξιολόγηση και το σχεδιασμό τέτοιων δικτύων. Η προσέγγιση του θέματος είναι συστηματική και πλήρης σε θεωρητικό επίπεδο και σε επίπεδο ανάπτυξης, έχει δε λάβει υπόψη τη σχετικά περιορισμένη βιβλιογραφία καθώς παραμένει νέο το έδαφος της σχεδίασης και ανάπτυξης δικτύων ασύρματων αισθητήρων τόσο μεγάλης κλίμακας και με τέτοια χαρακτηριστικά.

Η έρευνα που έγινε εισάγει μια νέα ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος, η οποία περιλαμβάνει στοιχεία τόσο από τις επιστήμες του χώρου, όσο και από την περιοχή των δικτύων, τα οποία συνδυάζει με αλγόριθμους και εργαλεία που προτείνει, υπό το πρίσμα της επιστήμης της Μηχανικής (engineering) η οποία λαμβάνει πάντα υπόψη το κόστος και την πρακτική εφικτότητα λύσεων κάθε κλίμακας. Η κύρια συμβολή της εντοπίζεται στην πρόταση ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου, χρήσιμου στη σχεδίαση και εκ των προτέρων αξιολόγηση δικτύων ασύρματων αισθητήρων μεγάλης κλίμακας και χωρικής πυκνότητας σε αφιλόξενα φυσικά περιβάλλοντα, το οποίο συνδυάζει τεχνικές από διαφορετικές επιστημονικές περιοχές.



## 2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Οριοθέτηση του προβλήματος

#### 2.1. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

##### Γενικά Χαρακτηριστικά

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν συγκριτικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές όπως η παρακολούθηση περιβαλλοντικών γεγονότων. Ωστόσο, η απόκτηση αυτών των πλεονεκτημάτων εξαρτάται από έναν αριθμό παραμέτρων όπως είναι η αξιόπιστη επικοινωνία και οι δυνατότητες συντονισμού του εφαρμοζόμενου συστήματος.

Εμβαθύνοντας στα χαρακτηριστικά του προβλήματος, θα εστιάσουμε αρκετά και στο θέμα των τοπολογιών. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες μπορούν να μεταδίδουν τα δεδομένα τους σε γειτονικούς αισθητήρες, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας αρκετών σχημάτων τοποθέτησης. Στη συνέχεια θα εξεταστούν αυτές οι τοπολογίες και θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά τους. Πάντως, αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες αισθητήρων όπως για παράδειγμα αισθητήρες που στέλνουν ένα μήνυμα μόνο στην πύλη (gateway) και δεν επικοινωνούν καθόλου με τους γειτονικούς τους. Οι αισθητήρες αυτής της τεχνολογίας πληρούν πολλές από τις απαιτήσεις της ανάπτυξης δικτύων ασύρματων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN) στο δάσος.

Σε κάθε περίπτωση μέσα στο πλήθος των αισθητήρων θα χρησιμοποιείται τουλάχιστον ένας κόμβος ως δρομολογητής, γνωστός και σαν πύλη (Gateway). Ο δρομολογητής αναλόγως της τεχνολογίας που διαθέτει κοστολογείται σημαντικά υψηλότερα από τον αισθητήρα. Ο Gateway έχει την ιδιότητα να μπορεί να μεταδώσει τα δεδομένα του σε άλλης μορφής δίκτυο από αυτό του πεδίου. Για παράδειγμα, μπορεί να δρομολογήσει τα μηνύματα των αισθητήρων σε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, wi-fi κ.ά., το οποίο τελικά να συνδέεται στο Internet.

Αξίζει να σημειωθεί πως στην βιβλιογραφία καταγράφεται εκτενής έρευνα γύρω από εμπλουτισμό των τοπολογιών με νέα σχήματα, που στοχεύουν στην άμβλυνση πιθανών δυσλειτουργιών σχετικών με την εφεδρεία, την συνδεσιμότητα και την κάλυψη πεδίου καθώς και τον χρόνο ζωής του δικτύου. [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].

##### 2.1.1. Τεχνολογία και Γενικές Εφαρμογές

Σημαντικές είναι οι εφαρμογές των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων σε μία πλειάδα τομέων και αντικειμένων [8]. Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος εξακολουθεί να καταλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογής της εν λόγω τεχνολογίας. Ωστόσο υπάρχουν και αρκετά άλλα πεδία ενδιαφέροντος και ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων που αξίζει να μνημονευθούν.

Κάποιοι από τους εκτεταμένους χώρους εφαρμογής των δικτύων αισθητήρων είναι οι ακόλουθοι:

- Παρακολούθηση της κίνησης των αυτοκινήτων στους δρόμους μεγάλων ταχυτήτων.
- Καθορισμός διάρκειας των φαναριών κυκλοφορίας.
- Εντοπισμός αυτοκινήτων σε χώρους parking.
- Ανάπτυξη εργαλείων αποφάσεων για τους πυροσβέστες έτσι ώστε να ελέγχεται η κίνησή τους σε φλεγόμενα κτίρια καθώς να παρακολουθούνται και οι συνθήκες των κτιρίων.
- Δίκτυα Σώματος / Body Networks.

Στη συνέχεια αναλύονται εκτενέστερα οι σημαντικότεροι τομείς εφαρμογής.

### 2.1.1.1. Ιατρική

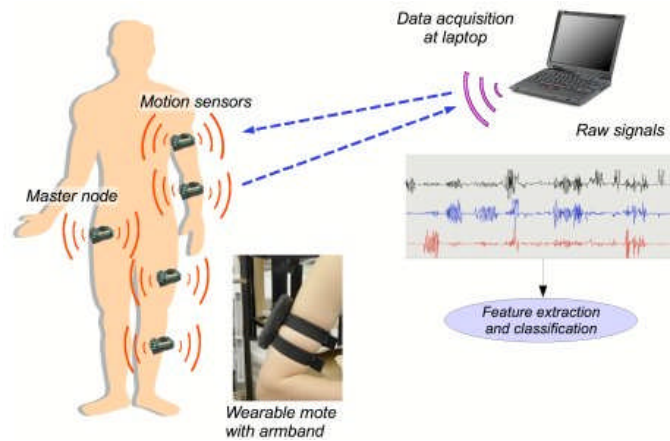
Τα WSNs εδώ και καιρό παρέχουν τις υπηρεσίες τους στο πλευρό του ανθρώπου υποστηρίζοντας την υγεία του. Παρακολουθούνται συγκεκριμένες παθήσεις και απομακρυσμένα υποστηρίζονται ηλικιωμένοι και άρρωστοι άνθρωποι. Αισθητήρες ελέγχουν μεγέθη όπως η πίεση του ασθενούς, οι καρδιακοί παλμοί, κ.α.

Στα εργαστήρια ερευνών της Phillips στο Aachen της Γερμανίας [9], έχουν αναπτυχθεί ευφυή βιοϊατρικά ρούχα με τη χρήση αισθητήρων και ασυρμάτων δικτύων τεχνολογίας Bluetooth, τα οποία παρακολουθούν ζωτικές ενδείξεις του ανθρωπίνου σώματος, οι μετρήσεις των οποίων αποστέλλονται σ' έναν κεντρικό υπολογιστή. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η παρακολούθηση του ασθενούς σε πραγματικό χρόνο και επιπροσθέτως δίδεται η δυνατότητα για την ανάπτυξη μοντέλων σχετικά με προτεινόμενες θεραπείες αλλά ακόμη και πρόληψης πιθανών νόσων.

Ακολουθώντας την ίδια λογική, έχουν αναπτυχθεί και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων σχετικά με τις πιθανές θεραπείες ανά περίπτωση ασθενή που πάσχει από χρόνιες παθήσεις (Chronious fr7 programme) [10].

Πρόσφατα έχει αναπτυχθεί σύστημα έγκαιρης ανίχνευσης πνευμονικού οιδήματος για ασθενείς που πάσχουν από χρόνια καρδιοπάθεια [11]. Με αυτόν τον τρόπο ο ασθενής μπορεί να τύχει καλύτερης αντιμετώπισης και να αποφύγει την μεταφορά του στην εντατική. Σε αυτήν την περίπτωση με τη βοήθεια των WSNs παρακολουθείται η ποσότητα υγρού που μπορεί να έχει ο ασθενής στα πνευμόνια του μετρώντας την διαθωρακική βιο-αντίδραση που έχει αναπτυχθεί εκτός του σώματος. Το εν λόγω σύστημα (TiBIS) αποτελείται από μια μονάδα μέτρησης ενσωματωμένη σε ένα συνθετικό ύφασμα και από μια προσωπική ψηφιακή συσκευή για την επεξεργασία σήματος και την αλληλεπίδραση με τον χρήστη.

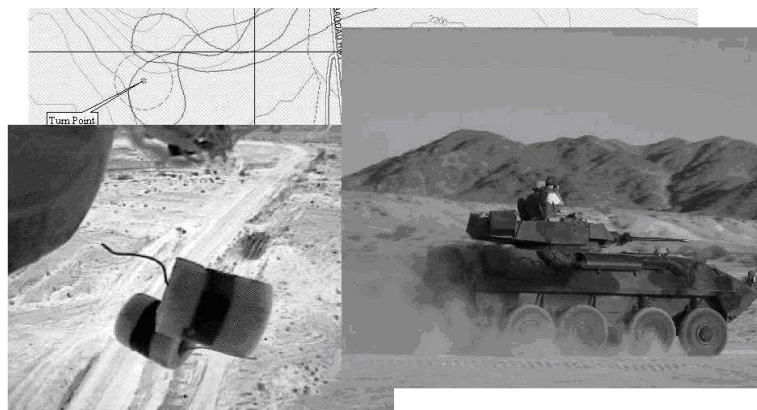
Στην εικόνα 3, που ακολουθεί, δεικνύεται ένα τυπικό παράδειγμα δικτύου σώματος για ιατρικές εφαρμογές.



Εικόνα 3: Ιατρικές Εφαρμογές - Δίκτυο Σώματος [12]

### 2.1.1.2. Άμυνα

Οι στρατιωτικές εφαρμογές, ως γνωστόν, έχουν αποτελέσει το εφαλτήριο για την διάχυση στο κοινό χρήσιμων τεχνολογιών που έχουν ανακαλυφθεί, όπως π.χ. το πρωτόκολλο TCP/IP, το Internet, και άλλα. Ομοίως η χρήση αισθητήρων σε στρατιωτικές εφαρμογές είναι δεδομένη εδώ και αρκετά χρόνια. Χρησιμοποιούνται αυτό-οργανούμενα δίκτυα π.χ στην παρακολούθηση συνόρων (ανίχνευση κίνησης, κ.α.), σε δίκτυα σώματος όπου οι στρατιώτες φέρουν επάνω τους αυτοματισμούς σε σχέση με τον αέρα που αναπνέουν και το περιβάλλον που βρίσκονται κ.α. Δεδομένου ότι τα WSNs αποτελούν μια πολύ καλή λύση για την παρακολούθηση κρίσιμων υποδομών και κρίσιμων περιοχών, δεικνύεται στην εικόνα 4 ένα ελικόπτερο από το οποίο πέφτουν αισθητήρες στο έδαφος. Οι αισθητήρες αυτοί θα οργανωθούν σε ένα ad-hoc δίκτυο που θα στείλει μετρήσεις προκαθορισμένων προς παρακολούθηση μεγεθών.



Εικόνα 4: Στρατιωτικές Εφαρμογές [13]

### 2.1.1.3. Εποπτεία κρίσιμων υποδομών

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού πλαισίου FP7 πραγματοποιείται το πρόγραμμα COST IC0806, Intelligent Monitoring, Control and Security of Critical Infrastructure Systems [14]. Δύο φορές τον

χρόνο συνεδριάζουν τα μέλη της δράσης, παρουσιάζοντας τις τελευταίες εξελίξεις των ερευνών τους σχετικά με την παρακολούθηση κρίσιμων υποδομών. Πιο συγκεκριμένα οι κρίσιμες υποδομές αναφέρονται στα δίκτυα ύδρευσης, ηλεκτρισμού και δικτύων δεδομένων. Πάρα πολλές εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί γι' αυτά όπως τα smart grids, WSNs με multihop routing για παρακολούθηση αγωγών κ.α. Οι καινοτομίες αυτές βέβαια αναφέρονται και προοιωνίζουν τις υποδομές της επόμενης γενιάς (Next Generation Infrastructures) [15].

#### 2.1.1.4. Internet of Things

Η έννοια Internet of Things [16] αναφέρεται στην μοναδική αναγνώριση αντικειμένων και την εικονική απεικόνισή τους σε δομή σαν αυτή του Internet. Ο όρος εισήχθη για πρώτη φορά από τον Kevin Aston, πρωτοπόρο της τεχνολογίας ο οποίος ήταν συνιδρυτής του Auto-ID Center στο MIT. Το Auto-ID Center δημιούργησε ένα πρότυπο σύστημα για RFID και άλλους αισθητήρες. Το RFID (Radio Frequency Identification) συχνά θεωρείται ως προαπαιτούμενο για το Internet Of Things, (IoT). Αν όλοι οι άνθρωποι στην καθημερινή ζωή και τα αντικείμενα έφεραν ετικέτες ραδιοσυχνότητας θα μπορούσαν να αναγνωρίζονται από Η/Υ. Ωστόσο, η μοναδική αναγνώριση αντικειμένων επιτυγχάνεται μέσω άλλης τεχνολογίας όπως π.χ. bar codes.

Η «περιβάλλουσα νοημοσύνη» καθώς και ο αυτόνομος έλεγχος αποτελούν μέρος της ιδέας του Internet of things. Οι έρευνες έχουν στραφεί στην ενσωμάτωση αυτών των αρχών στο Internet of Things. Επίσης η ενσωματωμένη νοημοσύνη, Embedded intelligence, παρουσιάζει μια διάσταση της τεχνητής νοημοσύνης του IoT ως εξής: επηρεάζοντας την δυνατότητα συλλογής και ανάλυσης ψηφιακών ιχνών τα οποία δημιουργούνται από τους ανθρώπους όταν αλληλεπιδρούν με ένα ευρύ φάσμα έξυπνων αντικειμένων σε λειτουργία για την ανακάλυψη γνώσης σχετικά με την ανθρώπινη ζωή, την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και την κοινωνική συμπεριφορά.

Το IoT ακολουθεί αρχιτεκτονική οδηγούμενη από γεγονότα (Event Driven Architecture). Αξίζει να σημειωθεί ότι το IoT αποτελεί βασικό άξονα έρευνας της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο FP7 Ευρωπαϊκό Πλαίσιο Έρευνας.

#### 2.1.1.5. Πυροδοτούμενα γεγονότα

Ευρύ φάσμα εφαρμογών βρίσκουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε κάθε τι που αποτελεί ένα πυροδοτούμενο γεγονός. Κάθε συμβάν που πρέπει να ανιχνευτεί εγκαίρως και να σταλεί μήνυμα συναγερμού ή ειδοποίησης αποτελεί κι ένα πυροδοτούμενο γεγονός (triggered event). Όπως ακριβώς στο ξέσπασμα των πυρκαγιών, στην ανίχνευση μικρομετατοπίσεων, στην αλλαγή ζωτικών σημάτων του οργανισμού ενός ασθενούς κ.ο.κ.

Η αξιοπιστία των συστημάτων που ανιχνεύουν τα πυροδοτούμενα γεγονότα είναι μεγάλης σημασίας καθώς το υψηλό επίπεδο αυτής αποτελεί και λόγο ύπαρξης των υποδομών ανίχνευσης των γεγονότων αυτών. Κανείς δεν θέλει να φτιάξει μια ακριβή υποδομή, η οποία δεν είναι σίγουρο ότι θα δίνει το σωστό μήνυμα και επιπροσθέτως θα προκαλεί μια σειρά γεγονότων (actuator) τα οποία κοστίζουν και αυξάνουν την πολυπλοκότητα κάθε φορά που θα ενεργοποιούνται.

### 2.1.2. Περιβάλλον

Ως επί το πλείστον τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα η παρακολούθηση μπορεί να αφορά την θερμοκρασία, το φως, τον ήχο, την υγρασία, την ραδιενέργεια κ.α. Επιπροσθέτως, είναι δυνατή η παρακολούθηση καλλιεργειών.

#### 2.1.2.1. Γεωργία

Πολλά τεχνολογικά επιτεύγματα έχουν συμβεί στον χώρο της γεωργίας εξ αιτίας οικονομικών και περιβαλλοντικών λόγων. Συνεπώς αρκετά πράγματα και εργαλεία έχουν αλλάξει στον παραδοσιακό γεωργικό εξοπλισμό. Η νέα αυτή τάση και ο τρόπος που πραγματοποιείται η γεωργία είναι γνωστός και ως “precision agriculture”. Σε μικρές εκτάσεις είναι εφικτός ο έλεγχος του νερού, του λιπάσματος και των παρασιτοκτόνων, ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι εφαρμόσιμο σε μεγάλες εκτάσεις. Ακριβώς σε αυτό το σημείο τη λύση προσφέρουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [17], καθώς έτσι δίδεται η δυνατότητα συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες χωρικά κατανεμημένους σε διάφορα σημεία. Η χρήση των δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων στην γεωργία υπαγορεύτηκε ιδιαίτερα από την ανάγκη χρήσης συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων καθώς αναποτελεσματικές και δαπανηρές μέθοδοι κόστισαν αρκετά τόσο σε χρόνο όσο και σε χρήματα στους αγρότες. Την απάντηση σε αυτά προσπάθησε να δώσει το σύστημα iFarm [18], το οποίο αποτελεί λύση για την παρακολούθηση της αγροτικής παραγωγής με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας μέσω διαχείρισης νερού καθώς και της βελτίωσης της κοινωνικο-οικονομικής κατάστασης των αγροτών παράλληλα με την επίγνωση και συναίσθηση της καλής πρόβλεψης και σχεδιασμού της σοδειάς τους. Το iFarm θεωρείται ένας πολλά υποσχόμενος μηχανισμός για την βελτιστοποίηση της αγροτικής παραγωγής και πόρων γενικότερα, την εποπτείας γης και λήψης αποφάσεων. Το εν λόγω σύστημα βοηθά τους αγρότες να ξέρουν ανά πάσα στιγμή τι συμβαίνει σχετικά με τις συνθήκες της σοδειάς και του περιβάλλοντος. Συνεπώς διάφορες επισημάνσεις και προτάσεις τίθενται μέσω του συστήματος στην κρίση των αγροτών. Με αυτόν τον τρόπο υλοποιείται η καλούμενη “precision agriculture” και λαμβάνονται έτσι πολύτιμες αποφάσεις που μπορούν όχι μόνο να αυξήσουν την παραγωγικότητα της γης αλλά βοηθούν στην βέλτιστη αξιοποίηση και χρήση πόρων, προσφέροντας πολύτιμες υπηρεσίες στους αγρότες.

#### 2.1.2.2. Προστασία περιβάλλοντος

Στο Ηνωμένο Βασίλειο και στην Ινδία χρησιμοποιείται εφαρμογή ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων για τη παρακολούθηση της μόλυνσης του περιβάλλοντος με στόχο την συλλογή λεπτόκοκκων στοιχείων μόλυνσης. Σε αυτήν την περίπτωση η επιλογή αισθητήρων αερίου καθώς και η εγκυρότητα των μετρήσεων των αισθητήρων παίζουν καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα και στην επιτυχία γενικότερα του συστήματος. Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες καθώς και αυτοί της στερεάς κατάστασης αερίου είναι χαμηλού κόστους και παραδοσιακά έχουν χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση των καυσαερίων των οχημάτων και ως εκ τούτου είναι σχεδιασμένοι για να μετρούν αρκετά υψηλότερες συγκεντρώσεις αερίου από το περιβάλλον το οποίο θέλουμε να παρακολουθήσουμε. Σε σχετική

μελέτη [19], αξιολογούνται οι εν λόγω αισθητήρες κατά την χρήση τους σε ένα έργο εποπτείας μόλυνσης χρησιμοποιώντας διάχυτη τεχνολογία αισθητήρων και συγκρίνοντας βιβλιογραφικά τους διάφορους τύπους αισθητήρων αερίου που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Επίσης γίνεται λόγος για την διαδικασία διαβάθμισης των αισθητήρων: οξυγόνου ( $O_2$ ), Διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ), και μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Κατά τα αποτελέσματα οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες CO δεικνύουν γραμμικότητα σε σχέση με το εύρος των υπό εξέταση συγκεντρώσεων (0-20ppm). Η συγκεκριμένη έρευνα παρουσιάζει βαθιά γνώση στην επιλογή αισθητήρων καθώς και της διαβάθμισης αυτών σε σχέση με την ιδιαιτερότητα της κάθε περιοχής. Με αυτόν τον τρόπο ανοίγει ο δρόμος για την ανάπτυξη και εφαρμογή WSN συστημάτων παρακολούθησης της μόλυνσης του περιβάλλοντος (αέρια).

### 2.1.2.3. Ανίχνευση μικρομετατοπίσεων

Σημαντικό και παράλληλα σε αρχική φάση είναι το πεδίο έρευνας σε θέματα μικρομετατοπίσεων και σεισμικής δραστηριότητας. Σε μια περιπτώσιολογική μελέτη [20], ένα δίκτυο ασυρμάτων αισθητήρων παρακολουθεί την σεισμική δραστηριότητα και στέλνει πληροφορίες σχετικά με αυτήν σε άλλους κόμβους μέσω σύνδεσης 2,4 GHz RF. Στη συνέχεια υπολογίζεται το επίκεντρο της δραστηριότητας με τη βοήθεια του 32-bit επεξεργαστή που βρίσκεται ενσωματωμένος στον κόμβο και ο οποίος καλείται να επιλύσει ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων σχετικών με τον αλγόριθμο τριγωνοποίησης. Κάθε κόμβος τροφοδοτείται από έναν τύπο επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Η υλοποίηση του εν λόγω συστήματος πραγματοποιείται σε SystemC και SystemC-AMS, παρέχοντας τη δυνατότητα να δει κανείς εκ των έσω τον τρόπο με τον οποίο όλοι οι κλάδοι περιπλέκονται όμορφα με το βέλτιστο μοντέλο υπολογισμού το οποίο συνδέεται με κάθε κομμάτι υλικού του εξομοιούμενου συστήματος. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται και σημαντική μείωση του χρόνου εξομοίωσης, διατηρώντας παράλληλα την ακρίβεια σε άριστα επίπεδα. Σε γενικές γραμμές η μελέτη αυτή επικυρώνει και βελτιστοποιεί την χρήση πλαισίου ανάπτυξης λογισμικού ανοιχτού κώδικα στα ετερογενή συστήματα.

Αρκετή έρευνα σχετικά με τους σεισμούς έχει διενεργηθεί και στα ορυχεία της Ζάμπια, καθώς η σεισμική δραστηριότητα αποτελεί τον σημαντικότερο κίνδυνο στα ορυχεία. Συνεπώς η παρακολούθηση σεισμικών γεγονότων αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα όχι μόνο για τους εργάτες που βρίσκονται στα ορυχεία αλλά και για τις ανθρώπινες κοινότητες που ζουν στην γύρω περιοχή. Συγκεκριμένη μελέτη έχει γίνει και για ένα από τα μεγαλύτερα ορυχεία χαλκού της Ζάμπια, το επονομαζόμενο «Mufulira» [21]. Η μελέτη ξεκίνησε με παρατηρήσεις, συνεντεύξεις και συστηματικές διερευνήσεις. Η έρευνα κατέδειξε μερικούς σημαντικούς παράγοντες σεισμικής δραστηριότητας στο ορυχείο και προτείνει την χρήση Ασυρμάτων Υπογείων Δικτύων Αισθητήρων (Wireless Underground Sensor Networks – WUSNs) για την παρακολούθηση της σεισμικής δραστηριότητας στα υπόγεια ορυχεία. Τα WSNs ανιχνεύουν το περιβάλλον, επεξεργάζονται και αποστέλλουν δεδομένα και δεν επιβαρύνουν σε επίπεδο καλωδίωσης τον χώρο που έτσι κι αλλιώς αποτελεί ένα δύσκολο και αφιλόξενο περιβάλλον.

Δεδομένου ότι οι σεισμοί και οι μικρομετατοπίσεις έχουν άμεση σχέση και με την δραστηριότητα των ηφαιστειών, τα WSNs βρίσκουν εφαρμογή και στην παρακολούθησή τους.

#### 2.1.2.4. Ανίχνευση Ραδιενέργειας

Πλείστες είναι και οι εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων σε βιομηχανικές περιοχές καθώς οι έννοιες της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της αυτονομίας είναι απολύτως απαραίτητες σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Πολύ επίκαιρο ζήτημα αποτελούν και οι εφαρμογές ανίχνευσης ραδιενέργειας καθώς δεν είναι λίγη η καταστροφή που έχει προκληθεί από πρόσφατα πυρηνικά ατυχήματα με ανυπολόγιστες συνέπειες. Κατά συνέπεια έχει γίνει εκτενής έρευνα σε αυτό το πεδίο και ιδιαίτερα σε μονάδες παραγωγής ενέργειας από πυρηνική ενέργεια.

Σε μια σημαντική έρευνα, αναπτύχθηκε δίκτυο WSN με στόχο την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών γύρω από και μέσα σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο [22]. Οι πλακέτες των κόμβων εξοπλίστηκαν με αισθητήρες ανίχνευσης ραδιενέργειας και τοποθετήθηκαν σε καθορισμένες θέσεις σε όλο το εργοστάσιο. Επιπροσθέτως, το προσωπικό της μονάδας εξοπλίστηκε με φορητές συσκευές μεγαλύτερων δυνατοτήτων, όπως PDA, οι οποίες κι εκείνες με την σειρά τους μπορούσαν να ανιχνεύσουν συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και ραδιενέργεια. Το σύστημα που αναπτύχθηκε επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των PDAs δημιουργώντας έτσι ένα MANET, (Mobile Ad-hoc Wireless Network). Με τον τρόπο αυτό το προσωπικό της μονάδας μπορεί να παρακολουθεί απομακρυσμένα τις συνθήκες των εγκαταστάσεων του εργοστασίου. Μια τέτοια εφαρμογή κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση ατυχήματος ώστε το γεγονός να ανιχνευθεί έγκαιρα και να αποφευχθούν περαιτέρω κίνδυνοι. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να προσφέρει κάλυψη και σε περιόδους κατά τις οποίες το προσωπικό του σταθμού βρίσκεται σε στάση εργασίας, καθώς η εποπτεία των περιβαλλοντικών συνθηκών γίνεται απομακρυσμένα.

Μια άλλη ερευνητική ομάδα, παρουσίασε ένα σύστημα ανίχνευσης ραδιενέργειας [23], χρησιμοποιώντας το ασύρματο πρωτόκολλο SimpliCI, με στόχο την αντιμετώπιση ενός αριθμού προβλημάτων όπως των μεγάλων παρεμβολών στο σήμα, της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και της καθυστέρησης στην δημιουργία δικτύου του συστήματος. Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι το εν λόγω σύστημα ανίχνευσης μπορούσε να συλλέξει σταθερά ραδιενεργές συγκεντρώσεις και να στείλει τις τιμές με ακρίβεια σε έναν κεντρικό υπολογιστή μέσω ενός τροποποιημένου ασυρμάτου πρωτοκόλλου. Επιπροσθέτως το εν λόγω πρωτόκολλο μικραίνει κατά τέσσερις (4) φορές την συχνότητα αλλαγής καναλιού σε σχέση με τον μέσο όρο.

Τέλος, μια άλλη εφαρμογή περιλαμβάνει ένα κινητό ρομπότ το οποίο αναπτύσσει WSN με στόχο την ανίχνευση διαρροής ραδιενέργειας και την μέτρηση των επιπέδων ραδιενέργειας [24]. Γίνεται αναφορά επίσης και στους προβληματισμούς σχετικά με τον σχεδιασμό ώστε να επιμηκυνθεί η διάρκεια λειτουργίας του δικτύου. Προσοχή δίδεται στους παράγοντες οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση ραδιενεργών οπών. Κύρια συνεισφορά της έρευνας αυτής εντοπίζεται στις στρατηγικές ανάπτυξης ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων από ένα κινούμενο ρομπότ και στις τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας με στόχο την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

### 2.1.2.5. Φυσικές καταστροφές

Εκτεταμένη έρευνα έχει γίνει και στον τομέα της πρόληψης και ανίχνευσης πυρκαγιών με τη χρήση ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων.

Μια πρωτοποριακή μελέτη εκπονήθηκε στο σχετικά άμεσο παρελθόν με αποτέλεσμα το σύστημα FireWxNet [25], πολλαπλών διαζωμάτων το οποίο έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί τις καιρικές συνθήκες σε δασικό περιβάλλον αλλά και να ανιχνεύει πυρκαγιές σε ένα μεγάλο εύρος τοποθεσιών και υψωμάτων. Το σύστημα επίσης περιλαμβάνει κατευθυντικές κεραιές, τρία ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και δύο κάμερες (webcams). Οι κατευθυντικές κεραιές βοηθούν στην υλοποίηση του συστήματος σε περιοχές δυσπρόσιτες και παρθένες που βρίσκονται μακριά από τις ευρύτερες υποδομές του. Τα τρία δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούν multihop δρομολόγηση και συλλέγουν περιβαλλοντικά δεδομένα. Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε το 2005 στις φωτιές στην περιοχή Selway-Salmon Complex.

Ωστόσο, το εν λόγω σύστημα χρησιμοποιεί εξοπλισμό που σε φυσικά μεγέθη παρουσιάζει μεγάλο όγκο, παρόλο που για την λειτουργία του χρησιμοποιούνται ηλεκτρικοί συλλέκτες. Δεν φαίνεται να ισχύει το ίδιο για τις web κάμερες. Ο όγκος και η πολυπλοκότητα του συστήματος είναι απαγορευτικά για εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα, καθώς ο προτεινόμενος εξοπλισμός θα παρουσιάζει υψηλό κόστος και παράλληλα υπάρχουν και οι περιορισμοί όσο αφορά το θέμα της ενέργειας. Επιπροσθέτως το Multihop routing που χρησιμοποιείται στους αισθητήρες, δεν αποτελεί επιθυμητό παράγοντα ιδιαίτερα σε υλοποιήσεις μεγάλης κλίμακας καθώς αποτελεί σημείο κατάρρευσης του δικτύου. Τέλος οι κάμερες δεν αποτελούν τον καλύτερο σύμβουλο για το ακριβές σημείο που η φωτιά βρίσκεται σε εξέλιξη. Επίσης το κόστος τους είναι υψηλό και παρουσιάζουν υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια.

Μια άλλη ερευνητική ομάδα πρότεινε ένα σύστημα που δεν στηρίζεται σε κάμερες, αισθητήρες υπερύθρων και δορυφορικά συστήματα, καθώς αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να δώσει λύση στην εποπτεία του δάσους σε πραγματικό χρόνο και για αυτοματοποιημένα σήματα συναγερμού. Η ανάπτυξη του FFSS (Forest-Fires Surveillance System) συστήματος [26] της εν λόγω ομάδας έρχεται να δώσει απάντηση στα παραπάνω, καθώς χρησιμοποιεί ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για συλλογή τιμών θερμοκρασίας, υγρασίας και δυνατότητα ανίχνευσης καπνού. Το σύστημα αποτελείται επίσης από ένα middleware και μια εφαρμογή web, όπου σε αυτά αναλύονται τα δεδομένα και παράγονται δείκτες επικινδυνότητας. Επιπροσθέτως οι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύουν την υπερβάλλουσα ζέση και να σταλεί έτσι σήμα συναγερμού για πιθανή εκδήλωση πυρκαγιάς.

Σε αυτήν την κατεύθυνση στράφηκαν στη συνέχεια και άλλες έρευνες. Σε μία από αυτές παρουσιάζεται η συλλογή μετρήσεων από τους αισθητήρες με σκοπό την έγκαιρη ανίχνευση πυρκαγιάς, αλλά και η επεξεργασία των δεδομένων αυτών πραγματοποιείται από νευρωνικό δίκτυο με σκοπό την παραγωγή δεικτών και τάσεων [27].

Επιπροσθέτως, έχουν προταθεί και παρουσιαστεί ολοκληρωμένα συστήματα παρακολούθησης δασικών περιοχών με WSNs, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τις μετρήσεις θερμοκρασίας, εκτιμούν τους πιθανούς κινδύνους και λειτουργούν και ως σύστημα υποστήριξης αποφάσεων DSS [28]. για



έκτακτες καταστάσεις. Το δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ανεξάρτητους κόμβους ελέγχου και υποστηρίζει δυναμική επαναδρομολόγηση έτσι ώστε να διατηρηθεί η επικοινωνία με τον κεντρικό εξυπηρετητή. Το πιλοτικό σύστημα εγκαταστάθηκε στην Νέα Πεντέλη [29].

## 2.2. Απαιτήσεις Αξιολόγησης Καταλληλότητας

Όπως προκύπτει, από την ανάλυση του προβλήματος, αρκετές ιδιαιτερότητες αυτού τυγχάνουν να είναι συνέπειες και της εκάστοτε τοπολογίας. Χαρακτηριστικά δικτύου όπως το **κόστος υλοποίησης**, η **ταχύτητα** και η **αξιοπιστία / εφεδρεία (redundancy)** είναι συναρτήσεις της επιλεγμένης φυσικής και λογικής τοπολογίας. Στην ανάλυση των τοπολογιών που έπεται, θα επιχειρηθεί η αξιολόγησή τους ως προς αυτά τα χαρακτηριστικά. Το κόστος θα πρέπει να εξεταστεί ως συνάρτηση δύο παραγόντων: πρώτον της μεγάλης κλίμακας εφαρμογής του δικτύου αισθητήρων διότι υπάρχει αναλογικότητα μεταξύ αυτής και της συνολικής δαπάνης της εφαρμογής και δεύτερον σε σχέση με την αξιοπιστία. Η έννοια της αξιοπιστίας – εφεδρείας είναι μεγίστης σημασίας σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, καθώς δεν επιτρέπεται ένα μεγάλο και ακριβό δίκτυο να καταρρέει εύκολα (π.χ. με την βλάβη ενός αισθητήρα ή δρομολογητή), έχοντας ως αποτέλεσμα τον καθυστερημένο εντοπισμό συμβάντων κινδύνου.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση μας στα περιστατικά εκδήλωσης πυρκαγιάς, η έγκαιρη προειδοποίηση για το συμβάν είναι καταλυτικής σημασίας για την εξέλιξη των γεγονότων και της αποφυγής μιας πιθανής φυσικής καταστροφής. Επιπροσθέτως, η ζητούμενη λύση είναι μια λύση λογικού κόστους και υψηλής αξιοπιστίας, δεδομένου ότι καθίσταται εφικτή η δημιουργία ενός δικτύου με αρκετά και αναγκαία σημεία εφεδρείας. Η προσθήκη περισσότερων σημείων εφεδρείας, αυξάνουν πολύ το κόστος όχι όμως ανάλογα και την τελική ζητούμενη αξιοπιστία, καθότι μια λύση "πλήρους αξιοπιστίας" συγκλίνει στην ταύτιση του κάθε αισθητήρα με έναν gateway, λύση κοστολογικά απαράδεκτη. Όσο αφορά την ταχύτητα αναδιοργάνωσης του δικτύου σε περίπτωση που τέτοια λειτουργία προβλέπεται, θα πρέπει κανείς να την συγκρίνει με την ταχύτητα εξέλιξης του εκάστοτε φυσικού φαινομένου (π.χ. της φωτιάς), έτσι ώστε η αναδιοργάνωση να συμβαίνει με τρόπο που να διατηρεί την απόκριση του δικτύου ώστε αυτό να παραμένει σε λειτουργία σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, οι οποίες άλλωστε αποτελούν και τις συνθήκες υπό τις οποίες πρέπει να λειτουργεί το δίκτυο.

Δύο άλλα χαρακτηριστικά μεγάλης σημασίας για την εφαρμογή τα οποία αλληλεπιδρούν και μεταξύ τους είναι η ηλεκτρική κατανάλωση και το φορτίο των κόμβων και ιδιαίτερα των λεγόμενων «κρίσιμων» κόμβων που χαρακτηρίζονται έτσι λόγω της θέσης ή της ιδιότητάς τους. Οι αισθητήρες είναι ενεργοί κατά τη διάρκεια αποστολής του σήματος και μετά περιέρχονται περιοδικά σε ανενεργή κατάσταση για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτή η ιδιότητα βοηθά στην εξοικονόμηση ενέργειας καθώς η μετάδοση σήματος στις ραδιοσυχνότητες RF καταναλώνει αρκετούς πόρους. Επίσης, οι αισθητήρες εκείνοι που εκτελούν και πρόσθετα καθήκοντα δρομολογητή μεταδίδοντας δεδομένα των γειτόνων τους, παρουσιάζουν αύξηση του φόρτου τους, με συνέπεια να δαπανούν πολλαπλάσια ενέργεια από αυτούς που μόνο εκπέμπουν και δεν δρομολογούν. Βέβαια το αν ο αισθητήρας θα είναι παράλληλα και δρομολογητής, είναι κάτι επιλέξιμο από τον μηχανικό κατά την σχεδίαση του δικτύου.

Στη συνέχεια, κάθε τοπολογία θα εξεταστεί και υπό το πρίσμα της **χρησιμότητας** και της **πολυπλοκότητας**. Συγκεκριμένα, όσο πιο περίπλοκη σε πλήθος κόμβων και είδος δρομολόγησης είναι μια τοπολογία τόσο πιο πολύπλοκη λειτουργία έχει, ή αλλιώς τόσο περισσότερο αυξάνεται η πολυπλοκότητά της. Σε περιπτώσεις με μεγάλη πολυπλοκότητα συστήματος δικτύου-τοπολογίας, η χρησιμότητα, δηλαδή η ευκολία χρήσης του δικτύου, μειώνεται δραματικά με συνέπεια να υπονομεύεται και ο λόγος εγκατάστασης και ύπαρξης αυτού. Στην παρακάτω εικόνα 5, συνοψίζονται όλες οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη δημιουργία ενός δικτύου ασυρμάτων αισθητήρων.

- Κόστος
- Αξιοπιστία - Εφεδρεία (Redundancy)
- Διάρκεια Ζωής Μπαταρίας (Ενέργεια)
- Ταχύτητα Μετάδοσης Δεδομένων / Ταχύτητα Φωτιάς
- Χρησιμότητα – Πολυπλοκότητα
- Φορτίο (Metrics - Traffic)

Εικόνα 5: Παράμετροι Αξιολόγησης Τοπολογιών WSNs

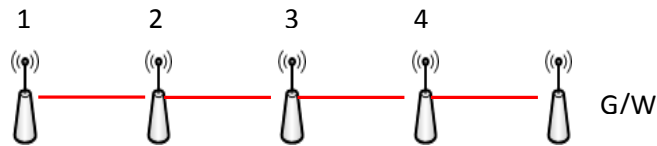
Συνεπώς, το "ιδανικό" για την εφαρμογή μας δίκτυο ασυρμάτων αισθητήρων θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο λιτό και πρακτικό, να παρέχει την δυνατότερη υψηλή εφεδρεία και ανοχή σε αστοχίες σε σχέση με το κόστος, να είναι γρήγορο ως προς την απόκριση και να παρουσιάζει χαμηλή κατανάλωση. Η οικονομική δαπάνη θα πρέπει να συγκρατείται σε λογικά επίπεδα για όσο το δυνατόν περισσότερα χαρακτηριστικά από τα παραπάνω. Τέλος, εξυπακούεται πως η χωρική φυσική τοπολογία δικτύου θα πρέπει να εξασφαλίζει και την **επικοινωνία** μεταξύ των κόμβων, αλλά το ζήτημα αυτό αναλύεται στην πορεία της διατριβής καθώς δεν συνιστά ένα αμιγώς εξαρτώμενο ζήτημα από την τοπολογία.

## 2.3. Τοπολογίες

Στη συνέχεια εξετάζεται ένα σύνολο χαρακτηριστικών τοπολογιών με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια. Επίσης, προτείνεται μια εφικτή τοπολογία δικτύου η οποία ταιριάζει στο ιδιαίτερο περιβάλλον του δάσους και παράλληλα πληροί τα κριτήρια αξιολόγησης. Αμέσως μετά αναλύεται και η βελτιστοποίηση αυτής.

### 2.3.1. Τοπολογία Αρτηρίας – Bus

Στην εν λόγω τοπολογία (εικόνα 6), οι αισθητήρες συνδέονται σειριακά ο ένας μετά τον άλλον μέσω RF σύνδεσης και μεταδίδουν στους διπλανούς τους τα δεδομένα τους [30]. Η μετάδοση καθορίζεται να γίνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά. Ο τελευταίος στην ακολουθία των αισθητήρων είναι ο δρομολογητής ή GateWay. Θεωρητικά φαίνεται ότι με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να καλυφθεί αρκετός χώρος τοποθετώντας έναν αισθητήρα ανά ικανή απόσταση (π.χ. 40m).



Εικόνα 6: Παράδειγμα τοπολογίας αρτηρίας με WSN

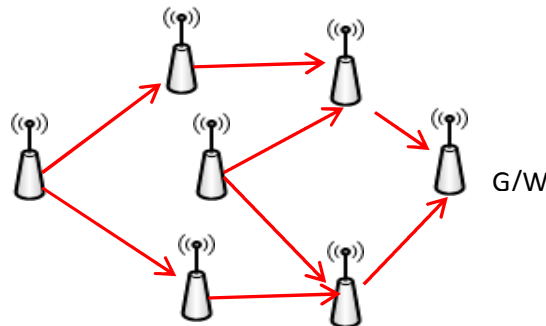
Ωστόσο, ένα σημαντικό σημείο αδυναμίας είναι ακριβώς το γεγονός ότι τα δεδομένα όλων πρέπει να περάσουν σειριακά από τους κόμβους μέχρι να φτάσουν στον G/W. Συνεπώς, αν παρουσιαστεί βλάβη σε κάποιον αισθητήρα ή αν για κάποιον λόγο επηρεαστεί η αναμενόμενη συνδεσιμότητα από τον έναν αισθητήρα στον άλλον, τότε το δίκτυο καταρρέει καθώς τα δεδομένα δεν θα μπορέσουν ποτέ να φτάσουν στην πύλη. Είναι δυνατόν να περάσουν τα δεδομένα μόνο των αισθητήρων που βρίσκονται ανάμεσα στο σημείο κατάρρευσης και στην πύλη. Επιπρόσθετα, ο κόμβος 4 που είναι ο τελευταίος κόμβος πριν τον δρομολογητή, παρουσιάζει αυξημένο φόρτο δεδομένων και συγκεκριμένα τετραπλάσιο, λόγω του ότι δρομολογεί την πληροφορία όλων των προηγούμενων από αυτόν κόμβων. Μάλιστα αυτό έχει και σαν αποτέλεσμα να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια. Επίσης η ταχύτητα αποστολής των δεδομένων του πρώτου κόμβου θα είναι πολλαπλάσια αυτής του τελευταίου που βρίσκεται πριν από τον δρομολογητή και στην καλύτερη περίπτωση τετραπλάσια αν δεν υπολογίσουμε και πιθανές άλλες αιτίες καθυστέρησης διάδοσης (propagation delay). Η σειριακή αυτή θεώρηση των πραγμάτων αποτελεί και το μειονέκτημα της τοπολογίας που με λίγα λόγια συνοψίζεται στην έλλειψη αξιοπιστίας και εφεδρείας (redundancy), στην χαμηλή ταχύτητα και χρηστικότητα, με παράλληλη αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και υψηλό φορτίο δεδομένων στον τελευταίο κόμβο. Κατά συνέπεια η **multihop δρομολόγηση**, όπως αναλύεται στη συνέχεια του κεφαλαίου, δεν ενδείκνυται για την εγκατάσταση WSNs σε κρίσιμες υποδομές. Γίνεται κατανοητό πως το ευρύτερο ζήτημα της αξιοπιστίας/εφεδρείας αφορά περισσότερο τα μειονεκτήματα της σειριακής τοποθέτησης αισθητήρων παρά την εφεδρεία του δρομολογητή, η οποία επιτυγχάνεται εύκολα με την προσθήκη μιας ακόμη συσκευής στο αριστερό άκρο της αρτηρίας και αποστολή των δεδομένων των αισθητήρων και προς τις δύο κατευθύνσεις. Εδώ παρόλο που η τοπολογία θα μπορούσε να θεωρηθεί λιτή ως προς το σχήμα της, δεν είναι, καθώς ο τρόπος παράταξης των αισθητήρων στην σειρά και η λειτουργία του δικτύου καθιστούν αυξημένη την πολυπλοκότητα της λειτουργίας του (π.χ. η λειτουργία του τελευταίου κρίσιμου κόμβου, ο φόρτος του και τα σενάρια κατάρρευσής του).

Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως το κόστος μιας τέτοιας τοπολογίας ενδέχεται να είναι αποδεκτό, αφού απαιτεί σχετικά μικρό αριθμό δρομολογητών (π.χ. ένας δρομολογητής σε κάθε οριζόντιο τμήμα δικτύου). Ωστόσο, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται εδώ, έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν και να αναμεταδίδουν τις πληροφορίες των γειτονικών τους κόμβων και να παίζουν κατά κάποιον τρόπο τον ρόλο ενός τοπικού δρομολογητή προς το gateway, γεγονός που δεν τους κατατάσσει στους πλέον φθηνούς της αγοράς και το κόστος αγοράς τους είναι υπολογίσιμο.

### 2.3.2. Τοπολογία Δακτυλίου – Ring

Η τοπολογία δακτυλίου (εικόνα 7), στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν αποτελεί σχεδιαστικά έναν δακτύλιο όπως θα περίμενε κανείς, αλλά παρουσιάζει σχήματα τα οποία στην πλειονότητά τους είναι ρομβοειδή καθώς ο δακτύλιος δημιουργείται από 2 δίκτυα αρτηρίας τα οποία ενώνονται στις άκρες τους [30].

Αξίζει να σημειωθεί πως η απλή τοπολογία δακτυλίου με ασύρματους αισθητήρες παρουσιάζει ικανοποιητικό βαθμό εφεδρείας. Σε σχέση με την αντίστοιχη τοπολογία στα ενσύρματα δίκτυα προσεγγίζει την αξιοπιστία του FDDI. Αυτό συμβαίνει διότι οι αισθητήρες εκπέμπουν το σήμα τους σε μία ακτίνα  $R$  συνεπώς σε περίπτωση έλλειψης συνδεσιμότητας από τον ένα γειτονικό αισθητήρα, το σήμα μπορεί να μεταδοθεί από τον άλλο, με συνέπεια να φτάσει τελικά στην προεπιλεγμένη πύλη. Η κατάρρευση του δικτύου σημειώνεται όταν έχουμε τουλάχιστον **διπλό σημείο κατάρρευσης**, είτε από βλάβη αισθητήρα είτε από επίκτητη αδυναμία συνδεσιμότητας. Αυτή βέβαια η δυνατότητα των αισθητήρων να μπορούν να λάβουν το σήμα και να το μεταδώσουν στον διπλανό τους παραπέμπει ως γνωστόν σε συγκεκριμένα μοντέλα αισθητήρων που ανεβάζουν το κόστος αλλά και την πολυπλοκότητα του συστήματος σε προγραμματιστικό και λειτουργικό επίπεδο. Αναφορικά με την εφεδρεία του δρομολογητή, μπορούμε να προσθέσουμε έναν ακόμη στον κατοπτρικό αντίποδα του ήδη τοποθετηθέντα. Οποιαδήποτε άλλη προσθήκη πύλης κρίνεται υπερβολική, ακριβή και ανούσια για την εν λόγω τοπολογία και το μέγεθός της όπως δεικνύεται στην εικόνα 7.



Εικόνα 7: Παράδειγμα τοπολογίας δακτυλίου με WSN

Η ταχύτητα του εν λόγω δικτύου είναι ανάλογη των χρησιμοποιούμενων ενδιάμεσων κόμβων, όπως ακριβώς και στην τοπολογία αρτηρίας, παρουσιάζοντας τα γνωστά μειονεκτήματα της διάδοσης του σήματος από τον τελευταίο στον πρώτο κόμβο που εκτελεί και τα χρέη δρομολογητή. Σε κάθε περίπτωση, μια τέτοια τοπολογία δεν είναι πρακτική για τις ανάγκες της εφαρμογής μας για δύο σημαντικούς λόγους. Αφενός στην εσωτερική πλευρά του δικτύου παραμένει αρκετή επιφάνεια χωρίς την ύπαρξη αισθητήρα πράγμα που σημαίνει πως κάποιο περιστατικό πυρκαγιάς στο εσωτερικό θα γίνει αντιληπτό σε μεταγενέστερο χρόνο και μόνο όταν η φωτιά φτάσει σε κάποιον αισθητήρα του δακτυλίου. Αφετέρου, διότι οι αισθητήρες που βρίσκονται πιο κοντά στην πύλη, όπως ακριβώς και στην τοπολογία δακτυλίου, θεωρούνται πιο κρίσιμοι από τους υπολοίπους καθώς είναι εκείνοι που μεταδίδουν τα δεδομένα των υπολοίπων καταναλώνοντας παράλληλα και περισσότερη ενέργεια.

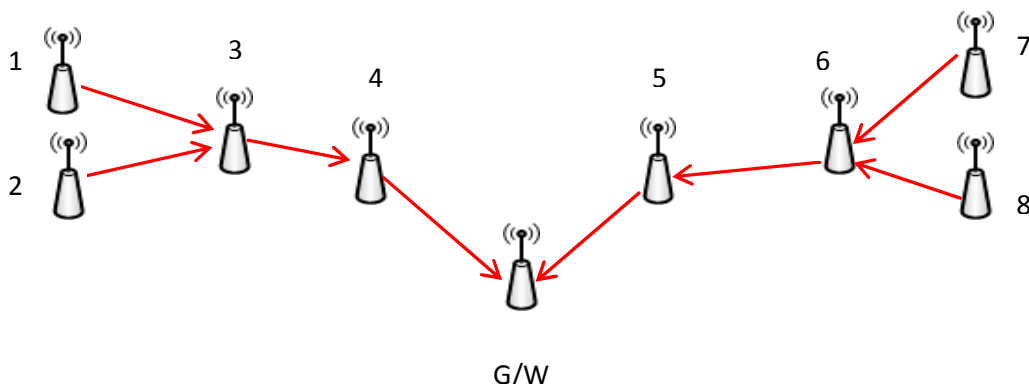
Η κατανάλωση ενέργειας θεωρείται ιδιαίτερης σημασίας και κρίσιμότητας για την εφαρμογή μας. Όσο αφορά θέματα εφεδρείας και αξιοπιστίας, είναι σαφές πως η τοπολογία δακτυλίου υπερτερεί της

αντίστοιχης της αρτηρίας, όμως και πάλι οι κρίσιμοι κόμβοι αποτελούν βασικά σημεία κατάρρευσης του συστήματος. Σχετικά με το κόστος μιας τέτοιας τοπολογίας, αυτό εκτιμάται στο διπλάσιο περίπου της τοπολογίας αρτηρίας. Η πολυπλοκότητα του συστήματος θα μπορούσε να θεωρηθεί μετρίου βαθμού, παρόλο που σαν δίκτυο μειονεκτεί σημαντικά στο εσωτερικό του δακτυλίου στον εντοπισμό πιθανών περιστατικών. Κατά συνέπεια ο κατ' αρχήν καλός βαθμός χρησιμότητας του δικτύου, μετριάζεται από το γεγονός της ανεπάρκειας στο εσωτερικό του δακτυλίου, καθιστώντας έτσι την φαινομενικά εύκολη χρήση του ως μη αποτελεσματική.

### 2.3.3. Τοπολογία Multihop / Multihop Routing

Η τοπολογία πολλαπλών σημείων/κόμβων (εικόνα 8) παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με αυτήν της τοπολογίας δακτυλίου. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο σχήμα οι αισθητήρες δεν ενώνονται όλοι μεταξύ τους, αλλά 2 τμήματα αυτών στέλνουν τα δεδομένα τους σε έναν κεντρικό δρομολογητή.

Το κόστος μιας τέτοιας τοπολογίας δεν διαφέρει από αυτό μιας τοπολογίας δακτυλίου με αντίστοιχο πλήθος αισθητήρων. Ωστόσο και εδώ παρατηρούνται οι αδυναμίες των κρίσιμων κόμβων, με χαρακτηριστικά την συσσώρευση δεδομένων και την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Δεδομένου επίσης ότι και σ' αυτήν την περίπτωση το δίκτυο αποτελείται από τουλάχιστον 2 σειριακά τμήματα, τίθεται και πάλι το γνωστό θέμα της ανοχής σε βλάβες και τις εφεδρείας (redundancy).



Εικόνα 8: Παράδειγμα τοπολογίας πολλαπλών σημείων με WSN

Κάθε σημείο έλλειψης συνδεσιμότητας αλλά και βλάβης κάποιου αισθητήρα αποτελεί αυτομάτως και **σημείο κατάρρευσης** του δικτύου. Επιπρόσθετα, μια πιθανή βλάβη ενός εκ των κρίσιμων κόμβων, οδηγεί σε πλήρη κατάρρευση του δικτύου.

Η ταχύτητα του παραπάνω δικτύου είναι σχετική καθώς κι εδώ η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων ενός κόμβου εξαρτάται από την θέση του σε σχέση με τον δρομολογητή. Για παράδειγμα, το σήμα συναγερμού που θα στείλει ο κόμβος 1 με προορισμό τον δρομολογητή θα αργήσει 3 φορές περισσότερο από το σήμα που θα έστειλε σε αντίστοιχη περίπτωση ο κόμβος 3 ή 4 που βρίσκονται δίπλα σε αυτόν.

Το σημαντικότερο, όμως, μειονέκτημα είναι η ανάγκη αναδιοργάνωσης ενός τέτοιου δικτύου σε περίπτωση που ένας κόμβος καταστραφεί από το υπό εποπτεία φυσικό φαινόμενο. Στην περίπτωση αυτή, ξεκινά μια διαδικασία η οποία θεωρεί κατά την έναρξη ότι οι υπόλοιποι κόμβοι είναι διαθέσιμοι και επιλέξιμοι. Ωστόσο, με δεδομένη την υψηλή χωρική πυκνότητα του δικτύου και την ταχύτητα

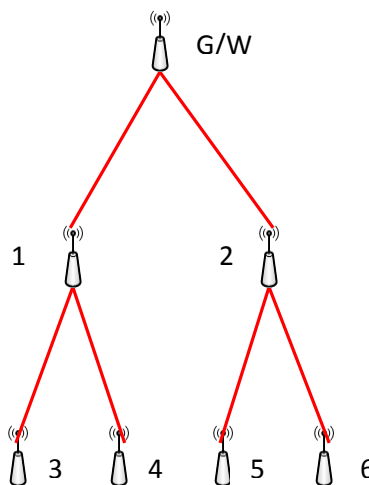
εξάπλωσης του φαινομένου, κάποιοι κόμβοι ενδέχεται να καταστραφούν προτού ολοκληρωθεί η αναδιοργάνωση, γεγονός που οδηγεί την όλη διαδικασία σε αδιέξοδο.

Συνδυάζοντας το γεγονός αυτό με το υψηλό κόστος (διότι κάθε αισθητήρας διαθέτει δυνατότητα λήψης και αναπαραγωγής σήματος από τους γειτονικούς του) καθώς και με τις ενεργειακές απαιτήσεις που οδηγούν σε βραχεία διάρκεια ζωής της μπαταρίας του, διαπιστώνουμε ότι παρά την τεχνολογική ελκυστικότητά της που σε άλλες εφαρμογές αποτελεί σημαντικό λόγο επιλογής, στην οικογένεια εφαρμογών που εξετάζουμε κάτι τέτοιο δεν ισχύει.

### 2.3.4. Τοπολογία Δέντρου / Tree

Στην εν λόγω τοπολογία παρατάσσονται οι αισθητήρες σε δενδροειδή μορφή (εικόνα 9), δηλαδή στο τελευταίο επίπεδο έχουμε τους κόμβους που αποτελούν τα φύλλα του δένδρου και ανεβαίνοντας φτάνουμε στη ρίζα που αποτελείται από ένα και μοναδικό κόμβο, τον δρομολογητή [31].

Το κόστος της τοπολογίας είναι ανάλογο των αισθητήρων που θα χρησιμοποιήσουμε και των κλάδων που θα έχει το δέντρο. Για παράδειγμα το κόστος του δικτύου του σχήματος 4 υπολογίζεται σε περίπου τριπλάσιο αυτού της τοπολογίας αρτηρίας με 3 κόμβους. Και σε αυτήν την περίπτωση ο δρομολογητής είναι μοναδικός, οπότε το κόστος συγκρατείται σχετικά. Η ταχύτητα του δικτύου εμφανίζει τα γνωστά χαρακτηριστικά του multihop routing με τις αναμενόμενες υπολογίσιμες χρονικές καθυστερήσεις του σήματος από τους κόμβους των φύλλων στον δρομολογητή.



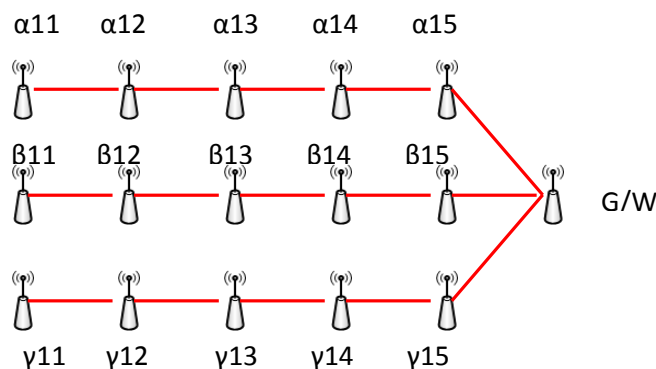
Εικόνα 9: Παράδειγμα δενδροειδούς τοπολογίας με WSN

Από το σχήμα γίνεται και πάλι εμφανές το πρόβλημα με τους κρίσιμους κόμβους και τα επακόλουθα προβλήματα σχετικά με την κατανάλωση, το φόρτο και τις εφεδρείες. Στο παράδειγμα, ως τέτοιοι κρίσιμοι κόμβοι θεωρούνται ο 1 και 2, παρουσιάζουν τριπλάσιο φόρτο δεδομένων απ' ότι αν λειτουργούσαν μόνοι τους και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από τους άλλους. Παράλληλα, κάθε κρίσιμος κόμβος αποτελεί και σημείο κατάρρευσης του δικτύου ή τουλάχιστον του δικτύου κατά το ήμισυ καθώς δεν συντρέχουν συνθήκες εφεδρείας.

Η πολυπλοκότητα μιας τέτοιας τοπολογίας θεωρείται αυξημένη καθώς ο μηχανικός δικτύου θα πρέπει να επιλύσει πολλαπλά προβλήματα αποστάσεων και συνδεσιμότητας και πάντα οι κρίσιμοι κόμβοι επιβαρύνουν και αποτελούν και αυτοί μέρος της περίπλοκης λειτουργίας του δικτύου. Η χρηστικότητα παραμένει αντιστρόφως ανάλογη της πολυπλοκότητας και στην περίπτωση μας χαρακτηρίζεται ως χαμηλή, διότι η λειτουργία του δικτύου είναι αρκετά περίπλοκη και αφετέρου παρουσιάζονται κι εδώ σημεία επιφάνειας που δεν καλύπτονται ομοιόμορφα, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη πιθανότητα αστοχίας στον εντοπισμό ενός περιστατικού φυσικού κινδύνου.

### 2.3.5. Τοπολογία Πλέγματος / Grid

Στην τοπολογία πλέγματος γραμμών (εικόνα 10), οι αισθητήρες τοποθετούνται οριζοντίως και καθέτως σε περίπου ίσες αποστάσεις δημιουργώντας ένα πλέγμα. Η μετάδοση των δεδομένων γίνεται οριζόντια με κατεύθυνση (στο παράδειγμα του σχήματος) από τα αριστερά προς τα δεξιά. Η εμβέλεια του σήματος είναι ικανή να δρομολογήσει τα δεδομένα στους οριζόντιους διπλανούς αισθητήρες και όχι στους κατακορύφους, γεγονός που απλοποιεί την ανάγκη αναδιοργάνωσης. Στην περίπτωση που τα δεδομένα μπορούσαν να δρομολογηθούν και κατακόρυφα τότε η πολυπλοκότητα του δικτύου θα αύξανε σημαντικά, καθώς όλοι οι αισθητήρες θα έστελναν σε όλους με συνέπειες σε φόρτο δεδομένων σε αυτούς και κατανάλωση ενέργειας στις μπαταρίες τους.



Εικόνα 10: Παράδειγμα τοπολογίας πλέγματος γραμμών με WSN

Ακολουθώντας θα κάνουμε μια συνοπτική αναφορά στο κόστος της συγκεκριμένης τοπολογίας, η οποία μπορεί εύκολα να αναχθεί και στις υπόλοιπες τοπολογίες. Το κόστος της τοπολογίας καθορίζεται από το πλήθος των αισθητήρων και υπολογίζεται αναλόγως των κλάδων που έχει το δίκτυο αν λάβουμε υπόψη ότι ένας κλάδος αποτελεί και ένα δίκτυο αρτηρίας. Και σε αυτήν την περίπτωση ο δρομολογητής είναι ένας. Προσπαθώντας να δώσουμε κάποια μετρικά στον εν λόγω παράδειγμα, θεωρούμε ότι η τοπολογία αναπτύσσεται σε μια δασική περιοχή με πυκνή βλάστηση. Η ακτίνα διάδοσης του σήματος έστω ότι ορίζεται στα 40m για την κατηγορία αυτής της περιοχής.

Συνεπώς, θεωρούμε ότι οριζοντίως η απόσταση από τον α11 έως το gateway (G/W) μέσω των διπλανών και διαδοχικών αισθητήρων της γραμμής α προσεγγίζει τα 200m, με μια μικρή παραδοχή. Το ίδιο ισχύει και για τις γραμμές αισθητήρων β και γ. Δεδομένου όμως ότι δεν υπάρχει επικοινωνία καθέτως μεταξύ των αισθητήρων, θεωρούμε ότι η απόσταση μεταξύ των καθέτων  $\alpha_{ij}$  και  $\beta_{ij}$  καθώς και  $\beta_{ij}$  και  $\gamma_{ij}$  είναι περί τα 50m. Άρα η έκταση που μπορεί να καλύψει μια τέτοια τοπολογία είναι  $200 \text{ m}^*$

100 m = 20.000 m<sup>2</sup>. Δεδομένου ότι η τιμή μονάδας για τους αισθητήρες και τον δρομολογητή είναι δεδομένες, τότε μπορούμε να πούμε ότι το κόστος αυτής της συγκεκριμένης τοπολογίας που καλύπτει τα 20 στρέμματα είναι:  $3 * (5 * S.cost) + R.cost$ , όπου S.cost το κόστος ανά μονάδα αισθητήρα και R.cost το κόστος του δρομολογητή, 3 το πλήθος των τμημάτων segments και 5 οι αισθητήρες ανά segment.

Μπορούμε να πούμε ότι στην γενική θεώρηση της εν λόγω τοπολογίας για την κάλυψη μιας περιοχής εμβαδού  $E(m^2)$ , η οποία αναπτύσσεται ομοιόμορφα σύμφωνα με το σχήμα, ισχύει:

$$E(m^2) = d_1 * m * d_2 * n$$

$$cost = n * (m * S.cost) + N * R.cost,$$

όπου: n, το πλήθος των οριζοντίων τμημάτων – segments της τοπολογίας,

m, το πλήθος των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν

$d_1$ , η οριζόντια απόσταση μεταξύ των αισθητήρων

$d_2$ , η κάθετη απόσταση μεταξύ των αισθητήρων

S.cost, το μοναδιαίο κόστος ανά αισθητήρα

N, το πλήθος των δρομολογητών (δεν μπορεί να υπερβαίνει το 2 στην τοπολογία)

R.cost, το μοναδιαίο κόστος ανά δρομολογητή

Κατά τα άλλα, λόγω της σειριακής θεώρησης της διάταξης και της μετάδοσης των δεδομένων παρουσιάζεται κι εδώ το πρόβλημα της ταχύτητας, με συνέπεια τα δεδομένα των κόμβων α11, β11 και γ11 να φτάνουν αργότερα από αυτά των υπολοίπων κόμβων στον δρομολογητή. Επιπλέον, τίθενται και θέματα κρισίμων κόμβων και κατανάλωσης καθώς οι κόμβοι α15, β15 και γ15 οι οποίοι δέχονται τα δεδομένα όλων των προηγούμενων τους, καταναλώνουν πολύ περισσότερη ενέργεια και αν καταρρεύσουν καταρρέει ένα σημαντικό μέρος του δικτύου. Η τοποθέτηση εφεδρικού δρομολογητή στα αριστερά της διάταξης με την προϋπόθεση ότι οι αισθητήρες εκπέμπουν και προς τις δύο κατευθύνσεις το σήμα τους, ενισχύει την ανοχή σε βλάβες αλλά μόνο όσο αφορά την εφεδρική λειτουργία των δρομολογητών. Η τοπολογία ως διάταξη εξακολουθεί να εμφανίζει τα ζητήματα των κρισίμων κόμβων και της σειριακής μετάδοσης των σημάτων, αν και στην περίπτωση αυτή έχουμε μια λιτή σχετικά διάταξη κόμβων με σαφώς καθορισμένη λειτουργία. Παρόλα αυτά, κι εδώ το θέμα των κρισίμων κόμβων και της κατανάλωσης ενέργειας καθιστούν την τοπολογία μη εφαρμόσιμη σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας.

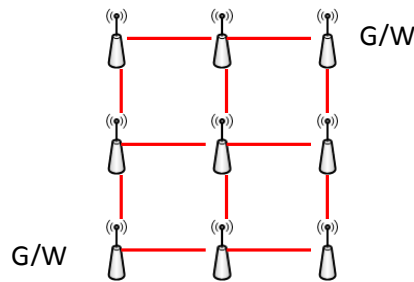
### 2.3.6. Τοπολογία πλέγματος / Mesh

Στην τοπολογία πλέγματος (εικόνα 11) οι αισθητήρες ακολουθούν παράταξη μήτρας και βρίσκονται στις κορυφές ομοίων τετραγώνων. Επικοινωνούν με τους οριζόντιους και κάθετους γείτονές τους και σε καμία περίπτωση με τους διαγώνιους [30], [31]

Σημειώνεται πως και πάλι το κόστος είναι ανάλογο του πλήθους των αισθητήρων που θα χρησιμοποιήσουμε και πάντα σε σχέση με την περιοχή που θέλουμε να καλύψουμε. Το πλήθος



μπορεί να είναι παρόμοιο με αυτό της τοπολογίας πλέγματος γραμμών και σαφώς μεγαλύτερο από αυτό των προηγούμενων τοπολογιών.



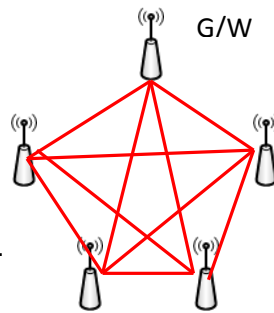
Εικόνα 11: Παράδειγμα τοπολογίας πλέγματος με WSN

Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι εδώ πρέπει να οριστούν τουλάχιστον δύο gateways για να μπορεί να ανταποκριθεί το σύστημα. Δεδομένης της λειτουργίας ότι οι αισθητήρες μπορούν να στείλουν και οριζόντια και κάθετα το σήμα τους δημιουργούνται αρκετοί κρίσιμοι κόμβοι. Στους δρομολογητές θα έρθουν περισσότερες από μια φορά τα δεδομένα των αισθητήρων και μάλιστα θα είναι ακριβώς τα ίδια και στους δύο. Το γεγονός αυτό μας εξασφαλίζει αφενός ένα βαθμό εφεδρείας, διότι αν χαλάσει ένας δρομολογητής ή κάποιος αισθητήρας το δίκτυο συνεχίζει και λειτουργεί κανονικά, ωστόσο αυξάνεται η δικτυακή κίνηση που διακινούν οι κόμβοι και οι δρομολογητές του δικτύου. Τέλος, η κατανάλωση ενέργειας με τόσους κρίσιμους κόμβους είναι απαγορευτική και οδηγεί το δίκτυο σε μικρό χρόνο ζωής. Όσο αφορά την ταχύτητα μετάδοσης του σήματος είναι και αυτή συνάρτηση των ενδιάμεσων κόμβων (hops) που μεσολαβούν από τον αισθητήρα μέχρι την πύλη και οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν είναι λίγοι στην κλίμακα δικτύων στην οποία αναφερόμαστε.

Συνοψίζοντας τα σημαντικά σημεία της τοπολογίας θα μπορούσε κανείς να πει πως ενώ παρέχει ικανοποιητική κάλυψη και αξιοπιστία/εφεδρεία, υστερεί σημαντικά στην κατανάλωση ενέργειας και στην πολυπλοκότητα της λειτουργίας για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές.

### 2.3.7. Τοπολογία Fully Connected

Στην τοπολογία πλέγματος πλήρους σύνδεσης (εικόνα 12), όλοι οι αισθητήρες επικοινωνούν μεταξύ τους καθώς βρίσκεται ο ένας στην εμβέλεια του άλλου [30]. Αυτό ισχύει ασφαλώς για την εκάστοτε δεδομένη εμβέλεια και τελικά ένα δίκτυο μεγάλης κλίμακας οργανώνεται σε κυψέλες. Γίνεται άμεσα κατανοητό πως σε μια τέτοια τοπολογία το ζήτημα της εφεδρείας, τουλάχιστον όσο αφορά την αστοχία κάποιου αισθητήρα, βρίσκει λύση. Σε αυτήν την τοπολογία ο δρομολογητής της κυψέλης είναι ένας. Η προσθήκη εφεδρικού επηρεάζει την τοπολογία και το κόστος, ενώ η τοποθέτησή του ενδέχεται να μην του επιτρέπει να συνδέεται με όλους τους κόμβους. Στην περίπτωση αυτή, χωρίς να έχουμε κρίσιμους κόμβους στο δίκτυο, παρουσιάζεται αυξημένο φορτίο σε όλους τους αισθητήρες δεδομένου ότι όλοι στέλνουν σε όλους και όλοι καταναλώνουν τους πόρους τους σε απαγορευτικά σύντομο διάστημα.



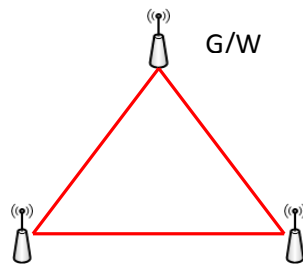
Εικόνα 12: Παράδειγμα τοπολογίας πλήρους σύνδεσης με WSN

Το κόστος ανάπτυξης ενός τέτοιου δικτύου είναι ανάλογο του πλήθους των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. Η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων είναι ικανοποιητική δεδομένου ότι όλοι οι κόμβοι στέλνουν δεδομένα χωρίς μεσάζοντες κατευθείαν στον δρομολογητή. Εδώ πραγματοποιείται ένα σημαντικό βήμα στο θέμα ταχύτητας και εφεδρείας, αλλά δεν είναι ολοκληρωμένο καθώς σημαντικό μειονέκτημα της τοπολογίας αποτελεί το φορτίο σε όλους τους αισθητήρες και η άσκοπη κατανάλωση ενέργειας.

### 2.3.8. Τοπολογία Τριγώνου (υποκατηγορία fully connected)

Η τοπολογία τριγώνου (εικόνα 13), αποτελεί υποκατηγορία αυτής του πλέγματος πλήρους σύνδεσης. Εξετάζεται περαιτέρω μόνη της καθώς μπορεί να υποδείξει κάποια σημαντικά προβλήματα που μπορούν να εντοπιστούν και σε άλλες πιο αξιόπιστες τοπολογίες που έχουν σαν βάση τις τριγωνικές.

Το κόστος υλοποίησης της εξαρτάται από το πλήθος των τριγώνων που θα χρησιμοποιηθούν και από το πλήθος των δρομολογητών. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί ο ίδιος δρομολογητής για τρίγωνα περισσότερα του ενός που έχουν όλα όμως κοινή κορυφή αυτήν που βρίσκεται ο gateway, τότε το κόστος μετριάζεται.



Εικόνα 13: Παράδειγμα τοπολογίας τριγώνου με WSN

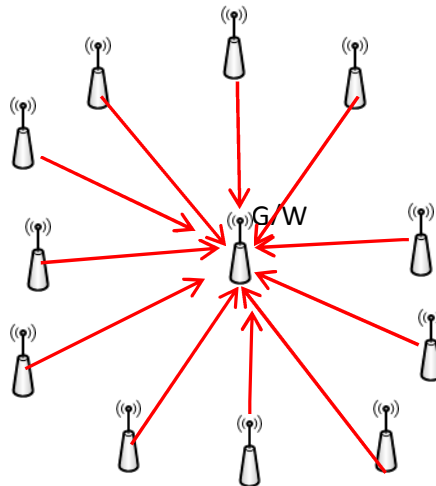
Σχετικά με την κατανάλωση πόρων, το σύστημα εμφανίζει συγκρατημένη κατανάλωση ενέργειας, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν κρίσιμοι κόμβοι. Να σημειωθεί μάλιστα ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται αισθητήρες οι οποίοι μόνο εκπέμπουν χωρίς να μπορούν να λάβουν και να δρομολογήσουν δεδομένα άλλων, με αποτέλεσμα να μπορούν να επικοινωνήσουν μόνο με τον δρομολογητή. Αυτός ο περιορισμός συνεπάγεται την ακόμη πιο χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Συνέπεια της έλλειψης κρίσιμων κόμβων και του φόρτου αυτών αποτελεί και η ικανοποιητική ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων των αισθητήρων αφού κατευθείαν, με 1 hop, αποστέλλουν τα δεδομένα στην πύλη.

Η εν λόγω τοπολογία παρουσιάζει βελτίωση σε θέματα εφεδρείας και αξιοπιστίας, καθώς αν αστοχήσει ένας αισθητήρας χάνεται μόνο αυτός και όχι ένα ολόκληρο τμήμα του δικτύου. Η πολυπλοκότητα της λειτουργίας του συστήματος είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Τίθεται μόνο θέμα πυκνότητας δικτύου, δηλαδή πλήθους στοιχειωδών ψηφίδων δικτύου οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη μιας δοσμένης περιοχής.

Γίνεται πλήρως κατανοητό, ότι αυτή η τοπολογία μπορεί να αποτελέσει την βάση για ένα πιο ολοκληρωμένο δίκτυο με εκτεταμένη ανάπτυξη τριγωνικών δομών. Με άλλα λόγια, η τοπολογία τριγώνου αποτελεί την στοιχειώδη ψηφίδα ανάπτυξης WSN σε δασικές περιοχές.

### 2.3.9. Τοπολογία Αστέρα – Κυψέλη

Στην τοπολογία αυτή (εικόνα 14), ο δρομολογητής τοποθετείται κεντρικά στην τοπολογία και οι αισθητήρες απλώνονται γύρω του σε ίση περίπου ακτίνα [30]. Ιδανικά, ο δρομολογητής βρίσκεται στο κέντρο ενός κανονικού εξαγώνου και οι αισθητήρες τοποθετούνται στην κορυφή αυτού. Επί της ουσίας η τοπολογία αυτή αποτελείται από 6 τριγωνικές τοπολογίες με ίσες πλευρές, άρα αποτελεί γενίκευση της προηγούμενης παραγράφου. Βεβαίως η τοπολογία αυτή μπορεί να εμπλουτιστεί και στην γενίκευσή της να περιλαμβάνει περισσότερους από 6 αισθητήρες αναλόγως των αναγκών κάλυψης (εικόνα 14).



Εικόνα 14: Παράδειγμα τοπολογίας αστέρα με WSN

Το κόστος αυτής της τοπολογίας είναι και πάλι ανάλογο των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. Να σημειωθεί ότι ο δρομολογητής στην εν λόγω διάταξη είναι ένας. Η κατανάλωση ενέργειας είναι περιορισμένη καθώς ο κάθε αισθητήρας επικοινωνεί κατευθείαν και μόνο με την πύλη. Κατά συνέπεια η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων των αισθητήρων είναι ίση με την ταχύτητα μετάδοσης του σήματος από τον αισθητήρα στον δρομολογητή (1 hop).

Έχοντας κατά νου μόνο το πεδίο εφαρμογών στο οποίο εστιάζουμε, είναι φανερό ότι με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το μειονέκτημα των κρίσιμων κόμβων και του φόρτου αυτών και αυξάνεται η αξιοπιστία του συστήματος δεδομένου ότι τα σημεία κατάρρευσης του δικτύου πηγάζουν μόνο από την βλάβη του δρομολογητή και κανενός άλλου κόμβου. Στην περίπτωση που υποστεί βλάβη κάποιος αισθητήρας θα καθυστερήσει η ανίχνευση του συμβάντος της πυρκαγιάς, ή οποιοδήποτε άλλο

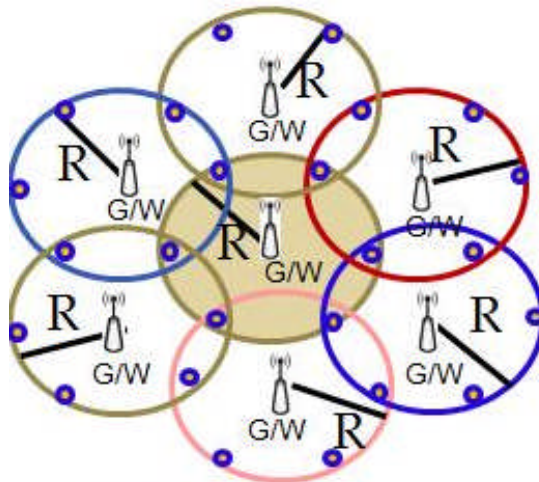
περιβαλλοντικού γεγονότος, για χρόνο τόσο όσο η κάλυψη της απόστασης μέχρι τον επόμενο, αναλόγως πάντα με την μορφολογία του δάσους και της πιθανής κατηγοριοποίησης της περιοχής. Τα μετρικά στοιχεία κάλυψης της περιοχής εξετάζονται λεπτομερώς στην συνέχεια. Με δεδομένη την ελάχιστη επίπτωση των αστοχιών των αισθητήρων υπάρχει η καλύτερη δυνατή απόκριση στον εντοπισμό του φαινομένου, έστω και αν μόνο ένα ζεύγος αισθητήρα - gateway λειτουργήσει. Η αξιοπιστία και εφεδρεία βελτιώνεται με την προσθήκη περισσότερων gateways, όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια. Η πολυπλοκότητα της λειτουργίας της τοπολογίας είναι χαμηλή ενώ η χρηστικότητα και η αποτελεσματικότητα υψηλή και αρκετά ικανοποιητική για τα δεδομένα της εφαρμογής μας.

### 2.3.10. Τοπολογία Πλέγματος Αστέρων - Κυψελών με Επικαλύψεις

Στην εν λόγω τοπολογία (εικόνα 15), χρησιμοποιούνται πολλαπλές μερικά αλληλοεπικαλυπτόμενες κυψέλες. Η απόσταση τοποθέτησης είναι τέτοια με συνέπεια να υπάρχει μικρή επικάλυψη ώστε ο κάθε αισθητήρας να είναι εντός εμβέλειας περισσότερων της μίας κυψελών [32], εφόσον αυτό είναι δυνατό. Ακολουθώντας αυτήν την αρχιτεκτονική μπορούμε να καλύψουμε πολύ μεγάλη έκταση, παρέχοντας υψηλή αξιοπιστία και εφεδρεία δικτύου. Στην περίπτωση που αστοχήσει ένας δρομολογητής το σήμα των περιφερειακών στην κυψέλη του αισθητήρων μπορεί με καλή πιθανότητα να μεταδοθεί στις άλλες κυψέλες εντός της εμβέλειας των οποίων βρίσκεται. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να αστοχήσουν όλα τα gateways με τα οποία επικοινωνεί ο αισθητήρας για να μην καταστεί εφικτή η μετάδοση του σήματος. Γίνεται κατανοητό πως η εν λόγω τοπολογία μπορεί να εφαρμοστεί με τρόπο που να παρέχει αρκετά υψηλά επίπεδα εφεδρείας και αξιοπιστίας.

Σημειώνεται πως κάθε κυψέλη του σχήματος 15, μπορεί να περιβάλλεται από άλλες 6 συνολικά και ούτω κάθε εξής. Προσθέτοντας συνεχώς και άλλες κυψέλες, δημιουργούνται ομόκεντρες στοιβάδες αισθητήρων με αποτέλεσμα την κάλυψη του ζητούμενου πεδίου - έκτασης.

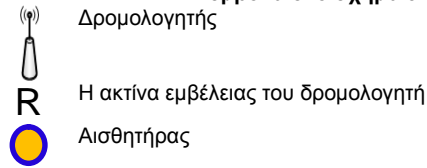
Στο εν λόγω σχήμα ο κάθε αισθητήρας έχει εμβέλεια ακτίνας  $R$ , σε ότι αφορά την ανίχνευση περιστατικού φωτιάς αλλά και την απόσταση επιτυχούς μετάδοσης του σήματος.



Εικόνα 15: Παράδειγμα τοπολογίας πλέγματος κυψελών WSN με επικαλύψεις [32]

Στη συνέχεια παρατίθεται και πίνακας σχετικά με τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στο παραπάνω σχήμα.

## Σύμβολα στο σχήμα 3.1.11



**Πίνακας 1:** Σύμβολα που χρησιμοποιούνται στην τοπολογία πλέγματος κυψελών WSN με επικαλύψεις.

Όσο αφορά την ταχύτητα και την κατανάλωση ισχύουν κι εδώ τα της τοπολογίας αστέρα. Η τοπολογία δεν εμφανίζει κρίσιμους κόμβους, έχουμε μεγάλη ταχύτητα στην μετάδοση του σήματος και την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, εφόσον οι αισθητήρες επικοινωνούν κατευθείαν και μόνο με τον δρομολογητή.

Η πολυπλοκότητα του τρόπου λειτουργίας του συστήματος θεωρείται ως μέτρια. Η απλή λειτουργία ενός αστέρα επαναλαμβάνεται πολλές φορές πράγμα που δεν συνιστά περιπλοκή ή υπονόμηση του τρόπου λειτουργίας του συστήματος. Σε περίπτωση που όλοι οι δρομολογητές λειτουργούν, τότε ενδεχομένως το ίδιο σήμα συναγερμού να φτάσει μέσω δύο ή περισσότερων δρομολογητών στο κέντρο εποπτείας, το οποίο είναι αρμόδιο για την απαλοιφή του προκαλούμενου θορύβου. Παράλληλα, η χρηστικότητα και η αποτελεσματικότητα της τοπολογίας παραμένει υψηλή.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η τοπολογία πλέγματος κυψελών με επικαλύψεις σε ευρύτερη κλίμακα και θα επιχειρηθεί η διατύπωση και απόδειξη ενός μοντέλου ανάπτυξης κυψελών με επικάλυψη, με στόχο την ευρεία κάλυψη δασικής περιοχής. Στην πορεία της διατριβής θα αναλυθεί και ο υποτυπώδης αλγόριθμος κάλυψης μιας δασικής περιοχής με πλέγμα αισθητήρων, δεδομένου ότι από την ανάπτυξη της παρούσας τοπολογίας δημιουργείται πλέγμα με άξονα ανάπτυξης υπό γωνία (εικόνα 16).

## 2.4. Διευρυμένη Τοπολογία Πλέγματος Κυψελών με Επικαλύψεις

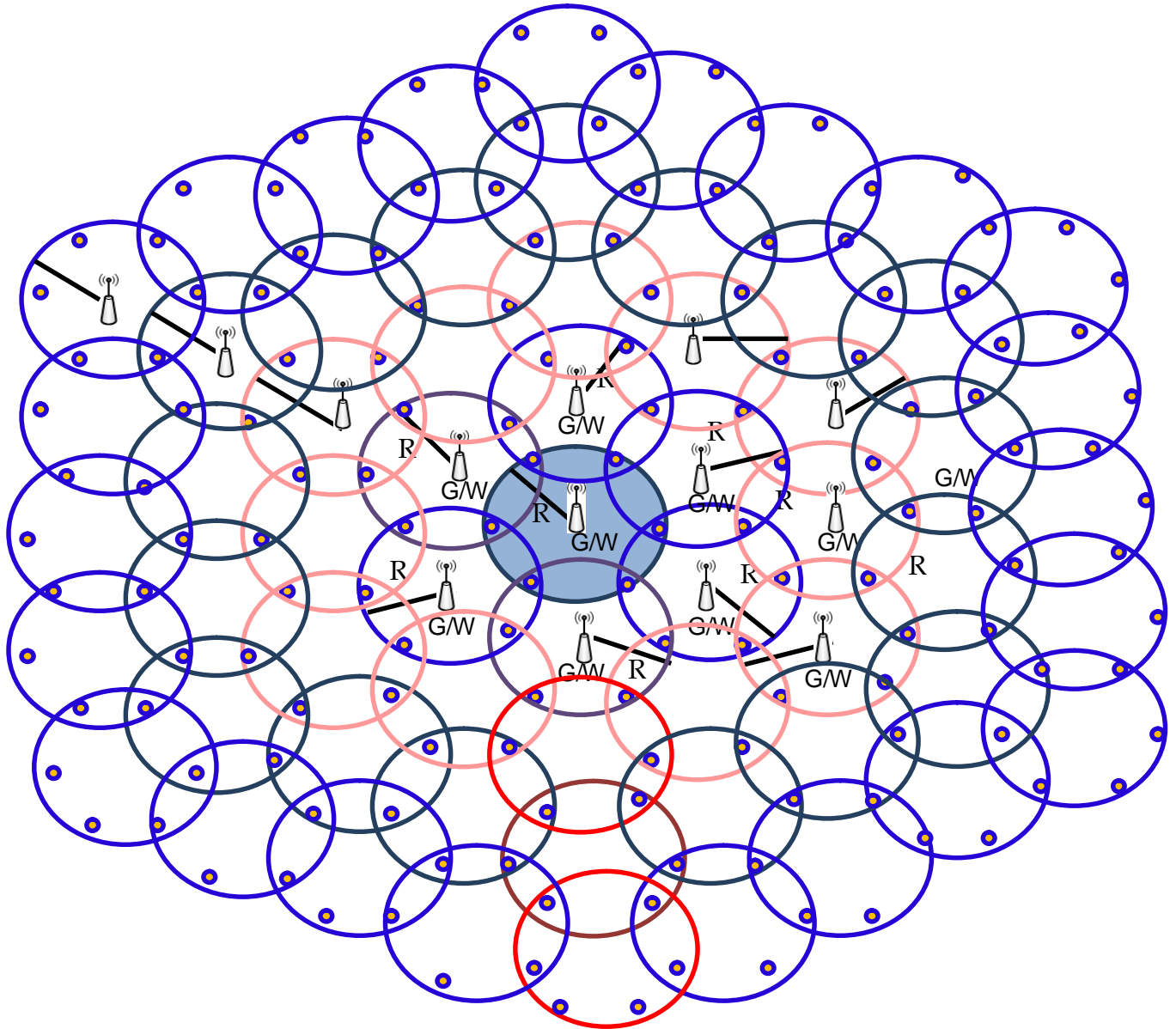
Θεωρούμε την διευρυμένη τοπολογία πλέγματος κυψελών που δεικνύεται στην εικόνα 16. Ξεκινώντας από την κεντρική μπλε κυψέλη απλώνονται γύρω της επαναλαμβανόμενα στρώματα κυψελών, στοιβάδες, χάριν ευρείας κάλυψης της δασικής περιοχής, αλλά και χάριν εφεδρείας και αξιοπιστίας (redundancy) [33], [34].

Στόχος αυτής της ανάλυσης είναι η παραγωγή μετρικών για την κάλυψη μιας ευρείας δασικής περιοχής όσο αφορά το εμβαδόν, το πλήθος των αισθητήρων, το πλήθος των δρομολογητών, το κόστος και τον χρόνο εγκατάστασης. Σε επόμενα κεφάλαια, περισσότερες πληροφορίες εξάγονται καθώς το εν λόγω σύστημα αναπτύσσεται αλγοριθμικά σε σημείο που μας δίνει τις συντεταγμένες που θα τοποθετηθεί ο κάθε αισθητήρας και δρομολογητής σε σχέση πάντα με την τοποθεσία των δέντρων.

Ο τρόπος προσέγγισης της μαθηματικής πλευράς της τοπολογίας ήταν κατ' αρχήν πειραματικός. Για κάθε νέα  $i$  - στοιβάδα κυψελών που χρησιμοποιούνται γύρω από την κεντρική κυψέλη, ή έναν πυρήνα κυψελών, υπολογίζονται τόσο το πλήθος των κυψελών της στοιβάδας που απαιτούνται για πλήρη κάλυψη της περιοχής και redundancy της τοπολογίας, όσο και το πλήθος των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν. Ο υπολογισμός αυτός θα μας δώσει τις βασικές διαστάσεις ώστε να υπολογιστεί

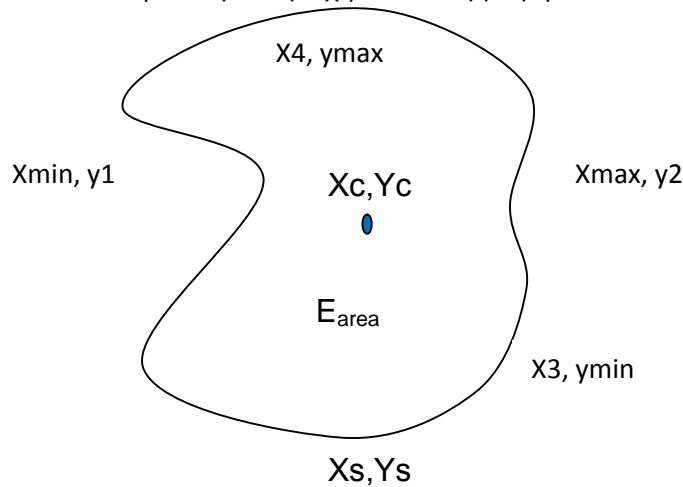
κατ' αρχήν, το εμβαδόν της έκτασης, το κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης και ο χρόνος που απαιτείται. Στην πορεία της διατριβής γίνεται προσέγγιση για τον υπολογισμό και των συντεταγμένων τοποθέτησης των αισθητήρων.

Να σημειωθεί ότι δεχόμεστε ως περιπτώσιολογική μελέτη, η κεντρική κυψέλη να έχει ακτίνα κάλυψης  $R=40m$ . Δεχόμενοι ως κέντρο αυτό της πρώτης κυψέλης, αυξάνοντας τις στοιβάδες γύρω της αυξάνει αναλογικά και η ακτίνα κάλυψης ανά  $2 \cdot R$  (80m) περίπου. Σημειώνεται πως η ακτίνα  $R$  όσο μεγάλη η μικρή και αν είναι δεν μεταβάλλει την τοπολογία και το πλήθος των κυψελών καθώς η τοπολογία εκτείνεται αναλογικά και συμμετρικά της ακτίνας  $R$  αφού όλες οι κυψέλες έχουν το ίδιο μήκος ακτίνας.



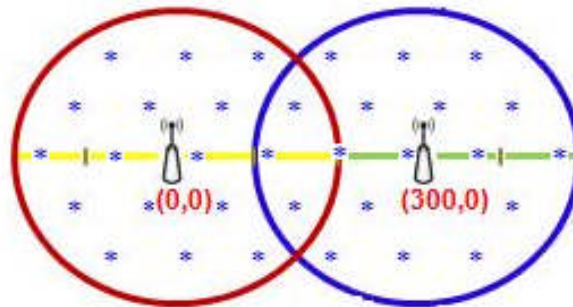
Εικόνα 16: Διευρυμένο παράδειγμα τοπολογίας πλέγματος κυψελών WSN με επικαλύψεις [33], [34]

Θεωρούμε επίσης μια δοσμένη περιοχή με εμβαδόν  $E_{area}$  στην οποία θα αναπτύξουμε το δίκτυο ασυρμάτων αισθητήρων. Έστω ότι η εν λόγω περιοχή είναι ασύμμετρη.



**Εικόνα 17: Ασύμμετρη περιοχή  $E_{area}$**

Το σημείο κλειδί της βελτιστοποίησης συνίσταται στο ότι οι κυψέλες πλέον θα περιέχουν ένα πλέγμα από αισθητήρες οι οποίοι αναπτύσσονται σε αποστάσεις ίσες με την εμβέλεια εξαιρετικής ασφάλειας διάδοσης που έχει υπολογιστεί για πυκνή βλάστηση ίση με 40- 50m και για αραιή 70-80m.



**Εικόνα 18: Στοιχειώδης ψηφίδα βελτιστοποίησης της διευρυμένης τοπολογία πλέγματος κυψελών με επικαλύψεις.**

Εντοπίζουμε τα σημεία εκείνα στα όρια της περιοχής τα οποία παρουσιάζουν το μικρότερο και το μεγαλύτερο γεωγραφικό μήκος και πλάτος αντίστοιχα.

Από αυτά τα στοιχεία, θα θεωρήσουμε κατ' αρχήν πως η περιοχή είναι ορθογώνια παραλληλόγραμμη και θα βρούμε το κέντρο του ορθογώνιου  $(X_c, Y_c)$ , καθώς εκεί θα πρέπει να τοποθετηθεί ο πρώτος δρομολογητής ώστε να μπορεί να δέχεται σήματα από το πλέγμα αισθητήρων που θα αναπτυχθεί περιμετρικά γύρω του και πάντα στα όρια της δοσμένης περιοχής. Προφανώς εφόσον ο πρώτος δρομολογητής δεν μπορεί να καλύψει την ευρύτερη περιοχή, αναπτύσσονται γύρω του κυψέλες πλεγμάτων με επικαλύψεις κατά την αρχιτεκτονική που εξετάστηκε στην απλή προσέγγιση. Σημειώνεται ωστόσο, πως το πιο πιθανό είναι να καθορίζονται οι περιοχές στο δάσος ως παραλληλόγραμμα καθώς έτσι αρκούν τέσσερις (4) συντεταγμένες για την πλήρη περιγραφή της έκτασης. Είναι πολύ δύσκολο να δοθούν ζεύγη συντεταγμένων τα οποία να περιγράφουν όλη την επικαμπύλια περιοχή της επιφάνειας. Ωστόσο και σε αυτήν την περίπτωση, και μόνο ως προς την ανάπτυξη του πλέγματος των αισθητήρων θα πρέπει να μπει κριτήριο στον αλγόριθμο ανάπτυξης



δικτύου και να τοποθετείται ο αισθητήρας μόνο αν εμπίπτει της περιοχής. Αναφορικά με τους δρομολογητές δεν υπάρχει πρόβλημα καθώς η εμβέλειά τους είναι περιμετρική, συνεπώς αρκεί η εύρεση των συντεταγμένων κέντρου και η επίλυση του προβλήματος με quad trees και κατά περίπτωση kmeans αλγορίθμους όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 7.

Θεωρούμε επίσης τα ακόλουθα:

D: την μέση απόσταση μεταξύ των δέντρων και

d: το μήκος της πλευράς ενός ισοπλεύρου τριγώνου που ενώνει νοητά 2 sensors μεταξύ τους

Ο υπολογισμός της μέσης απόστασης μεταξύ των δέντρων D είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς υπό κανονικές συνθήκες σε αυτό θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε το υλικό του αισθητήρα έτσι ώστε σε σχέση με τα γύρω δέντρα να μπορούμε να δημιουργούμε το πλέγμα.

Εάν η μέση απόσταση των δέντρων μιας περιοχής κυμαίνεται έως 6m, τότε αυτομάτως μιλάμε για περιοχή με πυκνή βλάστηση και θέτουμε στους υπολογισμούς μας  $d=40$ . Στην περίπτωση που η απόσταση D μεταξύ των δέντρων κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 μέτρων τότε η περιοχή θεωρείται αραιής βλάστησης οπότε το d το καθορίζουμε στα 70m.

Ένας πολύ σημαντικός περιορισμός εδώ που πρέπει να εξετάζεται είναι η τιμή του D σε σχέση με την εμβέλεια R. Αν η εμβέλεια R είναι μικρότερη της D τότε προφανώς θα πρόκειται για επεξεργασία λάθος δεδομένων, καθώς δεν είναι δυνατόν να υλοποιήσουμε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων για την προστασία περιοχής από φωτιά ενώ στην εν λόγω περιοχή δεν υπάρχει δέντρο είτε υπάρχει ένα όσο αφορά την μία ή την άλλη διάσταση.

Η αναφορά στο ισοπλευρο τρίγωνο μπορεί να θεωρηθεί ίσως πλεονασμός στην παρούσα φάση, ωστόσο στη συνέχεια δεικνύεται ότι εργαζόμαστε σε εξάγωνα τα οποία προφανώς προκύπτουν από την σύνθεση ισοπλεύρων τριγώνων.

Στη συνέχεια θεωρούμε ως R την εμβέλεια ενός G/W. Το εμβαδόν  $E_{range}$  που μπορεί να καλύψει ο εν λόγω G/W ισούται με:

$$E_{range} = \pi * R^2 \quad (11)$$

Το Εμβαδόν ενός ισοπλεύρου τριγώνου ισούται με:

$$E_{tr} = d^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} \quad (12)$$

Συνεπώς τα ισοπλευρα τρίγωνα που θα καλύψουν την περιοχή εμβέλειας ισούνται με:

$$N_{tr} = \frac{E_{range}}{E_{tr}} = \frac{\pi * R^2}{d^2 * \frac{\sqrt{3}}{4}} = \frac{4 * \pi * R^2}{d^2 * \sqrt{3}} \quad (13)$$

Το πλήθος των δρομολογητών που θα χρησιμοποιηθούν ισούται με :



$$N_{G/W} = \frac{E_{area}}{E_{range}} = \frac{E_{area}}{\pi * R^2} \quad (14)$$

κής R, προφανώς έχει σχέση με την ισχύ της κεραίας του G/W. Θεωρούμε λοιπόν την σχέση της ισχύος λήψης της κεραίας (PR) και επιλύουμε ως προς την ακτίνα – εμβέλεια R.

$$P_R = \frac{P_{tot} * G_t * G_r * \lambda^2}{(4 * \pi * R)^2 * L} \Rightarrow R = \sqrt{\frac{P_{tot} * G_t * G_r * \lambda^2}{16 * \pi^2 * L * P_R}} \quad (15)$$

όπου:

- P<sub>tot</sub>: Ισχύς εκπομπής πομπού
- G<sub>t</sub>: 3 \* 10<sup>8</sup>
- λ: τα hertz της κεραίας
- R: απόσταση εκπομπής του σήματος
- L: συντελεστής απωλειών (συνήθως ίσος με 1)
- P<sub>R</sub>: Ισχύς εκπομπής δέκτη

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η απόσταση εκπομπής της κεραίας. Ωστόσο αυτήν θα την περάσουμε από το φίλτρο της εξομοίωσης καθώς το περιβάλλον στο δάσος δεν είναι ιδανικό και έχουμε αλλοιώσεις λόγω βλάστησης, αναγλύφου κ.α.

Συνεπώς αντικαθιστώντας την σχέση (15) στην (14) λαμβάνουμε το πλήθος των δρομολογητών N<sub>G/W</sub> σε ιδανικό περιβάλλον.

$$N_{G/W} = \frac{E_{area}}{E_{range}} = \frac{E_{area}}{\pi * \frac{P_{tot} * G_t * G_r * \lambda^2}{16 * \pi^2 * L * P_R}} = \frac{E_{area} * 16 * \pi^2 * L * P_R}{\pi * P_{tot} * G_t * G_r * \lambda^2} \quad (16)$$

Ο αλγόριθμος σάρωσης και κάλυψης της εν λόγω περιοχής περιγράφεται στο κεφάλαιο 7.

## 2.5. Τεχνολογίες και Λειτουργικά Περιβάλλοντα

### 2.5.1. Είδη Αισθητήρων

Λόγω των ιδιοτήτων των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων γίνεται αντιληπτό πως με την αλλαγή του είδους των αισθητήρων σε ένα ήδη υπάρχον δίκτυο, ή ακόμη και με την προσθήκη νέων για την μέτρηση διαφορετικών φυσικών μεγεθών, αλλάζουμε αυτόματα και τον στόχο της εφαρμογής. Συνεπώς, περισσότεροι στόχοι μπορούν να εξυπηρετηθούν με την εγκατάσταση πέραν του ενός αισθητήρων είτε σε μια συσκευή είτε σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Μερικά ενδεικτικά είδη αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι ακόλουθοι: βιοϊατρικοί (καταγραφή καρδιακών παλμών, πίεσης κ.α.), θερμοκρασίας, υγρασίας, κίνησης, ραδιενέργειας (ανίχνευση γάμμα και βήτα σωματιδίων), φωτός, πίεσης, σύστασης εδάφους, θορύβου, ύπαρξης η μη συγκεκριμένων αντικειμένων, ταχύτητα, δόνηση, ανίχνευσης μόλυνσης του αέρα (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, κ.α.).

Αρκετές εταιρείες δραστηριοποιούνται στην κατασκευή αισθητήρων και ολοκληρωμένων λύσεων και εφαρμογών.

## 2.5.2. Τεχνολογίες Αισθητήρων

### 2.5.2.1. Τεχνολογία XBOW

Σημαντικές και πλείστες εφαρμογές γνωρίζουν οι αισθητήρες της εταιρείας XBOW [35], οι οποίοι μάλιστα χρησιμοποιούν και το λειτουργικό σύστημα TinyOS. Αξίζει να σημειωθεί πως η εν λόγω εταιρεία δραστηριοποιείται πλέον σε συσκευές μέτρησης αδράνειας που έχουν εφαρμογές σε αεροσκάφη αλλά και σε δίκτυα αισθητήρων περιβαλλοντικού σκοπού.

Η XBOW ήταν στο άμεσο παρελθόν ένας από τους βασικούς παγκόσμιους προμηθευτές αισθητήρων του προτύπου mica, micaz, telosb. Ωστόσο, κανένας από αυτούς δεν υποστηρίζεται σήμερα από την εταιρεία. Το 2008 κυκλοφόρησε τα προϊόντα της σειράς Eko για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών γεγονότων και αγροτικών καλλιεργειών. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες συσκευές ήταν αρκετά ογκώδεις για να μπορούν να προσαρμοστούν σε δέντρα και να σε μεγάλη κλίμακα. Παράλληλα, το κόστος τους ήταν αξιοσημείωτα υψηλό για το ζητούμενο εύρος της εφαρμογής. Τον ίδιο χρόνο η XBOW, ανακοίνωσε και την κυκλοφορία του νέου προϊόντος NeoMote για την ενεργειακή παρακολούθηση των κτιρίων.

Στη συνέχεια και για ιστορικούς λόγους παραθέτουμε τα χαρακτηριστικά δύο τυπικών αισθητήρων, mica2 και telosb, που υποστήριξε η XBOW (εικόνα 19).

Βασικό χαρακτηριστικό το εν λόγω αισθητήρων είναι η χρήση του λειτουργικού συστήματος TinyOS.



- mica2 (2002)
- 8MHz ATmega128
- 4kB RAM, 128kB flash
- 512kB external flash
- 20kb/s custom radio
- many different sensor boards
- 2 AA batteries:



#### telosb (2004)

- 1MHz TI MSP430
- 10kB RAM, 48kB flash
- 512kB external flash
- 250kb/s 802.15.4 radio
- built-in sensors
- 2 AA batteries:
- radio+cpu mode: 63mW
- sleep mode: 30 uW

Εικόνα 19: Χαρακτηριστικές πλακέτες τεχνολογίας X-BOW [35]

Ο χρόνος ζωής των motes γενικότερα μπορεί να κυμαίνεται από μερικές ημέρες, έως πολλά χρόνια με ανώτατο όριο περί των 10 ετών.

### **2.5.2.2. Τεχνολογία iSense**

Η τεχνολογία iSense [36], περιλαμβάνει μια πλειάδα αισθητήρων και δρομολογητών. Υποστηρίζει αισθητήρες φωτεινότητας, θερμοκρασίας, επιτάχυνσης, ανίχνευσης υπερύθρων και ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου. Οι δρομολογητές είναι Ethernet και wireless routers.

Η εν λόγω εταιρεία παρέχει διακριτή συσκευή ως περιβαλλοντικό αισθητήρα, η οποία παρακολουθεί την θερμοκρασία και την φωτεινότητα. Ωστόσο, η πρόσβαση στην συσκευή γίνεται μέσω σειριακής επικοινωνίας, πράγμα που θέτει περιορισμούς σε σχέση με την εφαρμογή μας ως προς την απόσταση και την παροχή ενέργειας.

Όσο αφορά το θέμα της ενέργειας, οι συσκευές υποστηρίζονται από modules επαναφορτιζόμενων μπαταριών αλλά και από modules συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας, με συνέπεια την ενεργειακή αυτονομία τους. Άλλες εφαρμογές των υπό συζήτηση αισθητήρων σχετίζονται με την ανίχνευση οχημάτων και την ασφάλεια μέσω της ανίχνευσης κινουμένων αντικειμένων.

Επίσης παρέχονται συσκευές GPS και μετεωρολογικοί σταθμοί με ενσωματωμένους αισθητήρες θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και βαρομετρικής πίεσης. Ειδικότερα, το kit ClimaControl υποστηρίζεται από λογισμικό οπτικοποίησης και καταγραφείς δεδομένων που μεταδίδονται ασύρματα τύπου tinyLOG.

Το υλικο iSense συμπληρώνεται και από λειτουργικό σύστημα και σύστημα διαδίκτυωσης γραμμένα σε C++ και περιέχει μεγάλο αριθμό έτοιμων υπηρεσιών και πρωτοκόλλων. Εκτός από την αποκλειστική στοίβα (stack) πρωτοκόλλων διαδίκτυωσης mesh περιλαμβάνει και τις στοίβες IPv4 και v6.

Πολύ σημαντικό στοιχείο στην ανάπτυξη λογισμικού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αποτελεί το γεγονός ότι το λογισμικό σύστημα του iSense επιτρέπει κατευθείαν την εξομοίωση μιας εφαρμογής στον εξομοιωτή SHAWN χωρίς περαιτέρω προσπάθεια.

### **2.5.2.3. Τεχνολογία ArchRock (CISCO)**

Η Arch Rock [37], εξαγοράστηκε από την Cisco τον Σεπτέμβριο του 2010. Το βασικό της προϊόν ήταν το PhyNet, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με Server και τους συνεργαζόμενους αισθητήρες IP. Μέσω του server ήταν δυνατή η κεντρική παρακολούθηση διασυνδεδεμένων ομάδων ασυρμάτων αισθητήρων με τη χρήση Web Service εφαρμογής. Η εφαρμογή αυτή παρείχε πρόσβαση στον διαχειριστή τόσο μέσω ενός πλοηγού web όσο μέσω καθιερωμένων προγραμματιστικών διεπαφών.

Οι αισθητήρες Phynet μπορούν να βρίσκονται παντού. Για παράδειγμα μπορούν να βρίσκονται σε ένα κτίριο, μέσα υπολογιστικά κέντρα, σε φυγεία νοσοκομείων και ακόμη σε αφιλόξενα περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου. Οι αισθητήρες μπορούν να βρίσκονται σε αρκετή απόσταση από τον server και

όπως χαρακτηριστικά αναφέρει η εταιρεία στις προδιαγραφές τους, μπορούν να βρίσκονται σε οποιοδήποτε αριθμό “hops” μακριά από αυτόν.

Ωστόσο, στην δική μας περίπτωση η ύπαρξη και μόνο της IP στοίβας στον αισθητήρα τον καθιστά σπάταλο σε ενέργεια, χαρακτηριστικό που αντιτίθεται στην επιθυμητή μακροζωία του δικτύου.

Ωστόσο, η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων είναι το κόστος του συνδυασμού πρωτογενών και διασκορπισμένων δεδομένων ανεξάρτητα ευρύτητας περιοχής και δικτύου.

#### 2.5.2.4. Τεχνολογία Libellium

Η εταιρεία Libellium [38], είναι αυτήν την στιγμή η επικρατούσα κατασκευάστρια εταιρεία υλικού και λογισμικού για την ανάπτυξη δικτύων ασύρματων αισθητήρων. Τα βασικά της προϊόντα, που αποτελούν και δομικά στοιχεία των δικτύων, είναι:

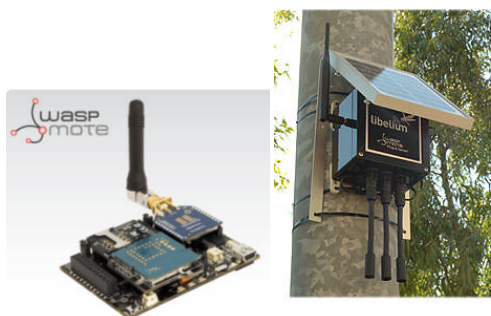
- Η πλακέτα αισθητήρων Waspmote, η οποία αποτελεί μια συσκευή χαμηλής κατανάλωσης και μπορεί να ενσωματώσει έως και 50 διαφορετικούς αισθητήρες.
- Ο δρομολογητής Meshlium ο οποίος υποστηρίζει τα πρωτόκολλα Wifi mesh (2.4GHz - 5GHz), ZigBee, GPRS, GPS and Bluetooth σε μία και μόνο μονάδα.

Στην εν λόγω εταιρεία έχουν απονεμηθεί διάφοροι τίτλοι τιμής με του κυριότερους αυτούς του :

- “The 4th annual Internet of Things Europe 2012: 12th-13th November 2012, Brussels, Belgium “
- “Best of Sensors Expo 2011 Award for Radiation Sensor Board“

#### Η πλακέτα αισθητήρων WASPMote

Το SensorBoard αυτής της εταιρείας ονομάζεται WASPMote, δεικνύεται στην εικόνα 21 και αποτελεί το kit αισθητήρων για προγραμματιστές.



Εικόνα 20: Το Kit WASPMote [38]

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η κατανάλωση του αισθητήρα αναλόγως της κατάστασης στην οποία αυτός βρίσκεται έχει ως ακολούθως:

ON:	9mA
Sleep:	62uA
Deep Sleep:	62uA
Hibernate:	<b>0,7uA</b>

Πίνακας 1: Ενδεικτική κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την κατάσταση

Υποστηρίζει τόσο τις σύγχρονες όσο και τις ασύγχρονες διακοπές. Χρησιμοποιεί τον τρόπο λειτουργίας Hibernate ως λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας. Τα είδη αισθητήρων που υποστηρίζονται δεικνύονται παρακάτω.(εικόνα 21):

- Gases (CO, CO2, CH4..)
- Temperature, liquid level
- Weight, pressure, humidity
- Luminosity, accelerometer
- Soil moisture, solar radiation

Εικόνα 21: Είδη αισθητήρων

Έπεται η μέγιστη ακτίνα κάλυψης (εικόνα 22).

- 2.4GHz - 7km
- 900MHz - 10km
- 868MHz - 12km
- GPRS - Bluetooth modules
- Wifi - RFID/NFC modules

Εικόνα 22: Μέγιστη ακτίνα κάλυψης

Υποστηρίζει Λογισμικό Ανοιχτού κώδικα σε ό,τι αφορά το API και τον μεταγλωττιστή και συνοδεύεται από πλήρη τεκμηρίωση και παραδείγματα. Όσο αφορά την κάθε εφαρμογή, υποστηρίζεται η λειτουργία “**Over the Air Programming (OTA)**”, οι πλακέτες διαθέτουν GPS Module, αποθηκευτικό χώρο: 2GB και ηλιακό συλλέκτη. Το Προγραμματιστικό περιβάλλον ονομάζεται **Waspnote IDE - v0.2** και παρέχεται για πλατφόρμες Linux, Windows και Mac-OS. Στην εικόνα 23 δεικνύεται η λειτουργία “On the Air Programming”.



**Εικόνα 23: On the air Programming [38]**

Παρέχεται λογισμικό για την συνεργασία με iPhone - Android λειτουργικό, για την αποστολή δεδομένων σε αυτά.

Σχετικά με την προγραμματιστική διεπαφή δικτύου (Networking API), υποστηρίζονται τα ακόλουθα πρωτόκολλα: ZigBee, 868MHz, 900MHz, XSC, DigiMesh, Bluetooth, Bluetooth for device discovery. WiFi, RFID/NFC 13.56MHz, RFID 125KHz.

Υποστηρίζεται πλήθος «Εξυπνων» εφαρμογών σχετικά με το Internet of Things. Στη συνέχεια παρατίθεται λίστα από τις εν λόγω εφαρμογές, ενδεικτική αφενός της δυναμικής της εταιρείας στο χώρο και αφετέρου του γενικότερου εύρους και της χρησιμότητας των δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων [39].

**Smart Cities**

1. Smart Cities (Smart Parking Monitoring of parking spaces availability in the city.
2. Structural health (Monitoring of vibrations and material conditions in buildings, bridges and historical monuments.
3. Noise Urban Maps (Sound monitoring in bar areas and centric zones in real time.
4. Traffic (Congestion Monitoring of vehicles and pedestrian levels to optimize driving and walking routes).
5. Smart Lighting (Intelligent and weather adaptive lighting in street lights)
6. Waste Management (Detection of rubbish levels in containers to optimize the trash collection routes.)
7. Intelligent Transportation Systems Smart Roads and Intelligent Highways with warning messages and diversions according to climate conditions and unexpected events like accidents or traffic jams.

**Smart Environment**

1. Forest Fire Detection (Monitoring of combustion gases and preemptive fire conditions to define alert zones).
2. Air Pollution (Control of CO2 emissions of factories, pollution emitted by cars and toxic gases generated in farms).
3. Landslide and Avalanche Prevention (Monitoring of soil moisture, vibrations and earth density to detect dangerous patterns in land conditions).
4. Earthquake Early Detection (Distributed control in specific places of tremors).

**Smart Water**

1. Water Quality (Study of water suitability in rivers and the sea for fauna and eligibility for drinkable use).
2. Water Leakages (Detection of liquid presence outside tanks and pressure variations along pipes).
3. River Floods (Monitoring of water level variations in rivers, dams and reservoirs).

**Smart Metering**

1. Smart Grid (Energy consumption monitoring and management.)
2. Tank level (Monitoring of water, oil and gas levels in storage tanks and cisterns).
3. Photovoltaic Installations (Monitoring and optimization of performance in solar energy plants).
4. Water Flow (Measurement of water pressure in water transportation systems).
5. Silos Stock Calculation (Measurement of emptiness level and weight of the goods).

**Security & Emergencies**

1. Perimeter Access Control (Access control to restricted areas and detection of people in non-authorized areas).
2. Liquid Presence (Liquid detection in data centers, warehouses and sensitive building grounds to prevent break downs and corrosion).
3. Radiation Levels (Distributed measurement of radiation levels in nuclear power stations surroundings to generate leakage alerts).
4. Explosive and Hazardous Gases (Detection of gas levels and leakages in industrial environments, surroundings of chemical factories and inside mines).

**Retail**

1. Supply Chain Control (Monitoring of storage conditions along the supply chain and product tracking for traceability purposes).
2. NFC Payment (Payment processing based in location or activity duration for public transport, gyms, theme parks, etc).
3. Intelligent Shopping Applications (Getting advices in the point of sale according to customer habits, preferences, presence of allergic components for them or expiring dates).
4. Smart Product Management (Control of rotation of products in shelves and warehouses to automate restocking processes).

**Logistics**

1. Quality of Shipment Conditions (Monitoring of vibrations, strokes, container openings or cold chain maintenance for insurance purposes).
2. Item Location (Search of individual items in big surfaces like warehouses or harbours).
3. Storage Incompatibility Detection (Warning emission on containers storing inflammable goods closed to others containing explosive material).
4. Fleet Tracking Control of routes followed for delicate goods like medical drugs, jewels or dangerous merchandises.

**Industrial Control**

1. M2M Applications (Machine auto-diagnosis and assets control).
2. Indoor Air Quality (Monitoring of toxic gas and oxygen levels inside chemical plants to ensure workers and goods safety).
3. Temperature Monitoring (Control of temperature inside industrial and medical fridges with sensitive merchandise).
4. Ozone Presence (Monitoring of ozone levels during the drying meat process in food factories).
5. Indoor Location (Asset indoor location by using active (ZigBee) and passive tags (RFID/NFC)).
6. Vehicle Auto-diagnosis (Information collection from CanBus to send real time alarms to emergencies or provide advice to drivers).

**Smart Agriculture**

1. Wine Quality Enhancing (Monitoring soil moisture and trunk diameter in vineyards to control the amount of sugar in grapes and grapevine health).
2. Green Houses (Control micro-climate conditions to maximize the production of fruits and vegetables and its quality).
3. Golf Courses (Selective irrigation in dry zones to reduce the water resources required in the green).
4. Meteorological Station Network (Study of weather conditions in fields to forecast ice formation, rain, drought, snow or wind changes).
5. Compost (Control of humidity and temperature levels in alfalfa, hay, straw, etc. to prevent fungus and other microbial contaminants).

**Smart Animal Farming**

1. Offspring Care (Control of growing conditions of the offspring in animal farms to ensure its survival and health).
2. Animal Tracking (Location and identification of animals grazing in open pastures or location in big stables).
3. Toxic Gas Levels (Study of ventilation and air quality in farms and detection of harmful gases from excrements).

**Domotic & Home Automation**

1. Energy and Water Use (Energy and water supply consumption monitoring to obtain advice on how to save cost and resources).
2. Remote Control Appliances (Switching on and off remotely appliances to avoid accidents and save energy).
3. Intrusion Detection Systems (Detection of windows and doors openings and violations to prevent intruders).
4. Art and Goods Preservation (Monitoring of conditions inside museums and art warehouses).

**eHealth**

1. Fall Detection (Assistance for elderly or disabled people living independent).
2. Medical Fridges (Control of conditions inside freezers storing vaccines, medicines and organic elements).
3. Sportsmen Care (Vital signs monitoring in high performance centers and fields).
4. Patients Surveillance (Monitoring of conditions of patients inside hospitals and in old people's home).
5. Ultraviolet Radiation (Measurement of UV sun rays to warn people not to be exposed in certain hours).

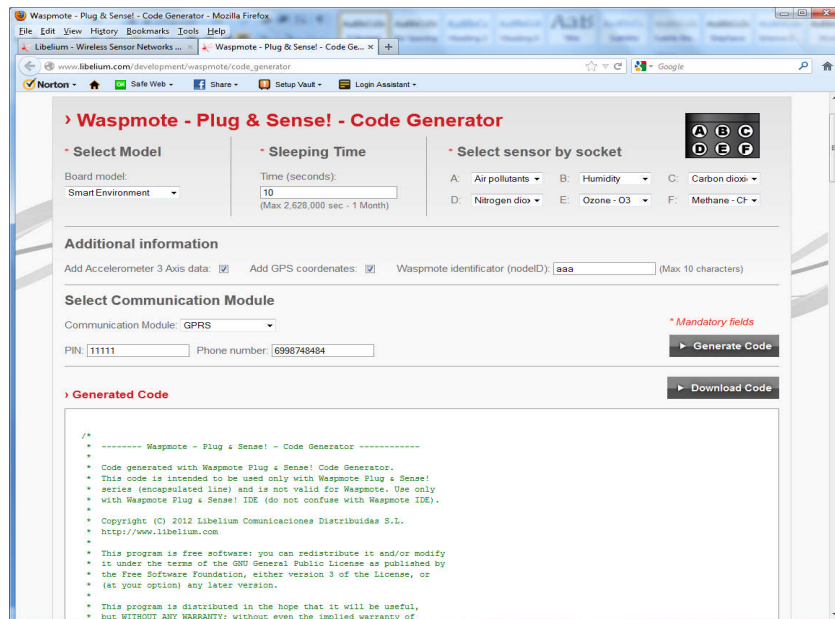
**Εικόνα 24: Ενδεικτική λίστα εφαρμογών Internet of Things [39].**

Τέλος η εταιρεία παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας κώδικα για τον Waspmote μέσω ιστοσελίδας [40]. Σε αυτό το web interface ο χρήστης δηλώνει σε επιλεγόμενες λίστες το μοντέλο του waspmote, τον χρόνο αναμονής (sleeping time), τα είδη αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν, τις συντεταγμένες GPS και το είδος του καναλιού επικοινωνίας. Στη συνέχεια με το πάτημα του πλήκτρου «Generate Code», δημιουργείται ο απαιτούμενος κώδικας που θα τρέξει στον waspmote. Στιγμιότυπο της διαδικασίας δεικνύεται στην εικόνα 25.

Αυτό αποτελεί εργαλείο εξαιρετικής σημασίας καθώς τα μέχρι τώρα γνωστά και φιλόδοξα ερευνητικά έργα, απέτυχαν να υλοποιήσουν μια υψηλού επιπέδου προγραμματιστική διεπαφή για τον χρήστη, με συνέπεια αυτός να πρέπει πολλές φορές να προγραμματίσει σε χαμηλό επίπεδο και κάποιες από αυτές ακόμη και στο αρχικό - πρωτόγονο περιβάλλον του TinyOS. Σημειώνεται πως λύση στη δημιουργία φιλικού προγραμματιστικού περιβάλλοντος για τον χρήστη προσπάθησε να δώσει το



VIPTOS, με την δημιουργία κώδικα από μπλοκ διαγράμματα, εγχείρημα που απέτυχε και αυτό.



Εικόνα 25: Ιστοσελίδα δημιουργίας κώδικα για Libellium Waspote Plug & Sense [39].

### 2.5.2.5. Τεχνολογία Sensible Solutions

Η Sensible Solutions [41], παρέχει λύσεις τόσο σε επίπεδο ανίχνευσης υγρασίας όσο και σε επίπεδο ανίχνευσης πυρκαγιών. Αξίζει να σημειωθεί πως στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος στο Ε.Μ.Π. χρησιμοποιήθηκε η εν λόγω πλατφόρμα σε πιλοτική εφαρμογή.

Εφαρμογές αισθητήρων για την ανίχνευση υγρασίας χρησιμοποιούνται μέσα σε υποδομές κτιρίων (π.χ. στον πίνακα της υδραυλικής εγκατάστασης και όπου περνούν οι σωλήνες) όσο και στην παροχή φροντίδας σε ηλικιωμένους μέσω ενός αισθητήρα ανίχνευσης υγρασίας για την ακράτεια.

Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα κρίνεται η λύση που η εταιρεία παρέχει σχετικά με τους αισθητήρες ανίχνευσης πυρκαγιών. Αισθητήρες αυτής της τεχνολογίας χρησιμοποιήθηκαν και στα πειράματά μας.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, οι δρομολογητές τοποθετούνται σε πλήθος 4-8 μονάδων ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, αναλόγως των ιδιομορφιών του δάσους σε επίπεδο πυκνότητας βλάστησης, μορφολογίας εδάφους κ.α. Τα σήματα συλλέγονται και αναμεταδίδονται από την πύλη (gateway) μέσω ενός από τα ακόλουθα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας: GPRS, 3G, WiMAX or RF.

Οι αισθητήρες όταν θερμανθούν αρκετά εκπέμπουν σήμα συναγερμού. Ακόμα και κατά το κάψιμό τους είναι δυνατόν να γίνει η εκπομπή του σήματος. Χαρακτηριστικό τους είναι η παραγωγή ενέργειας μέσω χημικής αντίδρασης κατά την καύση ικανής για την μετάδοση του σήματος. Μια τέτοια υλοποίηση δικτύου αισθητήρων παρουσιάζει το συγκριτικό πλεονέκτημα της επιμήκυνσης του χρόνου ζωής του δικτύου. Ένας αισθητήρας που παράγει ενέργεια κατά την καύση του ή έστω δαπανά πολύ λίγη ενέργεια, είναι λογικό να χρειάζεται συντήρηση σε πολύ μεγαλύτερα διαστήματα απ' ό,τι χρειάζονται οι άλλοι.

Στην πλατφόρμα που παρέχει η Sensible Solutions η πιο ενεργοβόρος συσκευή είναι ο δρομολογητής, ο οποίος χρειάζεται κανονικές μπαταρίες για την λειτουργία του και χρήζει συντήρησης. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση το κόστος συντήρησης είναι πολύ λογικό. Ένα τυπικό Kit της εν λόγω εταιρείας δεικνύεται στην εικόνα 26, που ακολουθεί.



Εικόνα 26: Sensible Solutions Kit για περιβαλλοντικούς σκοπούς [41]

### 2.5.2.6. Τεχνολογία Advanticsys

Η εταιρεία Advanticsys [42], δραστηριοποιείται επίσης στον χώρο των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, προσφέροντας ολοκληρωμένες λύσεις και εφαρμογές. Για παράδειγμα προσφέρει έτοιμες λύσεις για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και του νερού που όλες συνοδεύονται και από σχετικό λογισμικό παρακολούθησης και γραφικό περιβάλλον.

Επιπρόσθετα παρέχει εφαρμογές για την παρακολούθηση κατασκευών όπως γέφυρες, μνημεία, για την κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια και εφαρμογές στην γεωργία.

Στην γκάμα προϊόντων παρέχεται πλήθος από εξαρτήματα και πλακέτες αισθητήρων (sensor motes & sensor boards).

Στην εικόνα 27, δεικνύεται ο αισθητήρας CM5000 ο οποίος είναι συμβατός με το πρότυπο IEEE 802.15.4 και στηρίζεται στην γνήσια πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα “TelosB” η οποία έχει εκδοθεί από το πανεπιστήμιο του Berkeley στην California.



Εικόνα 27: Ο αισθητήρας CM5000, συμβατός με το IEEE 802.15.4 και με το πρότυπο TelosB [42]

Η εν λόγω συσκευή ενσωματώνει αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτός. Μπορεί να τρέξει το TinyOS λειτουργικό σύστημα αλλά και το ContikiOS. Χρησιμοποιεί 2 μπαταρίες AA και συνδέεται με USB θύρα. Τα δύο τελευταία στοιχεία είναι αρκετά περιοριστικά για ευρείας κλίμακας εφαρμογές όπου απαιτείται τροφοδοσία για μακρό χρονικό διάστημα. Επιπρόσθετα, η επικοινωνία δεν μπορεί να είναι

τύπου USB σε μια προς παρακολούθηση περιοχή όπως το δάσος, αλλά θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ασύρματη εκπομπή των δεδομένων.

Στις σειρές αισθητήρων CM3000 και CM4000 η προβλεπόμενη επικοινωνία είναι ασύρματη. Ωστόσο, η τροφοδοσία τους βασίζεται και πάλι σε δύο μπαταρίες AA, πράγμα που καθιστά σύντομο τον χρόνο ζωής των αισθητήρων και ιδιαίτερα σε δασικά περιβάλλοντα όπου το κόστος συντήρησης λόγω της φύσης του έργου δεν είναι ευκαταφρόνητο.

### **2.5.3. Λειτουργικά Συστήματα Ασυρμάτων Αισθητήρων**

#### **2.5.3.1. Το TinyOS**

Το TinyOS [30], [43], είναι το αποτέλεσμα μιας συνεργασίας που ξεκίνησε μεταξύ των πανεπιστημίων της Καλιφόρνιας, του Berkeley και των τμημάτων Έρευνας και ανάπτυξης των εταιρειών Intel και XBOW. Στη συνέχεια εξελίχθηκε σε παγκόσμιο consortium το λεγόμενο “The TinyOS Alliance”.

Το TinyOS είναι ένα ανοιχτού κώδικα λειτουργικό σύστημα γραμμένο σε γλώσσα NESC (Nested C) για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το TinyOS στην έκδοσή του συνοδεύεται και από έναν εξομοιωτή ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων που τρέχουν το συγκεκριμένο λογισμικό, τον TOSSIM. Ο TOSSIM αποτελεί έναν εξομοιωτή διακριτών γεγονότων και αποτελεί την πρώτη και αξιόπιστη προσέγγιση στο θέμα της εξομοίωσης.

Σημαντικό χαρακτηριστικό του λειτουργικού αποτελεί η αρχιτεκτονική του, η οποία βασίζεται σε συστατικά (components). Αυτό βοηθά πολύ στη δημιουργία καινοτόμων υλοποιήσεων οι οποίες δεν εμπíπνουν σε περιορισμούς μνήμης. Η βιβλιοθήκη του TinyOS αποτελείται από δικτυακά πρωτόκολλα, κατανεμημένες υπηρεσίες, οδηγούς αισθητήρων και εργαλεία απόκτησης δεδομένων.

Το TinyOS δεν αποτελεί ένα λειτουργικό σύστημα με την παραδοσιακή έννοια, αλλά προσεγγίζει το προγραμματιστικό πλαίσιο για ενσωματωμένα συστήματα. Υποστηρίζει στατικό διαμοιρασμό μνήμης, δεν έχει αρχείο συστήματος και υλοποιεί το μοντέλο single-tasking.

#### **2.5.3.2. Δομή του TinyOS**

Το TinyOS εγκαθίσταται στο /opt/tinyos-2.x αρχείο συστήματος και έχει την ακόλουθη δενδρική δομή:

Σύντομη περιγραφή των καταλόγων:

**apps:** έχουμε καταλόγους με έτοιμες εφαρμογές καθώς και tutorials. Σημειώνεται πως κάθε κατάλογος συνιστά και μια εφαρμογή.

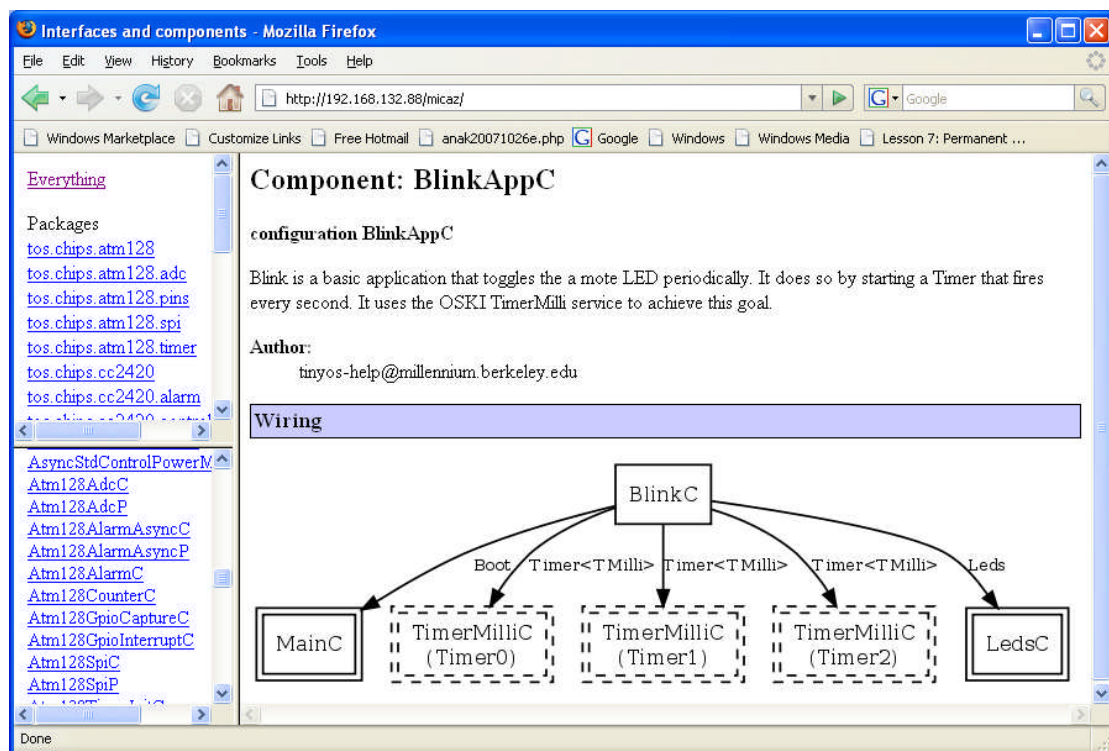
**doc:** Το doc είναι ένας κατάλογος για τον οποίο μπορούμε να δημιουργήσουμε symbolic link κάτω από το web directory του server μας και να έχουμε σε html μορφή τα packages, τα components και τα interfaces του Application Programming Interface (API) του tinyOS. Επίσης τρέχοντας στην εφαρμογή μας: `make micaz docs`, ενημερώνονται οι εν λόγω σελίδες με το νέο component που φτιάξαμε και μπορούμε να έχουμε και γραφική απεικόνιση του wiring αυτού με τη βοήθεια του graphviz. Στη συνέχεια παρατίθεται το περιβάλλον που βλέπουμε κατά την web σύνδεσή μας στο directory doc (εικόνα 4.3.1.1).

**support:** Σε αυτόν τον κατάλογο υπάρχει υποστηρικτικό υλικό για την μεταγλώττιση ( το `make system` και το `sdk` για τις γλώσσες C, C++, Java, Python).

**tools:** Ο κατάλογος αυτός περιέχει όλα τα εργαλεία που περιλαμβάνονται στο πακέτο `tinyos_tools`. Περιλαμβάνει τους υποκαταλόγους `platforms`, `release`, `tinyos`.

**tos:** Το `tos` θα μπορούσαμε να πούμε πως αποτελεί τον πυρήνα της έκδοσης του TinyOS. Εδώ έχουμε υλοποιημένα όλα τα interfaces, τα components, τις βιβλιοθήκες, τις πλατφόρμες και τις προδιαγραφές των αισθητήρων.

Εικόνα 28: Περιγραφή του TinyOS distribution [43].



Εικόνα 29: Το γραφικό περιβάλλον απεικόνισης του TinyOS API [43].

Παρατηρούμε πως στο αριστερό άνω πλαίσιο έχουμε όλα τα πακέτα τα οποία αποτελούν τον «πυρήνα» του TinyOS, είναι υλοποιημένα σε nesC και βρίσκονται στο directory `tos` της έκδοσης 2 όπως θα δούμε παρακάτω. Επιπρόσθετα, στο αριστερό κάτω πλαίσιο έχουμε όλα τα παρεχόμενα components και interfaces.

Το προγραμματιστικό μοντέλο είναι βασισμένο στα συστατικά του – components, τα οποία έχουν γραφεί σε γλώσσα προγραμματισμού nesc (Network embedded Systems C).

### 2.5.3.3. Η γλώσσα προγραμματισμού NESC

Η nesC αποτελεί επέκταση της C, σχεδιασμένη για τη δομή και το μοντέλο εκτέλεσης του TinyOS, στην οποία ο χρήστης μπορεί να γράψει τον κώδικά του. Οι βασικές ιδιότητες της γλώσσας αυτής είναι οι ακόλουθες:

- Διαχωρισμός της κατασκευής και της σύνθεσης.
- Καθορισμός της συμπεριφοράς των συστατικών σε σχέση με τις χρησιμοποιούμενες διεπαφές (interfaces).
- Οι διεπαφές είναι «διπλής κατεύθυνσης»:
  - Commands από το interface
  - Events από τον χρήστη
- Τα συστατικά (components) είναι στατικά συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω των διεπαφών (interfaces).
- Καθήκοντα και ρουτίνες εξυπηρέτησης διακοπής.

Το σημαντικό στοιχείο του TinyOS είναι ότι το περιβάλλον προγραμματισμού είναι ίδιο με αυτό των controllers (embedded sensors), με συνέπεια το σενάριο που υλοποιείται αφενός να μπορεί εξομοιωθεί και αφετέρου να γίνει download απευθείας στον controller.

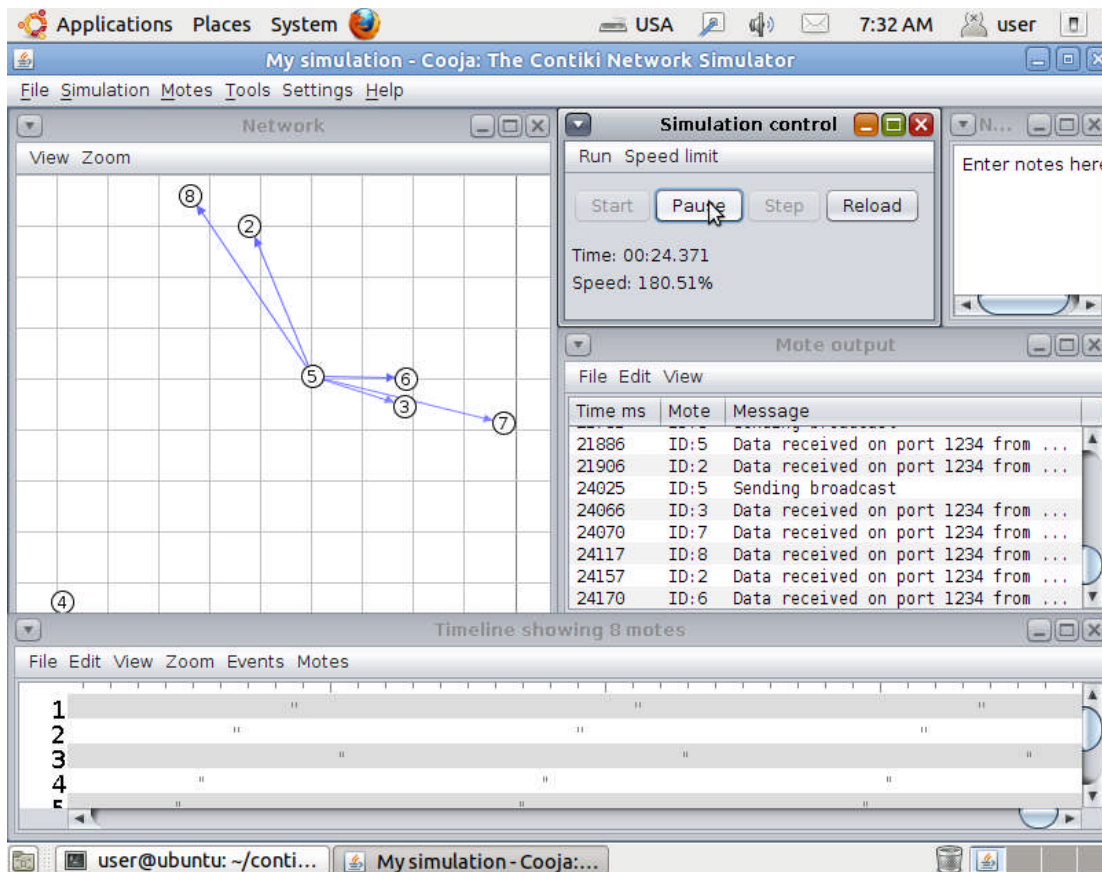
Το TinyOS συνοδεύεται και από σχετικό εξομοιωτή, τον TOSSIM, για τον οποίο γίνεται μνεία στη συνέχεια.

Αξίζει να σημειωθεί πως η προσπάθεια χρήσης του TinyOS στην εφαρμογή μας εγκαταλείφθηκε σχετικά σύντομα, λόγω μη καταλληλότητας της παρεχόμενης λύσης στα θέματα της δασοπροστασίας. Συγκεκριμένα στον εξομοιωτή TOSSIM όλοι οι αισθητήρες τρέχουν ακριβώς τον ίδιο κώδικα, με συνέπεια να μην μπορεί να εξομοιωθεί η συλλογή διαφορετικών μετρήσεων θερμοκρασίας. Επίσης το προγραμματιστικό Interface κρίνεται σχετικά πρωτόγονο για την ανάπτυξη κώδικα σχετικά με την υλοποίηση ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων ευρείας κλίμακας.

### 2.5.3.4. Το ContikiOS

Το ContikiOS [44], είναι ένα ανοιχτού κώδικα λειτουργικό, το οποίο τρέχει σε μια σειρά από πλατφόρμες υλικού καθώς και σε εμπορικές και μη εφαρμογές. Απαιτεί μικρή χωρητικότητα σε μνήμη. Είναι σχεδιασμένο να χρησιμοποιεί γνωστά πρωτόκολλα όπως το ipv4, ipv6 και το http.

Το ContikiOS αποτελεί πρόσφατη εξέλιξη, το project είναι του 2012 και ακόμη διεξάγονται δοκιμές για την σωστή λειτουργία του. Είναι πολλά υποσχόμενο, εύκολο στην εγκατάσταση, σε αντίθεση με το TinyOS και συνοδεύεται από εύχρηστο λογισμικό εξομοίωσης σε γραφικό περιβάλλον. Ο εξομοιωτής δικτύου του Contiki ονομάζεται Cooja και ένα στιγμιότυπο αυτού εμφανίζεται στην εικόνα 31.



Εικόνα 30: Ο εξομοιωτής Cooja του Gontiki OS [44].

## 2.5.4. Πρωτόκολλα επικοινωνίας (Radio)

### 2.5.4.1. Πρωτόκολλο ZigBee

Με τον όρο ZigBee [45], προδιαγράφουμε την σουίτα πρωτοκόλλων υψηλού επιπέδου, τα οποία χρησιμοποιούν ψηφιακά σήματα σε ραδιοσυχνότητες βάσει του IEEE 802 standard για τη δημιουργία Δικτύων Σώματος (Personal Area Networks). Για την κάλυψη μακρινών αποστάσεων, οι συσκευές που χρησιμοποιούν ZigBee πρωτόκολλο τοποθετούνται σε τοπολογία πλέγματος, έτσι ώστε τα δεδομένα να περνούν από τους ενδιαμέσους κόμβους πρώτου φτάσουν τον προορισμό τους. Με αυτόν τον τρόπο τα ZigBee δίκτυα μορφοποιούνται κατά περίπτωση (ad hoc) χωρίς την ανάγκη κεντροποιημένου ελέγχου ή πύλης/δρομολογητή υψηλής ισχύος ικανό να φτάνει σε όλες τις συσκευές. Το ZigBee εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που απαιτείται χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (data rate), μπαταρία μακράς διάρκειας και ασφαλή διαδίκτυση. Έχει καθορισμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξεως των 250Kbit/s και ταιριάζει καλύτερα σε περιοδικές, διακεκομμένες ή μοναδικές εκπομπές σήματος από τον αισθητήρα. Η τεχνολογία του ZigBee είναι απλούστερη και φθηνότερη από αυτές άλλων δικτύων WPANs (Wide Personal Area Networks), όπως του Bluetooth

#### **2.5.4.2. Πρωτόκολλο 6LoWPAN**

Το 6LoWPAN [46], [47], [48], είναι το ακρώνυμο της έκφρασης “IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks”. Επίσης είναι και το όνομα μιας ερευνητικής ομάδας σχετικής με το Διαδίκτυο στον οργανισμό IETF. Η ιδέα του 6LoWPAN, ξεκίνησε από το γεγονός ότι το πρωτόκολλο του Internet (IP) μπορούσε και έπρεπε να βρει εφαρμογή και σε μικρότερες συσκευές. Οι μικρής ισχύος συσκευές με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ θα πρέπει να μπορούν να χρησιμοποιούνται στο Internet of Things.

Η ερευνητική ομάδα 6LoWPAN όρισε την διαδικασία ενθυλάκωσης και τον μηχανισμό συμπίεσης προμετωπίδας ώστε να επιτρέπεται στα IPv6 πακέτα να στέλνονται και να λαμβάνονται πάνω από IEEE 802.15.4 [49]. Όπως τα πρωτόκολλα IPv4 και v6 είναι υπεύθυνα για την δρομολόγηση και παράδοση δεδομένων στα LAN, MAN και WAN δίκτυα, έτσι και οι συσκευές IEEE 802.15.4 παρέχουν δυνατότητα της ασύρματης επικοινωνίας των δεδομένων των αισθητήρων. Ωστόσο η εγγενής φύση των δύο δικτύων είναι διαφορετική.

#### **2.5.4.3. Πρωτόκολλο Bluetooth**

Το Bluetooth [50], αποτελεί ένα ανοιχτό ασύρματο πρότυπο αποκλειστικά για την μετάδοση δεδομένων μεταξύ μικρών αποστάσεων σε σταθερές αλλά και σε κινητές συσκευές/κόμβους, υλοποιώντας ένα PAN με υψηλό επίπεδο ασφαλείας. Οι εκπομπές γίνονται στο χαμηλό εύρος ζώνης ραδιοσυχνότητων στην μπάντα ISM από 2400 έως 2480MHz. Δημιουργήθηκε από την εταιρεία τηλεπικοινωνιών Ericsson το 1994 και αρχικά είχε προταθεί ως η ασύρματη εκδοχή της RS232 επικοινωνίας. Την τεχνολογία και τις πατέντες Bluetooth τις διαχειρίζεται η εταιρεία Bluetooth Special Interest Group.

#### **2.5.4.4. Πρωτόκολλο GSM**

Το πρωτόκολλο GSM (*Global System for Mobile Communications, originally Groupe Spécial Mobile*) [51] χρησιμοποιεί Γκαουσιανή Ελάχιστη Διαμόρφωση (Gaussian Minimum Shift Keying GMSK), η οποία αποτελεί μια παραλλαγή της Διαμόρφωσης Πλάτους με πολυπλεξία Διαμοιρασμού Χρόνου Πρόσβασης (Time Division Multiple Access TDMA) και σηματοδοσία πάνω από φέρουσες με Διπλό Διαμοιρασμό Συχνότητας (Frequency Division Duplex FDD).

Αρχικά σχεδιάστηκε για να λειτουργήσει στην συχνότητα των 900Mhz αλλά γρήγορα προσαρμόστηκε στα 1800MHz. Στόχος του ήταν η εξυπηρέτηση φωνητικής τηλεφωνίας, αλλά με τον καθορισμό και νέων υπηρεσιών επετράπησαν οι συνδέσεις δεδομένων μεταγωγής κυκλώματος έως 9600bits/s. Αυτή η ταχύτητα ήταν πολύ ανταγωνιστική για την εποχή σε σχέση με τις ενσύρματες συνδέσεις. Ωστόσο, η δομή και η τεχνική διαμόρφωσης του GSM δεν μπόρεσε να παρακολουθήσει την έκρηξη των ταχυτήτων στα ενσύρματα δίκτυα. Αυτό οδήγησε στην εισαγωγή του GSM Phase 2+ πρωτοκόλλου, με την υπηρεσία High Speed Circuit-Switched Data (HSCSD).

#### **2.5.4.5. Πρωτόκολλο GPRS**

Το General Packet Radio Service, GPRS [52], προσθέτει την δυνατότητα μεταγωγής πακέτου στο GSM, το οποίο κατ' εξοχήν διαθέτει την ιδιότητα της μεταγωγής κυκλώματος. Παρέχει γρηγορότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων απ' ό,τι το απλό GSM, συγκεντρώνοντας αρκετές GSM χρονοθυρίδες, πιθανώς μέχρι οκτώ, σε μια φέρουσα αγγίζοντας θεωρητικά τα 171kbps.

Αρκετοί πάροχοι δεν προσφέρουν τόσο υψηλές ταχύτητες καθώς εάν μια χρονοθυρίδα χρησιμοποιείται από μια φέρουσα GPRS, τότε δεν μπορεί να είναι διαθέσιμη για οποιοδήποτε άλλη κίνηση (traffic). Επιπρόσθετα, δεν μπορούν όλα τα κινητά να ενσωματώσουν όλους τους συνδυασμούς των θυρίδων.

#### **2.5.4.6. Πρωτόκολλο WiMAX**

Το WiMAX συνιστά τεχνολογία ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης σε δίκτυα και λειτουργεί περίπου όπως τα 802.11 Wi-Fi δίκτυα, ενσωματώνοντας την κάλυψη και την ποιότητα υπηρεσιών του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Αποτελεί ένα ψηφιακό, ασύρματο σύστημα τηλεπικοινωνιών γνωστό και ως IEEE 802.16 το οποίο προορίζεται για ασύρματα Μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN). Το WiMAX μπορεί να παρέχει ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση (Broadband Wireless Access – BWA) σε σταθερούς κόμβους έως 50Km και σε κινητούς κόμβους έως 5-15Km.

Η ονομασία WiMAX αποδόθηκε από το WiMAX Forum [53], το οποίο συστάθηκε τον Ιούνιο του 2001 για την διαλειτουργικότητα του προτύπου. Το WiMAX αποτελεί την συντομογραφία της έκφρασης "Worldwide Interoperability for Microwave Access" και είναι σχεδιασμένο να παρέχει 30 έως 40 Mbps ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Με την ενημέρωση του 2011 η ταχύτητα μπορεί να ανέβει έως το 1Gbps για καθορισμένους σταθμούς.

#### **2.5.4.7. Πρωτόκολλο WiFi**

Κατά την ερμηνεία της Wi-Fi Alliance [54], το Wi-Fi ορίζεται ως οποιαδήποτε συσκευή ασυρμάτου τοπικού δικτύου (Wireless LAN - WLAN), η οποία βασίζεται στα πρότυπα IEEE 802.11.

Τα δίκτυα WiFi χρησιμοποιούν τεχνολογίες ραδιοσυχνοτήτων, τις επονομαζόμενες 802.11, ώστε να παρέχουν ασφαλή, αξιόπιστη και γρήγορη ασύρματη συνδεσιμότητα. Το δίκτυο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σύνδεση ηλεκτρονικών συσκευών μεταξύ τους, στο Internet και σε ενσύρματα δίκτυα μέσω Ethernet διεπαφής. Τα δίκτυα WiFi λειτουργούν στις 2.4 και 5GHz μπάντες ραδιοσυχνοτήτων. Κάποια προϊόντα στην αγορά διαθέτουν και τις δύο συχνότητες (dual band). Η λειτουργία τους περιλαμβάνει και τις συνδέσεις υψηλών ταχυτήτων και είναι σχεδόν ίδια με αυτή των ενσύρματων δικτύων. Ωστόσο, δεδομένου ότι όλα τα σύγχρονα WLANs βασίζονται στα πρότυπα IEEE 802.11, το Wi-Fi καθίσταται συνώνυμο του WLAN. Ο δρομολογητής του δικτύου (access point), μπορεί να βρίσκεται σε απόσταση 20m σε εσωτερικό χώρο. Σε εξωτερικό περιβάλλον η τιμή της απόστασης μεγαλώνει.



### 2.5.5. Επιστημονικές στα πρωτόκολλα και στα λειτουργικά

Κατ' αρχήν υπογραμμίζεται πως όλα τα παραπάνω πρωτόκολλα μπορούν δυνητικά να αποτελέσουν και σημείο κατάρρευσης. Κάθε ασυνέχεια στη λειτουργία δικτύου WAN αποτελεί μείζον πρόβλημα για ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης (early warning) περιβαλλοντικών συμβάντων, καθώς μια τέτοια εφαρμογή δεν μπορεί να είναι "best effort".

Στην πορεία της έρευνας διεφάνη πως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν συνδέονται αποκλειστικά με το λειτουργικό TinyOS, το οποίο είχε πολύ ισχυρή παρουσία στην αρχή της έρευνας μας και ακόμη και σήμερα βέβαια είναι αρκετά ισχυρό και χρήσιμο προς το παρόν σε άλλη μικρότερη κλίμακα εφαρμογών. Συνεπώς η έρευνα στράφηκε και σε άλλες μεθόδους και ακολουθήθηκε μία από αυτές η οποία αναπτύσσεται στα επόμενα κεφάλαια.

Πριν εγκαταλειφθεί το TinyOS, έγινε αρκετή έρευνα για την εύρεση ενός εργαλείου που μέσω σχεδιαστικών οντοτήτων, αυτόματα θα παραγόταν κώδικας σε TinyOS. Κάτι τέτοιο υποστήριζε το εργαλείο οπτικοποίησης- visualization tool VIPTOS (Visual Ptolemy for TinyOS), το οποίο όμως δεν ήταν τελικά λειτουργικό. Επίσης, εγκαταλείφθηκε η προσπάθεια περαιτέρω ανάπτυξης και δημιουργίας νέων εκδόσεων από την ίδια την ερευνητική ομάδα του VIPTOS. Αξίζει να σημειωθεί πως μόνο στην εταιρεία Libellium έχει εντοπιστεί λογισμικό αυτόματης παραγωγής κώδικα για τους αισθητήρες (code generator), το οποίο είναι εύχρηστο και παράγει τον κώδικα που θα φορτωθεί στους αισθητήρες αναλόγως των χαρακτηριστικών που θα δώσει ο χρήστης.

Το επόμενο βήμα ήταν η αναζήτηση ενός πλαισίου εξομοίωσης ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, καθώς κάτι τέτοιο φάνηκε αναγκαίο για τη χωρική κλίμακα και τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής. Η ανάπτυξη δικτύου αισθητήρων υψηλής χωρικής πυκνότητας και ευρείας κλίμακας χωρίς να έχει προηγηθεί το στάδιο εξομοίωσης που εξασφαλίζει την επικοινωνία σε προβλέψιμο βαθμό, έχει σημαντικό ρίσκο σε σχέση με το κόστος της, καθώς σε τέτοιου είδους εφαρμογές απαιτούνται χιλιάδες αισθητήρες των οποίων το κόστος είναι υψηλό. Και σε αυτήν την περίπτωση ο TOSSIM δεν ήταν επαρκής, συνεπώς εγκαταλείφθηκε και η προσπάθεια εξομοίωσης με τον εν λόγω εξομοιωτή. Η λύση αναζητήθηκε σε άλλες υλοποιήσεις εξομοιωτών που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια. Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, μετά από αρκετή αναζήτηση φάνηκε πως ο εξομοιωτής που κατά προτεραιότητα ταίριαζε καλύτερα στην εφαρμογή μας ήταν ο SHAWN και στη συνέχεια ένας – δυο άλλοι συναφείς.

### 2.5.6. Ενέργεια

Όσο αφορά την τροφοδοσία των αισθητήρων σημειώνεται πως οι αισθητήρες που συναντώνται στο εμπόριο λειτουργούν κατά βάση με τέσσερις τρόπους.

- Μπαταρίες τύπου AA ή AAA
- Ηλιακή Ενέργεια
- Τροφοδοσία 220V
- Άλλοι τρόποι

Προφανώς ο τρόπος λειτουργίας με τροφοδοσία δικτύου απορρίπτεται εκ προοιμίου, καθώς κάτι τέτοιο προϋποθέτει την ύπαρξη δικτύου ηλεκτροδότησης και απευθύνεται σε εντελώς άλλου τύπου εφαρμογές. Οι μπαταρίες είναι μια αποδεκτή λύση, ωστόσο θέτουν περιορισμούς στον χρόνο ζωής του δικτύου και αυξάνουν το κόστος συντήρησης. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται μπαταρία που να έχει επαρκή διάρκεια της τάξης αρκετών ετών ώστε να δικαιολογείται το κόστος ενός τέτοιου εγχειρήματος. Περαιτέρω οικονομική μελέτη είναι εκτός της εμβέλειας της εργασίας αυτής.

Ως υπό συνθήκες αποδεκτή λύση φαίνεται να αποτελεί η τροφοδοσία μέσω ηλιακής ενέργειας από αντίστοιχους ενσωματωμένους συλλέκτες. Σε τέτοια υλοποίηση η απόδοση συναρτάται με την ηλιοφάνεια στην επιφάνεια του συλλέκτη, η δε ανάπτυξη της βλάστησης είναι προφανώς πρόβλημα. Με βάση τους σημερινούς περιορισμούς στην τεχνολογία των μπαταριών φαίνεται ότι απαιτείται η διαμόρφωση ενός μη-ευφυούς αισθητήρα με συχνά διαστήματα “sleep”, και του οποίου οι ενεργειακές ανάγκες να είναι περιορισμένες, ίσως και να περιορίζονται στην εκπομπή του σήματος μόνο κατά τη φάση συναγερμού.

Τέλος, ένας διαφορετικός τρόπος τροφοδοσίας από αυτούς που έχουν μέχρι τώρα αναφερθεί είναι η τροφοδοσία από χημική αντίδραση που μπορεί να προκληθεί με την υψηλή θερμοκρασία ή ακόμη και την καύση. Τέτοιοι αισθητήρες αναπτύσσονται από την εταιρία Sensible Solutions που αναφέρθηκε πιο πάνω και χρησιμοποιήθηκαν και στην εφαρμογή που περιγράφεται στην πορεία.

## **2.5.7. Ενδεικτικά σχετικά έργα**

### **2.5.7.1. Το ερευνητικό έργο *WiseBed***

Η τεχνολογία *WiseBed* [55], αποτελεί μια έτοιμη πλατφόρμα που δίνει την δυνατότητα σε κάποιον εύκολα, γρήγορα και απομακρυσμένα να υλοποιήσει ένα περιβάλλον δοκιμής (testbed) για WSN. Ο χρήστης δημιουργεί ένα κωδικό πρόσβασης και μπορεί να χρησιμοποιήσει την πλατφόρμα η οποία είναι καταμετρημένη σε μια πλειάδα ευρωπαϊκών πανεπιστημίων. Ο client του *WiseBed* παρέχεται τόσο για Windows όσο και για περιβάλλον ιστού (web). Το *WiseBed* αποτελεί παρακλάδι της ευρωπαϊκής δράσης FIRE (Future Internet Research and Experimentation), η οποία δεν θεωρεί το διαδίκτυο απλά ως ένα σύστημα επικοινωνίας αλλά την ραχοκοκαλιά της μοντέρνας κοινωνίας.

### **2.5.7.2. Η έννοια *Smart Cities***

Στην ευρωπαϊκή δράση αυτή [56], συνδυάζονται οι οντότητες κλιματικής αλλαγής, ενέργειας και ποιότητας ζωής, έτσι ώστε να βρεθούν τα καλύτερα σημεία λειτουργίας μιας πόλης. Παράλληλα εταιρείες όπως η Libellium [4,6,α], παρέχει λύσεις για παρακολούθηση θορύβου, αερίων, μόλυνσης, στατικής κτιρίων, σκουπιδιών.

### **2.5.7.3. Φροντίδα υγείας**

Πολλά ερευνητικά έργα εξελίσσονται στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης και πέραν από αυτή βέβαια. Αρκετά προγράμματα [57], [58] έχουν να κάνουν με την παρακολούθηση ασθενών σε

πραγματικό χρόνο μέσω αισθητήρων και άλλα με την παραγωγή μαθηματικών μοντέλων ασθενειών, στοιχεία για τις οποίες έχουν συλλεχθεί από αισθητήρες.

#### **2.5.7.4. Ερευνητικό έργο TIBUCON**

Το εν λόγω έργο ασχολείται με την παροχή συνολικής λύσης για την παρακολούθηση κτιρίων σε επίπεδο εγκαταστάσεων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC (heating, ventilation, and air conditioning)) [59].

#### **2.5.7.5. Ερευνητικό έργο makeSense**

Στο έρευνα που εκπονείται στα πλαίσια του “makeSense” [60], επιχειρείται η απλοποίηση του προγραμματισμού των ασυρμάτων αισθητήρων και της ολοκλήρωσής τους σε επιχειρησιακό και επιχειρηματικό περιβάλλον. Η ανάγκη για εύκολο τρόπο προγραμματισμού των αισθητήρων που έχει επισημανθεί νωρίτερα στο παρόν κεφάλαιο έχει γίνει ευρέως αντιληπτή και εκπονείται έρευνα στα πλαίσια ευρωπαϊκού έργου.

### 3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων για Περιβαλλοντικές Εφαρμογές

### 3.1. Γενικές Απαιτήσεις

Το πρόβλημα συνίσταται στην δημιουργία ενός αξιόπιστου και αποτελεσματικού δικτύου αισθητήρων στο δάσος, ώστε να είναι δυνατή η συλλογή μετρήσεων και κατ' ελάχιστον η συλλογή σημάτων συναγερμού σε πραγματικό χρόνο. Οι έννοιες "αξιόπιστο" και "αποτελεσματικό" πρέπει να οριστούν περαιτέρω, καθώς, επιπλέον των ζητημάτων αξιοπιστίας δικτύων, αυτές προσκρούουν στο ιδιαίτερο και ακανόνιστο περιβάλλον του τυχαίου φυσικού χώρου. Το περιβάλλον αυτό στην περίπτωση του δάσους χαρακτηρίζεται από το είδος και την κατανομή της βλάστησης, την τοπογραφία, τις καιρικές συνθήκες και ενδεχομένως και άλλους παράγοντες. Για κάποιους από τους παράγοντες αυτούς υπάρχει δυνατότητα εκτίμησης, ωστόσο κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει για την περίπτωση της χωρικής κατανομής των πιθανών σημείων τοποθέτησης αισθητήρων, η οποία είναι ασφαλώς μη ελεγχόμενη και επιπλέον εντελώς άγνωστη.

Η ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου σε μεγάλη κλίμακα θεωρείται ως πρόβλημα για αρκετούς λόγους. Πρώτον είναι η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα που θα μπορεί να λειτουργεί στις ιδιαίτερες και ενδεχομένως ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως είναι αυτές στο δάσος. Δεύτερον, όπως έχει ήδη αναφερθεί ζήτημα συνιστά η διάρκεια της ζωής της μπαταρίας του αισθητήρα και του δρομολογητή (gateway). Η συντήρηση του εν λόγω δικτύου αποτελεί μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Ως εκ τούτου θα πρέπει το δίκτυο να στηθεί έτσι ώστε να παρουσιάζει τις μικρότερες ανάγκες συντήρησης και χρονικά τις πιο αραιές.

Επόμενο σημαντικό πρόβλημα αποτελεί η χωρική κάλυψη μιας επιλεγμένης περιοχής με αισθητήρες. Αντικείμενο αναζήτησης αποτελεί η τοποθεσία του καθενός (η εύρεση μιας κατάλληλης θέσης), η τήρηση της επιθυμητής για τον εντοπισμό του φαινομένου απόστασης μεταξύ αισθητήρων, αλλά και η τοποθέτηση σε σχέση με τον δρομολογητή έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συνδεσιμότητα του δικτύου. Επίσης η τοπολογία του δικτύου αποτελεί παράμετρο απόφασης. Η τοπολογία και οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου αποτελούν σημαντικούς παράγοντες όχι μόνο για την συνδεσιμότητα (connectivity), αλλά και για την εφεδρεία (redundancy). Η αποστολή και λήψη ενός σήματος μέσα στο δίκτυο πρέπει να είναι κατά το δυνατόν εγγυημένη, διότι αυτός είναι και ο λόγος δημιουργίας ενός τόσο εκτενούς και ακριβού δικτύου, ιδιαίτερα για εφαρμογές έγκαιρης προειδοποίησης (early warning). Σημειώνεται ότι η κάλυψη της περιοχής ως προς τον εντοπισμού του φαινομένου (π.χ. πυρκαγιά) δεν είναι συνώνυμη με την κάλυψη ως προς τις απαιτήσεις συνδεσιμότητας του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση μια σημαντική παράμετρος και συνιστώσα του προβλήματος είναι το κόστος μιας εγκατάστασης δικτύου ευρείας κλίμακας.

Η ανάπτυξη δικτύου σε δασικές περιοχές, στην οποία εστιάζουμε στην εργασία αυτή, αναφέρεται σε ευρείας κλίμακας δίκτυα. Η αστοχία και η πιθανή αναποτελεσματικότητα σε τέτοια δίκτυα δεν είναι

επιθυμητά διότι αναιρούν το λόγο χρήσης τους. Ο σχεδιασμός του δικτύου θα πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους όπως την κατηγοριοποίηση των δασικών περιοχών και την εξασθένιση του σήματος για κάθε μια από αυτές. Η αστοχία σε ένα τέτοιας κλίμακας δίκτυο κοστίζει πολύ για να είναι αποδεκτή.

Ωστόσο, το προσδοκώμενο αποτέλεσμα από την εγκατάσταση και λειτουργία δικτύου ασυρμάτων αισθητήρων σε δασικές περιοχές και όχι μόνο, είναι μεγάλης σημασίας για την διατήρηση του δασικού πλούτου αλλά και για την εξοικονόμηση πόρων λόγω της πρόληψης και αποφυγής της πιθανής φυσικής καταστροφής. Πόρους που προφανώς θα έπρεπε να διαθέσει ο αρμόδιος φορέας για την αποκατάσταση εκτεταμένων ζημιών, αλλά και οικονομικά οφέλη που θα αποστερηθούν από τους κατοίκους των πληγέντων περιοχών σε περίπτωση υποβάθμισης του περιβάλλοντος.

### 3.2. Δείκτες Αξιολόγησης πιθανών διατάξεων

Οι άξονες βάσει των οποίων θα γίνει προσέγγιση του προβλήματος έχουν να κάνουν με την **αξιοπιστία** και το **κόστος** της υλοποίησης. Προφανώς αναζητείται μια καλή σχέση κόστους και αξιοπιστίας δικτύου. Δηλαδή αναζητείται η λύση ενός καλού και αξιόπιστου δικτύου σε ένα λογικό κόστος.

Όσο αφορά το ζήτημα της **αξιοπιστίας** αυτό αναλύεται επίσης σε μια πλειάδα παραγόντων. Κατ' αρχήν εξαρτάται από τον υπολογισμό της ελάχιστης ισχύος λήψης του σήματος που καθιστά επιτυχή την μετάδοση του σε πιθανές κατηγορίες δασικών περιοχών. Επί της ουσίας προτείνεται να υπολογιστεί η **εξασθένιση του σήματος** μέσω μοντελοποίησης και κατ' επέκταση η ελάχιστη και μέγιστη απόσταση τοποθέτησης του αισθητήρα από τον δρομολογητή. Η εξασθένιση αυτή δεν μπορεί να υπολογιστεί από γενικά μοντέλα για την κλίμακα των προβλημάτων που αντιμετωπίζουμε, καθώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν μεγάλη επίδραση όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Συνεπώς επιλέγεται η ελάχιστη απόσταση που εξασφαλίζει την επιτυχή μετάδοση του σήματος ανά μοντέλο δασικής περιοχής. Αυτό που καθιστά δύσκολο τον υπολογισμό της ισχύος λήψης του σήματος είναι η μη γραμμική και μη εντασσόμενη σε περιγραφή εξασθένισή του (*attenuation*) του λόγω της βλάστησης (πυκνής, αραιής, κ.α.), της τοπογραφίας και εν γένει του μη φιλικού δασικού περιβάλλοντος.

Επίσης, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των αισθητήρων αποτελεί και **διάρκεια ζωής του δικτύου**. Μετά από επαφές με φορείς που θα ήταν αρμόδιοι για την ανάπτυξη και διαχείριση τέτοιων δικτύων στην Ελλάδα, ως κάτω όριο τίθεται αυτό των τριών ετών αλλά είναι επιθυμητή η μεγαλύτερη διάρκεια από αυτό. Αν χρησιμοποιηθούν αισθητήρες με ηλιακούς συλλέκτες ή άλλης τεχνολογίας που τους καθιστά αυτόνομους τότε δεν τίθεται θέμα αλλαγής μπαταριών και η όλη συντήρηση του δικτύου γίνεται μόνο σε περίπτωση βλαβών. Το ερώτημα είναι θεωρητικό προς το παρόν, διότι δεν υπάρχουν τέτοιοι αισθητήρες που να είναι οικονομικοί και εύκολοι στην τοποθέτηση επί δέντρων. Το ίδιο ισχύει και για την τροφοδοσία των δρομολογητών, ωστόσο σημειώνεται πως οι δρομολογητές είναι πολύ λιγότεροι σε σχέση με τους αισθητήρες, άρα πιθανή ανάγκη για αλλαγή μπαταριών σε κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα, είναι συζητήσιμη.

Η έννοια της **εφεδρείας (redundancy)**, έχει να κάνει με τους εναλλακτικούς τρόπους λειτουργίας και την ανοχή που μπορεί να παρουσιάσει το δίκτυο σε πιθανές αστοχίες. Για παράδειγμα, αν ένας δρομολογητής τεθεί εκτός λειτουργίας, τότε θα πρέπει όσο το δυνατόν περισσότεροι από τους αισθητήρες που εξυπηρετούνταν από αυτόν να μπορούν να στείλουν τα δεδομένα τους από άλλη εφεδρική διαδρομή. Θα πρέπει λοιπόν όσο το δυνατόν περισσότεροι αισθητήρες να βρίσκονται στην εμβέλεια και άλλου δρομολογητή. Επίσης αν κάποιος αισθητήρας αστοχήσει και συμβεί γύρω του ένα έκτακτο γεγονός, τότε η απόσταση σε σχέση με τους γειτονικούς του πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ανιχνευθεί και πάλι το γεγονός αυτό. **Οι παράμετροι της εξασθένισης του σήματος και της εφεδρείας δικτύου αποτελούν βασικά συστατικά των απαιτήσεων από την τοπολογία του δικτύου.**

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες αναφέρονται στην **αξιοπιστία** ενός δικτύου ασυρμάτων αισθητήρων. Ωστόσο, βασικός ανταγωνιστής της αξιοπιστίας είναι το κόστος. Ισχύει και εδώ ο γενικός κανόνας ότι όσο πιο "αξιόπιστο" είναι ένα δίκτυο τόσο πιο ακριβό είναι. Για παράδειγμα όσοι περισσότεροι δρομολογητές τοποθετηθούν υπό την σκέψη της εφεδρείας δικτύου, τόσο περισσότερο αυξάνεται και η τιμή, καθώς ο δρομολογητής (gateway) είναι η πιο ακριβή συσκευή του δικτύου. Συνεπώς, αναζητείται εκείνη η λύση που παρέχει καλή αξιοπιστία και λειτουργικότητα δικτύου σε μια λογική τιμή. Άλλωστε, σε αυτές τις περιπτώσεις ένα δίκτυο θα πρέπει να είναι οπωσδήποτε αποτελεσματικό καθώς σε διαφορετική περίπτωση δεν υπάρχει λόγος ανάπτυξής του. Αυτό που μπορεί να είναι μεταβλητό είναι το επίπεδο εφεδρείας που μπορεί να έχει. Πάντως όσο αφορά την βασική αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία του δικτύου εκεί δεν τίθεται θέμα κόστους.

### 3.3. Ερευνητική προσέγγιση

Η λύση του προβλήματος μπορεί να προσεγγιστεί με αρκετούς τρόπους. Ωστόσο, γίνεται εστίαση στην επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας που θα εγγυάται όσο το δυνατόν περισσότερο την εφεδρεία δικτύου και την συνδεσιμότητα, πάντα σε συνάρτηση με το ολικό κόστος κτήσης, εγκατάστασης και λειτουργίας.

Το κλειδί για τα παραπάνω και το πρώτο βήμα πριν από μια ευρείας κλίμακας εγκατάσταση δικτύου είναι η εξομοίωση. Η έρευνα αυτή από την πρώτη στιγμή αναζήτησε ένα κατάλληλο εργαλείο εξομοίωσης, με δεδομένο ότι σχετικά πρόσφατα οι εξομοιωτές για WSN, δεν ήταν σε αρκετά ώριμη φάση. Επιπλέον, οι γνωστοί εξομοιωτές των ενσύρματων δικτύων ns-2 [61] και glomosin [62] δεν ήταν κατάλληλοι για να περιγράψουν τα WSNs. Παράλληλα λοιπόν με την βέλτιστη τοπολογία αναζητήθηκε και το καταλληλότερο από τα υπάρχοντα πακέτα λογισμικού εξομοίωσης WSNs.

Όσο αφορά την τοπολογία, η πρώτη προσέγγιση για την κάλυψη ευρείας έκτασης δασικής περιοχής με δίκτυα αισθητήρων υψηλής χωρικής πυκνότητας, ήταν η τοπολογία πλέγματος (grid). Εναλλακτική τοπολογία αποτελούσε η τοπολογία πλέγματος κυψελών με επικαλύψεις. Στο κεφάλαιο 2 έχουν ήδη αναλυθεί οι εν λόγω τοπολογίες και οι αδυναμίες της τοπολογίας πλέγματος αναφορικά με το δίκτυο που θέλουμε να υλοποιήσουμε. Εκ των πραγμάτων λοιπόν για λόγους εφεδρείας στις κυψέλες,

εύκολης επεκτασιμότητας, μικρής πολυπλοκότητας της λειτουργίας του δικτύου και συνδεσιμότητας περιμετρικά του δρομολογητή σε σταθερές αποστάσεις, η τοπολογία πλέγματος κυψελών με επικαλύψεις υπερτερεί.

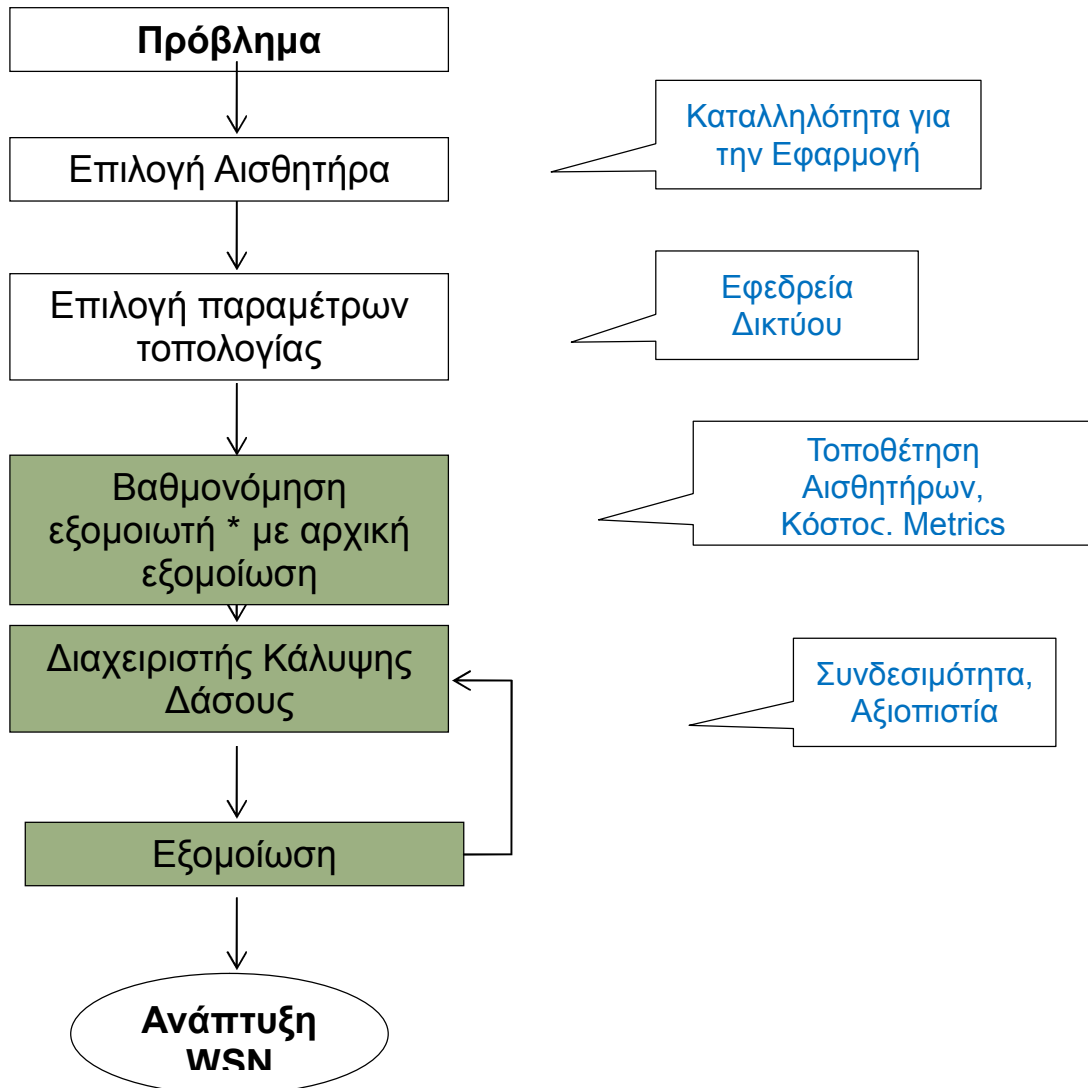
Όσο αφορά την εξομοίωση κρίθηκε κατ' αρχήν αναγκαία η κατηγοριοποίηση δασικών περιοχών σε περιοχές με πολύ αραιή, αραιή, μέτρια, πυκνή και πολύ πυκνή βλάστηση. Στη συνέχεια εκτελέστηκε πείραμα πεδίου με στόχο τη συλλογή μετρήσεων από δασικές περιοχές στήνοντας ένα μικρό WSN και υπολογίζοντας την εξασθένιση σήματος ανά κατηγορία δασικής περιοχής. Στο πείραμα αυτό, υλοποιήθηκε τοπολογία αστέρα με μεταβλητό μήκος ακτίνας σε διάφορες συνθήκες βλάστησης, ξηρασίας και υψομετρικής διαφοράς.

Στη συνέχεια έπρεπε να διερευνηθεί εάν τα αποτελέσματα επαληθεύονται από τους υπάρχοντες εξομοιωτές, ώστε να αναζητηθούν μοντέλα εξομοίωσης που θα περιγράφουν επιτυχώς τις δασικές περιοχές όσο αφορά την εξασθένιση του σήματος και κατ' επέκταση την επιτυχή αποστολή και λήψη αυτού.

Εξετάστηκαν διάφοροι εξομοιωτές οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Τελικά πιο διεξοδική δουλειά έγινε σε τρεις εξομοιωτές, λόγω σημαντικών προβλημάτων σε αυτούς ως εργαλεία εργασίας. Οι τρεις εξομοιωτές έπρεπε να συγκριθούν και μεταξύ τους βάσει ενός κοινού σεναρίου, ώστε να αξιολογηθεί το παραγόμενο αποτέλεσμα και των τριών, η ακρίβειά τους και η απόκλισή τους από τις πραγματικές μετρήσεις στο δάσος. Σημειώνεται πως η εξομοίωση WSNs πριν την ανάπτυξή τους σε ευρεία κλίμακα στο δάσος είναι σημαντική, καθώς τα αποτελέσματα σχετίζονται αφενός με το κόστος και αφετέρου με την συνδεσιμότητα ώστε να υπάρχει αξιοπιστία της εφαρμογής.

Σε φάση που έπεται της εξομοίωσης αναζητήθηκε και ένας διαχειριστής κάλυψης δασικής περιοχής ο οποίος έχει στόχο τη δημιουργία ενός εφικτού δικτύου σχετικά με το πού θα τοποθετηθεί ο κάθε αισθητήρας (συντεταγμένες), βάσει προδιαγραφών του προβλήματος και τα σχετικά μετρικά μεγέθη. Η εύρεση των συντεταγμένων τοποθέτησης του κάθε αισθητήρα δεν είναι πολύ εύκολη υπόθεση καθώς τα δέντρα είναι διάσπαρτα στο δάσος και η πυκνότητά τους δεν είναι σταθερή ούτε δεδομένη.

Η δομή της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος και οι διεργασίες που επιτελούνται ή εξασφαλίζονται ανά στάδιο παρατίθενται στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 31):



Εικόνα 31: Το διάγραμμα ροής επίλυσης του προβλήματος

### 3.4. Εξομοίωση Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων

#### 3.4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται με λεπτομέρεια τα δύο βασικά σημεία συνεισφοράς στην προσέγγιση της λύσης του προβλήματος. Γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα της εξομοίωσης και εξάγονται μοντέλα για την εξομοίωση περιοχών με αραιή και πυκνή βλάστηση. Στη συνέχεια αναπτύσσεται ευριστικός αλγόριθμος για την διαχείριση και κάλυψη περιοχής με αισθητήρες. Δίδεται ιδιαίτερη μέριμνα στην πραγματική τοπογραφία του δάσους η οποία διαφέρει σημαντικά από την ιδανική ή θεωρητική καθώς και στην πολυπλοκότητα και στο πλήθος επαναλήψεων του αλγορίθμου.



### 3.4.2. Η τρέχουσα κατάσταση

Έχει εκπονηθεί ένας σημαντικός αριθμός μελετών σχετικά με υπάρχοντες εξομοιωτές. Επίσης η προσπάθεια μερικών επιστημόνων στην κατεύθυνση αντιμετώπισης κάποιων δυσκολιών υπαρχόντων εξομοιωτών, τους οδήγησε στην δημιουργία νέων.

Αρχικά μια έρευνα άξια αναφοράς έχει γίνει στο επίπεδο της αξιολόγησης των εξομοιωτών OMNET++, NS-2, OPNET [63], με κριτήρια την σύγκρισή αυτών σε σημεία λειτουργίας και εκτέλεσης του σεναρίου εξομοίωσης όπως ο χρόνος εκτέλεσης και η χρήση της μνήμης. Αυτή η σύγκριση έδειξε ότι το OMNET πλεονεκτεί σε αυτά τα σημεία καθώς επίσης φάνηκε πως ήταν καταλληλότερο των άλλων για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές και πιο προσαρμοστικό στα ζητούμενα του πειράματος.

Επίσης μια έρευνα του 2010 [64], προσπάθησε να αναδείξει τα χαρακτηριστικά αλλά και τους περιορισμούς σε μια μεγάλη γκάμα εξομοιωτών. Η μεθοδολογία της στηρίχθηκε ως επί το πλείστον σε βιβλιογραφική καταγραφή των χαρακτηριστικών και στο τέλος διεξήχθη μια περιπτωσιολογική μελέτη για την σύγκριση του ns-2, του TOSSIM και του Shawn. Το σενάριο εξομοίωσης, κοινό για όλους, περιοριζόταν στην αποστολή ενός broadcast μηνύματος και τα κριτήρια αξιολόγησης ήταν ο προσδιορισμός της χρήσης της CPU καθώς και της κατανάλωσης μνήμης. Το πείραμα αυτό δεν προσδίδει ισχυρά επιχειρήματα σχετικά με την ζωτικής σημασίας παράμετρο αυτήν της ακρίβειας. Παρουσιάζει όμως ανάγλυφα τα χαρακτηριστικά που αποτελούν επιχειρήματα μη χρήσης εξομοιωτών σε WSN, σχετικά με τον ns-2 ο οποίος υποστηρίζει μόνο δύο ασύρματα MAC πρωτόκολλα και σχετικά με τον GloMoSim, ο οποίος περιορίζεται σε IP δίκτυα λόγω του τρόπου σχεδιασμού του. Ο ns-2 μπορεί πρακτικά να εξομοιώσει έως 1.000 κόμβους και θεωρητικά μέχρι 10.000. Ο GloMoSim σε θεωρητικό επίπεδο μπορεί να εξομοιώσει έως 100.000 κόμβους.

Τη δυσκολία αυτή διαπιστώσαμε και στην έρευνα μας, καθώς δεν μας ήταν ξεκάθαρος ο τρόπος της χρήσης των δύο αυτών εξομοιωτών σε WSN, τους οποίους είχαμε χρησιμοποιήσει πολύ στο παρελθόν για την μοντελοποίηση ενσυρμάτων και ασυρμάτων δικτύων. Ωστόσο, τα WSN έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως την χαμηλή ισχύ, την κατανάλωση ενέργειας και το sleep mode κ.α. Επίσης, εκτενής αναφορά γίνεται και στο πρόβλημα που εμείς αντιμετωπίσαμε το 2008 καταβάλλοντας μεγάλη προσπάθεια για την εξομοίωση ενός WSN στον TOSSIM, όπου οι αισθητήρες θα έπρεπε να έχουν διαφορετικές τιμές μέτρησης θερμοκρασίας, για να καταλήξουμε ότι κάτι τέτοιο τελικά δεν γίνεται καθώς όλοι οι κόμβοι του σεναρίου θα έπρεπε να είχαν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά και να τρέχουν τον ίδιο κώδικα (ομογενή δίκτυα). Εδώ ανέκυπτε ως θέμα το πώς θα μπορούσε ένας εξομοιούμενος αισθητήρας να μας δώσει διαφορετική τιμή του μεγέθους που ανιχνεύει, αφού το σενάριο ήταν υποθετικό και όχι πραγματικό και όλοι οι αισθητήρες έτρεχαν τον ίδιο κώδικα. Επιπρόσθετα σχετικά με τον Cooja simulator του GontikiOS επισημαίνεται ο περιορισμός του πλήθους των ταυτοχρόνων εξομοιούμενων κόμβων στην μέχρι τότε έκδοσή του, κάτι που δρα αποτρεπτικά σε ευρείας κλίμακας δίκτυα. Σχετικά με τον Castalia, δεικνύεται η καταλληλότητά του για δίκτυα αισθητήρων αλλά επισημαίνεται πως παρέχει ένα γενικό μοντέλο το οποίο δεν χαρακτηρίζει καμία πλατφόρμα ανάπτυξης στην περίπτωση που κάποιος θα θέλει να αναπτύξει το δίκτυο με συγκεκριμένες μονάδες - motes. Αναφορά γίνεται και στον Avrora, ο οποίος δεν μπορεί να

μοντελοποιήσει κινούμενους κόμβους. Τέλος, ο Shawn καταγράφεται να εμφανίζει δυσλειτουργίες στα radio propagation properties, σημείο που εμείς τροποποιήσαμε λίγο τον κώδικα για την δική μας εφαρμογή.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως σε μια σχετικά πρόσφατη έρευνα του 2011 – [65], επισημαίνονται και πάλι οι αδυναμίες του NS-2 και TOSSIM σχετικά με την WSN εξομοίωση. Σχετικά με το OMNET++ προγραμματιστικό πλαίσιο και εξομοιωτή, σημειώνεται η δυνατότητά του να υποστηρίξει MAC πρωτόκολλα σε WSN, να εξομοιώσει την κατανάλωση ενέργειας και ελέγχου των καναλιών. Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμένα διαθέσιμα και υλοποιημένα πρωτόκολλα.

Μια άλλη ερευνητική ομάδα ανακοίνωσε τα αποτελέσματα της έρευνάς της το 2009 – [66], όπου εξέτασε ένα πλήθος εξομοιωτών για απαιτητικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα χαρακτηρίζεται ως κακή η συμπεριφορά του ns-2 για σενάριο εξομοίωσης πάνω από 100 κόμβους, καλή η απόκριση του OMNET++ και άριστη η απόδοση του TOSSIM για τα ίδια δεδομένα. Σχετικά με το OMNET++ αναφέρεται ότι η δρομολόγηση που υποστηρίζεται είναι επί της ουσίας η ad-hoc και επίσης ότι σε επίπεδο radio model υποστηρίζει Free Space Path Loss και 2-Ray Ground στην πειραματική φάση του λογισμικού Castalia.

Χαρακτηριστικό της ανάγκης για εξομοίωση είναι το γεγονός ότι οι εξομοιωτές απασχολούν πολύ την ερευνητική κοινότητα και διαρκώς όλο και περισσότερες έρευνες δημοσιεύονται στο αντικείμενο. Σε μια πολύ πρόσφατη έρευνα του 2012, [67], γίνεται βιβλιογραφική αναφορά σε μια ομάδα εξομοιωτών. Κύρια σημεία, αποτελούν η αναφορά στην ακρίβεια του TOSSIM η οποία σχετίζεται με την απλούστευση μέρους συμπεριφορών του εξομοιωτή για να έχουμε το ζητούμενο αποτέλεσμα. Σχετικά με τον ns-3 σημειώνεται ότι απουσιάζει ένα μοντέλο εφαρμογής και ότι στην πραγματικότητα δεν μπορεί να εκτελέσει τον πραγματικό κώδικα που τρέχει στους αισθητήρες, παρόλο που στη τεκμηρίωση του λογισμικού γίνεται λόγος για το αντίθετο. Επίσης στην έρευνα υποστηρίζεται πως ο ns-3 δεν μπορεί να αποδώσει καλά τα WSNs. Τέλος, όσο αφορά τον SHAWN αναφέρει χαρακτηριστικά ότι δεν παρέχει γραφικό περιβάλλον για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων, πράγμα που δεν ισχύει διότι υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής γραφικών με τον συνδυασμό του Disk Graph και του Edge Model, όπως θα αναφερθεί παρακάτω. Κάτι τέτοιο υλοποιήσαμε εμείς στην εργασία μας.

Οι έρευνες στο θέμα συνεχίζονται παράγοντας αποτελέσματα που βασίζονται στην σύγκριση χαρακτηριστικών όπως η κατανάλωση μνήμης και υπολογιστικής ισχύος, για διαφορετικούς πάντα εξομοιωτές, συμπεριλαμβανομένου και του πιο σύγχρονου ns-3 [68]. Δεικνύουν επίσης την μη καταλληλότητα των ns-2 και GLoMoSim για WSNs [69]. Τέλος, σε μια έρευνα [70], αναφέρονται και οι WSN πλατφόρμες που υποστηρίζει ο Cooja/MSPSim δηλαδή οι Tmote Sky και ESB/2, πλατφόρμες που δεν φαίνεται να τις υποστηρίζουν άλλοι εξομοιωτές. Συγκεκριμένα ο TOSSIM, υποστηρίζει micaZ.

Ο ns-3 [71], αποτελεί έναν εξομοιωτή διακριτών γεγονότων που έχει υλοποιηθεί για ερευνητικούς και ακαδημαϊκούς σκοπούς (GNU-GPLv2 license). Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά τον Μάρτιο του 2008 στο γνωστό συνέδριο SimuTools -2008. Αποτελεί μια πιο σύγχρονη και κοντινή προσέγγιση στα σύγχρονα δίκτυα και τις ανάγκες τους. Επί της ουσίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν emulator και

να είναι διασυνδεδεμένος σε πραγματικό χρόνο με τον έξω κόσμο, επιτρέποντας έτσι υλοποιήσεις με ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα.

Υποστηρίζει δίκτυα IP και μη IP δίκτυα. Μεγάλη πλειοψηφία τον χρησιμοποιεί για εξομοιώσεις ασυρμάτων IP δικτύων για Wi-Fi, WiMAX με πρωτόκολλα δυναμικής δρομολόγησης OLSR και AODV.

Επίσης ο ns-3 παρέχει μηχανισμό δημιουργίας χρονοδιαγραμμάτων που υποστηρίζει μια πλειάδα περιπτώσεων χρήσης "simulation-in-the-loop" για την αλληλεπίδραση με πραγματικά συστήματα. Για παράδειγμα ο Ns-3 μπορεί να δράσει σαν πλαίσιο διασύνδεσης και να προσδώσει χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας μεταξύ εικονικών μηχανών. Δεδομένου όμως ότι στην πραγματικότητα δεν μπορεί να τρέξει τον κώδικα που τρέχει στους αισθητήρες [67], ο ns-3 δεν κρίνεται αποτελεσματικός για την εξομίωση WSN.

Μια άλλη έρευνα σχετικά με την ακρίβεια του OMNET++ [72], κατέδειξε ότι ένας διορθωτικός παράγοντας απαιτείτο για την βελτιστοποίησή αυτής, καθώς τα αποτελέσματα της εξομίωσης έτειναν να είναι υπερεκτιμημένα.

Μια άλλη προσέγγιση στο ζήτημα της εξομίωσης μέσω πραγματικών πειραματικών μετρήσεων κατέληξε στην δημιουργία του εξομοιωτή Castalia [73], λογισμικό το οποίο μάλιστα συγκρίνει τις πραγματικές μετρήσεις με τα δεδομένα της εξομίωσης.

Ωστόσο, στην δική μας έρευνα, δεν ενδιαφέρει η αναφορά και η σύγκριση μεταξύ των εξομοιωτών σε επίπεδα χρήσης μνήμης και γενικώς κατανάλωσης υπολογιστικών πόρων, αλλά είναι ιδιαίτερης σημασίας το επίπεδο ακρίβειας των παραγομένων από τον simulator αποτελεσμάτων. Δηλαδή η ισχύς λήψης του σήματος, τα dbm, ή με άλλα λόγια η εξασθένιση αυτού (attenuation) από την πηγή είναι κρίσιμης σημασίας για την λειτουργία της εφαρμογής. Όσο αφορά την πολυπλοκότητα του συστήματος και τον συνεπαγόμενο χρόνο υπολογισμού, δεν θεωρούνται κρίσιμης σημασίας για την εφαρμογή της υλοποίησης ενός αξιόπιστου δικτύου, αρκεί οι υπολογισμοί και η επίλυση του προβλήματος να περατώνονται σε εύλογο διάστημα πολυωνυμικού χρόνου. Η χρήση διορθωτικού παράγοντα που προτείνει η έρευνα [72] καθώς και η λογική του Castalia [73] σε σχέση με πραγματικές μετρήσεις βρίσκονται πιο κοντά στην φιλοσοφία του δικού μας εγχειρήματος και στόχου.

Συγκεκριμένα, στην μεγάλη ανάγκη για εξομίωση που αντιμετώπισε η έρευνά μας έπρεπε να δοθεί μια άμεση απάντηση ως προς το ποιον εξομοιωτή να χρησιμοποιήσει κανείς αλλά και τον τρόπο με τον οποίο θα το κάνει αυτό. Δεδομένου ότι η ακρίβεια του εξομοιωτή αποτελούσε το πιο σημαντικό ζητούμενο, ακολουθήσαμε την μέθοδο σύγκρισης πειραματικών/πραγματικών μετρήσεων και μετρήσεων που προήλθαν από αποτελέσματα εξομίωσης τριών τελικά εξομοιωτών οι οποίοι επιλέχθηκαν από σύνολο έξι που αρχικά εξετάστηκαν. Τρεις εξ' αυτών αποκλείστηκαν από την σύγκριση για μια πλειάδα αιτιών που αναλύονται στο τέλος της ενότητας. Συνεπώς, στην δική μας προσέγγιση εκτελέστηκε ένα κοινό σενάριο σε τρεις εξομοιωτές, με ελάχιστες διαφορές σεναρίων μεταξύ τους, οι οποίες αφορούσαν τις ιδιαιτερότητες του κάθε ενός σε σχέση με την εξομίωση δασικών περιοχών και το μοντέλο βλάστησης, ώστε το τελικό σενάριο να μπορούσε να καταστεί

εκτελέσιμο και λειτουργικό σε όλους [74]. Στην επόμενη ενότητα παρατίθεται ένας πίνακας ο οποίος συγκρίνει σε βασικά σημεία τους τρεις εξομοιωτές.

### 3.4.3. Λογισμικά εξομοίωσης Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων

#### 3.4.3.1. TOSSIM

Ο εξομοιωτής TOSSIM [75, 76] (Tiny OS SIMulator), εμπεριέχεται στην έκδοση 2.x του TinyOS. Η λειτουργία του βασίζεται στην αντικατάσταση των συστατικών της εφαρμογής από στιγμιότυπα εξομοίωσης. Ο TOSSIM αποτελεί έναν εξομοιωτή διακριτών γεγονότων. Μπορεί να προσεγγίσει με υψηλή αξιοπιστία την συμπεριφορά ενός δικτύου μέχρι και για 8192 κόμβους. Η χρήση του έχει βοηθήσει σημαντικά στην εύρεση και διόρθωση δυσλειτουργιών και λαθών (bugs) του συστήματος.

Αποτελεί απάντηση στις δυσλειτουργίες του ns-2 και του glomosim οι οποίοι, ως γνωστόν, παρέχουν αποσπασματική εξομοίωση ενός δικτύου και δεν θεωρούνται σε καμία περίπτωση κατάλληλοι για δίκτυα αισθητήρων. Επίσης, ανταποκρίνεται καλά στις περίπλοκες αλληλεπιδράσεις των motes μεταξύ τους αλλά και με το περιβάλλον. Έχει τη δυνατότητα να ακολουθεί το βασισμένο σε συστατικά - components, μοντέλο του TinyOS.

Ωστόσο, έχει τον περιορισμό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με TinyOS. Επίσης αρχικά δεν μπορούσε να προσεγγίσει την *κατανάλωση ενέργειας* καθώς και τον *χρονισμό της CPU*. Στη συνέχεια όμως στο Harvard University δημιουργήθηκε ο *Power TOSSIM*, ο οποίος δίνει λύση στο θέμα της κατανάλωσης και ενσωματώνεται πλέον στις εκδόσεις του TinyOS. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα του TOSSIM είναι η δυσκολία στην απεικόνιση του εξομοιούμενου δικτύου, χωρίς τη χρήση πρόσθετου λογισμικού. Επί του παρόντος, η μόνη πλατφόρμα που υποστηρίζεται από τον TOSSIM είναι η *micaz*.

Ωστόσο, μεγάλο πλεονέκτημα του TinyOS αποτελεί το γεγονός ότι ο κώδικας που μπορεί να εξομοιωθεί στον TOSSIM, ο ίδιος ακριβώς μπορεί να εγκατασταθεί και σε κάποιον controller τρέχοντας μία εκ των εντολών (αναλόγως του mote που θα χρησιμοποιήσουμε):

```
make micaz install
```

```
make mica2 install
```

```
make telosb install
```

Αυτό προσδίδει ιδιαίτερη ευελιξία στο εν λόγω λειτουργικό σύστημα.

#### Διαδικασία Μεταγλώττισης

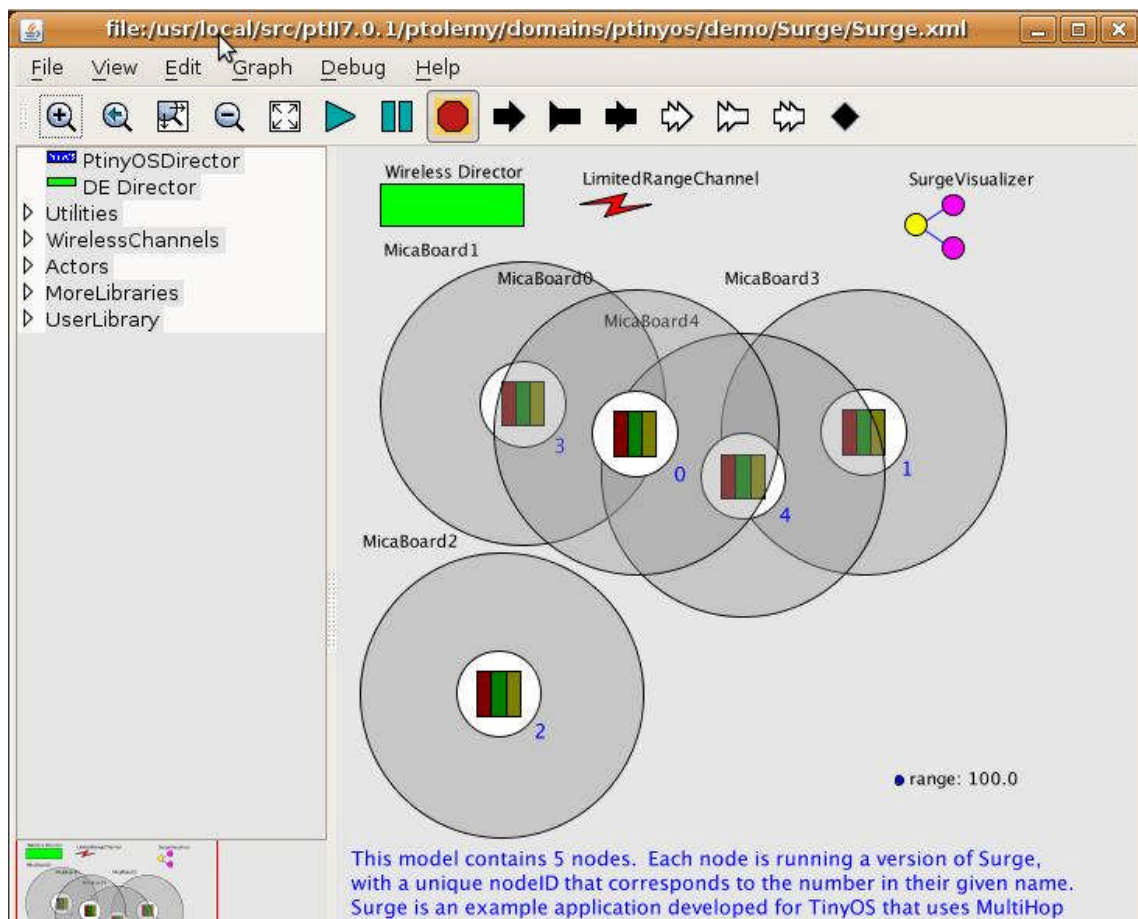
Η διαδικασία compile του TOSSIM αποτελείται από 5 βασικά βήματα.

Κατ' αρχήν δημιουργείται και αποθηκεύεται το xml schema της εφαρμογής στο αρχείο app.xml. Το αποτέλεσμα της μεταγλώττισης είναι ένα object αρχείο, το sim.o, το οποίο βρίσκεται στον κατάλογο build της πλατφόρμας. Στο επόμενο βήμα μεταγλωττίζονται οι C++ και Python διεπαφές. Το interface του python είναι χτισμένο πάνω από το αντίστοιχο της C++. Καλώντας ένα Python αντικείμενο,

καλείται μετά κι ένα C++ και στο τέλος καλείται ο TOSSIM από την C διεπαφή. Το object tossim.o περιέχει C++ κώδικα, ενώ το rytossim.o περιέχει την υποστήριξη για rython. Αυτά τα αρχεία πρέπει να γίνουν compile ξεχωριστά γιατί η C++ δεν καταλαβαίνει τον nesC και αντίστοιχα ο nesC την C++. Στη συνέχεια δημιουργείται το shared object και η shared library, η οποία περιέχει τον TOSSIM κώδικα, την υποστήριξη C++ και αυτήν του rython.

### 3.4.3.2. VIPTOS

Ένα σημαντικό εργαλείο οπτικοποίησης είναι το VIPTOS [77], [78], εντός του οποίου συνεργάζονται το Ptolemy και το λειτουργικό σύστημα TinyOS. Παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον με γραφικά το οποίο υποστηρίζει την διαδικασία της εξομοίωσης στα WSN. Επιτρέπει στους προγραμματιστές να φτιάχνουν μπλοκ διαγράμματα τα οποία αυτόματα μετατρέπονται σε nesC. Συνδυάζει τα καλά του TOSSIM και τον επεκτείνει παράλληλα. Μπορεί επίσης να εξομοιώσει ετερογενή δίκτυα. Το γραφικό του περιβάλλον όπως δεικνύεται στην εικόνα 32 είναι αρκετά ικανοποιητικό.



Εικόνα 32: Multihop routing στο VIPTOS [77].

Η διαδικασία εγκατάστασης του VIPTOS δεν είναι πολύ εύκολη σε unix περιβάλλοντα. Η εγκατάστασή του προϋποθέτει την εγκατάσταση του λογισμικού Ptolemy ως εξάρτηση λογισμικού και με τη σειρά του το πακέτο Ptolemy απαιτεί την ύπαρξη java. Επιπρόσθετα αρκετά από αυτά δεν είναι συμβατά με τις εκδόσεις του TinyOS 2.x. Οι εκδόσεις όλων των πακέτων θα πρέπει να είναι καλά συνεργαζόμενες και λειτουργικές πράγμα που δεν επιτυγχάνεται εύκολα. Στο παρελθόν υπήρχαν αρκετές

ασυμβατότητες. Αυτό από μόνο του αποτελεί μια σημαντική τροχοπέδη καθώς το VIPTOS ουσιαστικά αποτελεί ένα τρόπο χειρισμού του πρωτόγονου περιβάλλοντος του TinyOS.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ερευνητική ομάδα του VIPTOS, κατόπιν επικοινωνίας μας μαζί της στο κοντινό παρελθόν, μας ανακοίνωσε πως δεν έχει σκοπό να συνεχίσει την ανάπτυξη του εν λόγω λογισμικού. Ακόμη στην χρήση του παρουσιάστηκαν προβλήματα στην εξαγωγή κώδικα από μπλοκ διαγράμματα και σε γενικές γραμμές φάνηκε να μην μπορεί να υλοποιήσει όλα εκείνα τα οποία υποσχόταν.

### 3.4.3.3. NetTopo

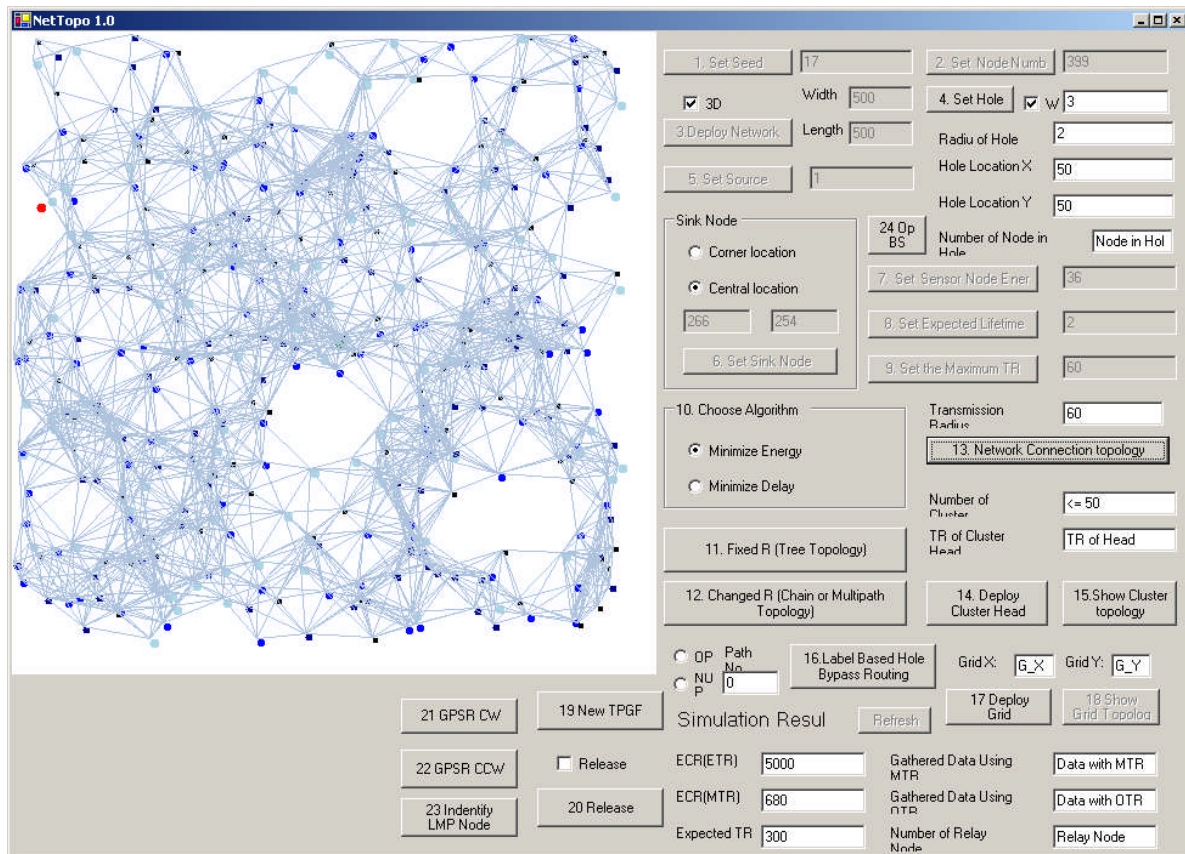
Ο πρωταρχικός στόχος του εργαλείου NetTopo. [79],[80],[81] ήταν να παρέχει εξομοίωση, οπτικοποίηση και βέβαια ακρίβεια. Είναι ανεξάρτητο πλατφόρμας καθώς ο κώδικας είναι γραμμένος σε java. Αποτελείται από ένα jar αρχείο και ένα εκτελέσιμο. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του NetTopo είναι η δυνατότητά του της οπτικοποίησης ενός δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται με το διάβασμα ενός xml string από τον δρομολογητή του δικτύου. Αυτό το πείραμα υλοποιείται σε μικρή κλίμακα με ένα Xbow testbed των έξι κόμβων.

Η εφαρμογή παρέχει στον χρήστη γραφικό περιβάλλον με διάφορες προεπιλογές ενώ η γραμμή εντολών δεν υποστηρίζεται. Το λογισμικό υποστηρίζει πλήρως αισθητήρες τεχνολογίας Crossbow και άλλους. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που μπορούν να εξομοιωθούν είναι τα GPSR και TPGF. Ένα σενάριο εξομοίωσης μπορεί να περιλαμβάνει έως και 400 κόμβους το πολύ και η περιοχή εξομοίωσης εκτείνεται έως τα 500m x 500m.

Ως συνέπεια αυτών των περιορισμών που παρουσιάζει, ο εξομοιωτής NetTopo δεν συνιστάται για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων.

Ένα στιγμιότυπο του προγράμματος, οθόνη, δεικνύεται στην εικόνα 33.

Στη κεντρική κονσόλα παρέχονται είκοσι τρία (23) συνολικά πεδία ρυθμίσεων για το δίκτυο. Σημειώνεται πως το περιβάλλον κρίνεται αρκετά δύσχρηστο και χρειάζεται επέκταση. Επίσης το ζήτημα της ακρίβειας σε σχέση με πραγματικές μετρήσεις περιβάλλοντος είναι ανοιχτό προς διερεύνηση.



Εικόνα 33: Στιγμιότυπο του εξομοιωτή NetTopo [79].

#### 3.4.3.4. OMNET++

Ένας ευρέως διαδεδομένος εξομοιωτής είναι το OMNET++ [82], [83], programming framework. Αποτελεί έναν αρθρωτό, αντικειμενοστραφή εξομοιωτή δικτύου διακριτών γεγονότων. Υποστηρίζει γραφικό περιβάλλον και βέβαια γραμμή εντολής. Χρησιμοποιεί γλώσσα προγραμματισμού NED, με την οποία μπορεί να γίνει ευκολότερη η περιγραφή δικτύου. Κάθε μοντέλο - δίκτυο περιγράφεται από μονάδες οι οποίες περιέχουν τους αλγορίθμους του μοντέλου και περιγράφουν την λειτουργία του εξομοιωτή. Οι μονάδες μπορεί να είναι απλές ή σύνθετες.

Για την αναπαράσταση γεγονότων στον OMNET++ χρησιμοποιούνται μηνύματα. Τα μηνύματα επίσης χρησιμοποιούνται και στην επικοινωνία μονάδων μεταξύ τους.

Το εργαλείο οπτικοποίησης είναι πολύ ενδιαφέρον καθώς υποστηρίζει αρκετές δράσεις κατ' επιλογήν, απλά με το πάτημα πλήκτρων, όπως η εκτέλεση προγράμματος και η εξέταση αντικειμένων. Επίσης υποστηρίζεται και η εσωτερική εξέταση κόμβων με διπλό πάτημα πάνω στον κόμβο αναφοράς. Μια σημαντική καινοτομία του OMNET++ που αξίζει να σημειωθεί είναι η δυνατότητα απεικόνισης κινούμενων κόμβων απευθείας σε Google Maps.

Η τεκμηρίωση που συνοδεύει το OMNET++ κρίνεται αρκετά ικανοποιητική και η προγραμματιστική διεπαφή του σχετικά βαθιά. Η διαδικασία εγκατάστασης θεωρείται δύσκολη και απαιτεί αρκετά πακέτα.

Η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα του OMNET++ σχετικά με εξομοιώσεις WSN συζητείται στο επόμενο κεφάλαιο.

Ως πρόσθετα χαρακτηριστικά του OMNET αναφέρεται ότι ο χρήστης μπορεί να έχει διαφορετικές περιγραφές δικτύου σε διαφορετικά αρχεία. Ο ορισμός των modules είναι σαφώς πιο εύκολος από ό,τι στο TinyOS. Στην εικόνα 34 παρατίθεται ένας τυπικός ορισμός δικτύου σε NED.

```
network wirelessLAN: WirelessLAN

parameters:

    numUsers=10,

    httpTraffic=true,

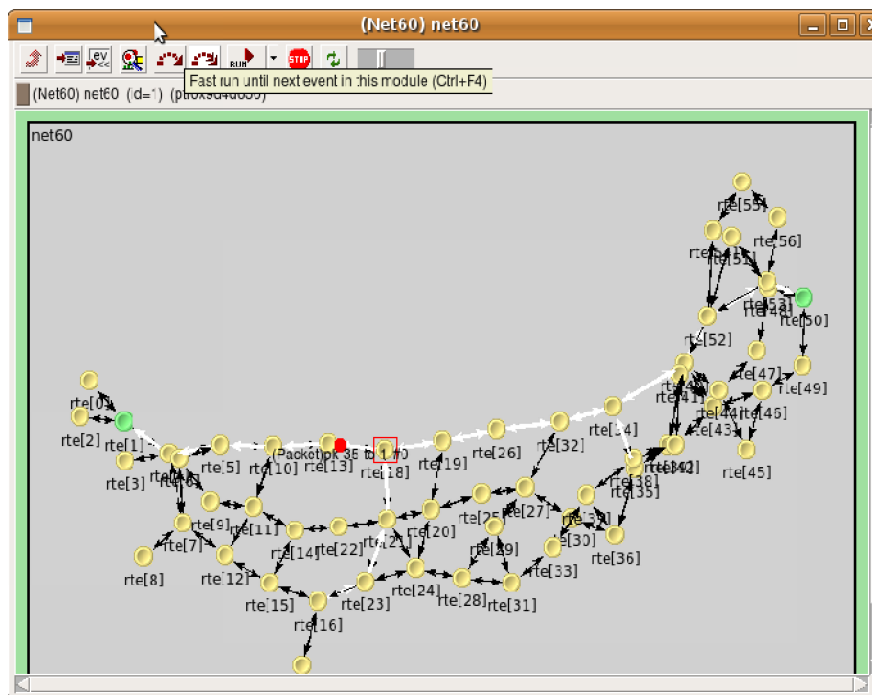
    ftpTraffic=true,

    distanceFromHub=truncnormal(100,60);

endnetwork
```

Εικόνα 34: Τυπικός ορισμός δικτύου σε NED [83].

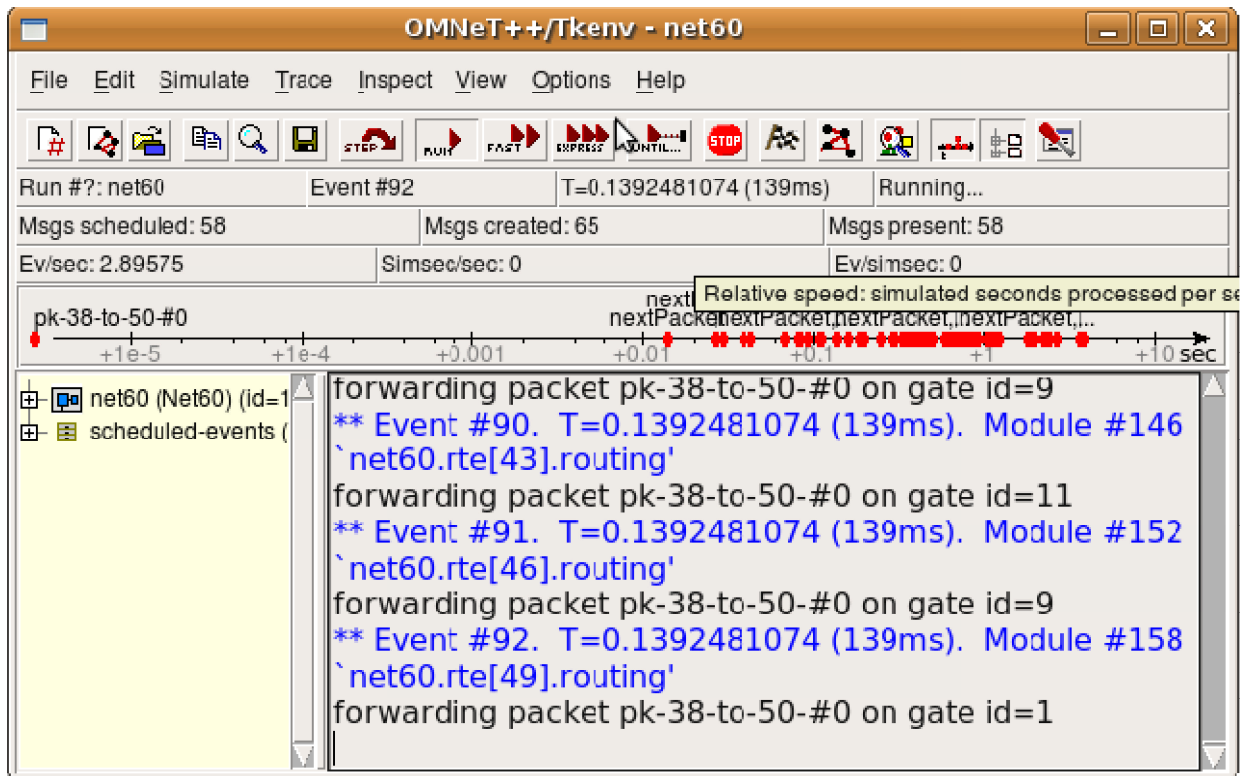
Στη συνέχεια παρατίθεται ως στιγμιότυπο η τοπολογία ενός δικτύου (εικόνα 35).



Εικόνα 35: Στιγμιότυπο τοπολογίας ενός δικτύου [83].

Επίσης, έπεται μια οθόνη του βασικού tk περιβάλλοντος και των μηνυμάτων εξόδου (εικόνα 36).





Εικόνα 36: Βασικό tk περιβάλλον και μηνύματα εξόδου [83].

Σχετικά με την ό,τι αφορά την εξομοίωση, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει το αρχείο omnetpp.ini, το οποίο περιέχει όλες τις παραμέτρους του σεναρίου εξομοίωσης και ελέγχει τις διαδικασίες. Στο αρχείο αυτό αποδίδονται οι τιμές των παραμέτρων των μονάδων και ορίζονται οδηγίες για τον τρόπο που θα εκτελείται το κάθε σενάριο εξομοίωσης. Συγκεκριμένα, εδώ δηλώνουμε ένα πλήθος από παραμέτρους όπως: το όνομα του δικτύου, τις συντεταγμένες των αισθητήρων, αν και αυτές μπορούν να γίνουν include και από ένα άλλο αρχείο με επέκταση ini, τα χαρακτηριστικά της κεραίας και το είδος της εξασθένισης διαδρομής και εξασθένισης βλάστησης.

Χαρακτηριστικό απόσπασμα αυτού του αρχείου [84], και σχετικά με τις μετρήσεις πραγματικού χρόνου στο πείραμα που εκπονήθηκε από την ερευνητική ομάδα δεικνύονται παρακάτω:

```
#omnetpp.ini

[General]

ini-warnings = yes

preload-ned-files=*.ned

network = sim4

[Parameters]

sim4.verbosity=2

#-----
# PENTELEI PARAMETERS
#-----
```

```

#include node_locations_penteli.ini

#sim4.numNodes = 32

#-----

# KAISARIANI PARAMETERS

#-----
include node_locations_kaisariani.ini
sim4.numNodes = 17
#-----
sim4.display_X_size = 800
sim4.display_Y_size = 600
*.node[1].nodeID = 701
*.node[1].nodeType = "sensor"
*.node[1].xCoord = 487104.900
*.node[1].yCoord = 4213917.470
*.node[1].zCoord = 464.005
[
.....
#-----
#RF MODEL PARAMETERS
#-----
sim4.rf_module.useRF = 1
sim4.rf_module.frequency_GHz = 0.433
sim4.rf_module.transmitPower = 10
sim4.rf_module.transmitPowerUnit = "mW"
sim4.rf_module.receiverSensitivity_dBm = -112
sim4.rf_module.transmitterAntennaGain_dB = 2
sim4.rf_module.receiverAntennaGain_dB = 2
sim4.rf_module.foliage = true
sim4.rf_module.leaf = 1
sim4.rf_module.foliagePathFactor = 0.5
sim4.rf_module.receiverHeight_m = 1.5
sim4.rf_module.transmitterHeight_m = 1.5
sim4.rf_module.std_dev_dBm = 0
#RF SUBMODULE TYPE PARAMETER ASSIGNMENT
sim4.rf_module.core_ModuleType = "core1"
sim4.rf_module.path_loss_ModuleType = "multipath_approximation"
sim4.rf_module.foliage_loss_ModuleType = "weissberger"
sim4.rf_module.comm_in_ModuleType = "comm_in1"
sim4.rf_module.comm_out_ModuleType = "comm_out_rng"
#RF SUBMODULES PARAMETERS
sim4.rf_module.pl_module.log_distance_exponent = 2.1
sim4.rf_module.comm_out_modul.communicationProbability = 0.90

```

Εικόνα 37: Απόσπασμα του omnetpp.ini [84]

### 3.4.3.5. CASTALIA

Το λογισμικό Castalia [73], [85], αποτελεί έναν σχετικά νέο εξομοιωτή αποκλειστικά για WSNs, ο οποίος έχει την βάση του στο OMNET++. Ο κύριος στόχος του είναι τόσο η μεγαλύτερη ακρίβεια στην επικοινωνία όσο και στα modules καναλιών και ραδιοσυχνότητων. Το Castalia δημιουργήθηκε προσπαθώντας να δώσει απάντηση στο ζητούμενο των πιο ρεαλιστικών εξομοιώσεων και αποτελεσμάτων σε σχέση με τον πραγματικό κόσμο.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του εξομοιωτή αυτού αποτελεί το γεγονός ότι δεν εξαρτάται από την πλατφόρμα (mote) που θα χρησιμοποιηθεί. Επίσης η οντότητα Resource Manager που

περιλαμβάνεται στην αρχιτεκτονική του μπορεί να δώσει αποτελέσματα για την κατάσταση της CPU αλλά και για την ενέργεια που καταναλίσκεται στην επικοινωνία RF. Η δομή του Castalia είναι σύμφωνη με το μοντέλο του OSI, καθώς ξεκινώντας από το επίπεδο του radio/ ραδιοσυχνότητας φτάνουμε στο τέλος σε αυτό της εφαρμογής.

Η διαδικασία εγκατάστασης είναι βατή δεδομένου ότι προϋπάρχει το OMNET++. Παράλληλα περιγράφεται επαρκώς και στο εγχειρίδιο εγκατάστασης. Το Castalia πλέον συνοδεύεται και από εργαλείο οπτικοποίησης καθώς μετά από τρία (3) περίπου χρόνια τον Απρίλιο του 2012, ανακοινώθηκε σε γνωστό συνέδριο ο Castalia Network Animator [86]. Η έλλειψη του αποτελούσε αξιοσημείωτη αδυναμία ενός εξομοιωτή κατ' εξοχήν φτιαγμένου για WSNs

Το αποτέλεσμα της εξομοίωσης του Castalia, περιλαμβάνεται σε ένα αρχείο εξόδου το Castalia-Primary\_Output.txt, το οποίο είναι αρκετά περιεκτικό και πυκνό.

Η λειτουργία του Castalia βασίζεται στα μηνύματα τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξομοίωση και την αλληλεπίδραση των μονάδων. Τα μηνύματα χωρίζονται σε μηνύματα ελέγχου και δεδομένων. Δεδομένου ότι το Castalia είναι εξομοιωτής του OMNET++, φέρει την ίδια δομή και οργάνωση των μερών του σε απλές και σύνθετες μονάδες. Η αρχική σύνθετη μονάδα είναι το Sensor Network (SN). Αυτή με τη σειρά της διαθέτει άλλες τρεις: το ασύρματο κανάλι (WirelessChannel simple module), τη φυσική διεργασία (PhysicalProcess simple module) και τον κόμβο (Node compound module). Στην εξομοίωση με το Castalia χρησιμοποιείται και πάλι το omnetpp.ini στο οποίο έχουν οριστεί οι νέες μονάδες εφαρμογής και οι επιπλέον παράμετροι του ασύρματου καναλιού.

Ένα στιγμιότυπο του omnetpp.ini [84], δεικνύεται παρακάτω, στην εικόνα 38.

```
#Application Module
SN.node[0].appModuleName = "gateway_ApplicationModule"
SN.node[1..].appModuleName = "sensor_ApplicationModule"
#...
SN.node[0].nodeApplication.applicationID = "gateway"
SN.node[1..].nodeApplication.applicationID = "sensor"
#Wireless Channel extra parameters
SN.wirelessChannel.Pld0_use_FSP = true
SN.wirelessChannel.f_GHz = 0.433
SN.wirelessChannel.Gr_dB = 2
SN.wirelessChannel.Gt_dB = 2
```

Εικόνα 38: Στιγμιότυπο του omnetpp.ini [84].

Σημειώνεται πως η σημαντική συνεισφορά του Castalia εντοπίζεται στα επικοινωνιακά μοντέλα, τα οποία φιλοδοξούν να παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ρεαλισμό σε σχέση με τον πραγματικό κόσμο.

### 3.4.3.6. SHAWN

Ο Shawn αποτελεί ένα ακόμη εξομοιωτή ανάμεσα στο πλήθος των άλλων. Ο κύριος στόχος του είναι η εξομοίωση των επιδράσεων ενός φαινομένου και όχι το φαινόμενο το ίδιο [87], [88]. Σε αντίθεση με άλλα εργαλεία εξομοίωσης ο Shawn εγκαθίσταται πολύ εύκολα, τουλάχιστον σε λειτουργικό σύστημα ubuntu. Ακολουθώντας τις οδηγίες εγκατάστασης ο χρήστης καταλήγει γρήγορα σε μια πλήρως λειτουργική και εκτελέσιμη πλατφόρμα. Βασικά χαρακτηριστικά του είναι η ταχύτητα και ο ρεαλισμός. Το wiki του Shawn φιλοξενείται από το sourceforge.net. Η μοντελοποίηση του MAC επιπέδου της εφαρμογής είναι η κύρια ιδέα (π.χ. απώλεια πακέτων, καθυστέρηση κ.α.). Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εξομοιώσει πολύ μεγάλα δίκτυα γρήγορα. Η πρόκληση των κόμβων για εκπομπή (polling) πραγματοποιείται σε μεγαλύτερα διαστήματα απ' ό,τι σε άλλους εξομοιωτές, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την ακρίβεια. Το χαρακτηριστικό αυτό του λογισμικού προσδίδει μεγαλύτερη ταχύτητα στην εξομοίωση.

Ένα τυπικό παράδειγμα αρχείου ρυθμίσεων σεναρίου εξομοίωσης δεικνύεται στην εικόνα 39.

```
random_seed action=load filename=.rseed
prepare_world edge_model=list 66omm._model=disk_graph \
    transm_model=stats_chain \
    range=1
chain_transm_model name=random_drop_chain
probability=0.1
chain_transm_model name=reliable
rect_world width=50 height=50 count=5000 processors=helloworld
simulation max_iterations=10
connectivity
dump_transmission_stats
```

**Εικόνα 39: Τυπικό παράδειγμα αρχείου ρυθμίσεων σεναρίου [88]**

Οι κόμβοι ανταλλάσσουν διάφορες πληροφορίες μεταξύ τους όπως μηνύματα “hello”, το πλήθος των κόμβων που κάποιος έχει γύρω του, τα πακέτα που στάλθηκαν, στατιστικά επικοινωνίας, την κατάσταση των κόμβων, την μεταξύ τους απόσταση κ.α.

Επίσης είναι δυνατό να εξαχθεί η τοπολογία σε γραφικό περιβάλλον εφόσον αυτό οριστεί στο σενάριο. Ένα σημείο που πλεονεκτεί ο εξομοιωτής είναι στον υπολογισμό της απόστασης με την χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου τυχαίας μεταβλητής. Ο Shawn υποστηρίζει αρκετά νευραλγικά θέματα των WSNs όπως κατανάλωση ενέργειας, απόσταση, συνδεσιμότητα και η απόδοσή του κρίνεται αρκετά καλή και εύκολη.

Ένα ιδιαίτερα αδύνατο σημείο του εξομοιωτή είναι η πολύ κακή, ελλιπή έως ανύπαρκτη τεκμηρίωση.

Για τις ανάγκες της έρευνάς μας ο κώδικας του εξομοιωτή έπρεπε να τροποποιηθεί σε κάποια σημεία ώστε να υποστηρίζει τα δεδομένα του σεναρίου μας.

Συγκεκριμένα, έπρεπε να γίνει διαχωρισμός των κόμβων σε αισθητήρες και σε δρομολογητές, καθώς δεν έπρεπε όλοι οι κόμβοι να στέλνουν δεδομένα προς όλους. Τώρα όσο αφορά την λειτουργία των κόμβων αυτή καθορίζεται από τους επεξεργαστές processors. Η εξομοίωση του σεναρίου και η δημιουργία του περιβάλλοντος εξομοίωσης “world”, επιτυγχάνεται με τα μοντέλα επικοινωνίας (communication model), το μοντέλο ακμών (edge model) και το μοντέλο εκπομπής (transmission model). Οι κόμβοι μπορούν να περιγραφούν και σε ένα xml αρχείο και γενικότερα σε ένα αρχείο μπορούν να περιληφθούν όλες οι πληροφορίες για όλους τους κόμβους του δικτύου (συντεταγμένες, κ.α.).

Έπεται ένα απόσπασμα από xml αρχείο (εικόνα 40), με την αρχικοποίηση των κόμβων του πειράματός μας στον φυσικό κόσμο [84].

```
<scenario>
<snapshot id="01">
<node id="130">
<location x="482643.800" y="4201487.850" z="352.672" />
<tag type="string" name="node_type" value="gateway"/>
</node>
<node id="131">
<location x="482643.140" y="4201487.600" z="352.672" />
<tag type="string" name="node_type" value="sensor"/>
</node>
<node id="132">
<location x="482670.810" y="4201489.210" z="358.672" />
<tag type="string" name="node_type" value="sensor"/>
</node>
//...
</snapshot>
</scenario>
```

Εικόνα 40: Απόσπασμα xml αρχείου αρχικοποίησης κόμβων στον “κόσμο” του Shawn [84].

Στη συνέχεια τροποποιήθηκε και το μοντέλο επικοινωνίας ώστε να μην εξετάζει την αμφίδρομη επικοινωνία, δεδομένου ότι αρχικά ο εξομοιωτής θεωρεί πως όλοι στέλνουν σε όλους. Επίσης τροποποιείται και η RFNTCommunicationModel κλάση, ώστε να ενσωματώνει όλες τις πιθανές εξασθενίσεις (είδη εξασθένιση μετάδοσης σήματος και εξασθένιση βλάστησης). Παρακάτω, εικόνα 41, παρατίθεται ένα xml αρχείο παραμετροποίησης του μοντέλου RFNT, μέσα στο οποίο περιλαμβάνονται και χαρακτηριστικά σχετικά με τις κεραίες μας [84].

```
<scenario>
<environment>
<!-- =====
##### RF Environment and node info #####
==> In case u don't want a value comment whole line
===== -->
<tag type="group" name="RF">
<tag type="bool" name="use_RF" value="true"/>
<!-- ===== -->
<tag type="bool" name="RNG" value="true"/>
<!-- =====
This option decides the function of the comm model:
true: The comm model compares a random power value
with the receiver sensitivity. This value is generated
by the normal distribution with mean value the mean
path loss and standard daviation the respective value.
149
```

```

Προσομοίωση Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων Υψηλής Χωρικής Πυκνότητας
false: The comm model compares the received power due
to mean path loss with the receiver sensitivity, or
computes the probability that a random value in its
distribution can be higher than the receiver sensitivity
===== -->
<tag type="double" name="Connectivity_Probability_Threshold" value="0.95"/>
<tag type="double" name="Confidence_Interval_Threshold" value="1"/>
<!-- ===== -->
<tag type="int" name="path_loss_model" value="2"/>
<!-- =====
"path_loss_model" defines the main model to use for
attenuation calculation due to propagation path.
Available Options Are:
0 - Free Space Propagation Model
1 - Log-Distance Model (d0=1m)
2 - Log-Distance Model (d0=variable)
3 - Egli Terrain Model
4 - Multipath Simple Model
5 - Multipath Analytic Model
default value is FSP if not defined here or in config
Foliage Model are added using the "foliage_model" tag
===== -->
<tag type="double" name="f_GHz" value="0.433"/>
<!-- ===== -->
<tag type="double" name="Pt" value="10"/>
<!-- =====
Pt_Unit must take one of the following values:
"mW" for milliWatts
"W" for Watts
"dBm" for decibels
ANY OTHER value will result in error
CASE MATTERS!!!
===== -->
<tag type="string" name="Pt_unit" value="mW"/>
<tag type="double" name="Receiver_Sensitivity_dBm" value="-112"/>
<tag type="double" name="Gt_dB" value="2"/>
<tag type="double" name="Gr_dB" value="2"/>
<!-- ===== -->
<tag type="bool" name="foliage" value="true"/>
<tag type="int" name="foliage_model" value="0"/>
<tag type="double" name="foliage_path_factor" value="0.6"/>
150
Προσομοίωση Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων Υψηλής Χωρικής Πυκνότητας
<!-- =====
FOLIAGE MODEL PARAMETERS
"foliage" decides weather we use or not a foliage model
"foliage_model" explicitly defines foliage model to use
Available options are:
0 - Early ITU Recommendation
1 - Weissberger Model
2 - COST235 'in leaf' vegetation
3 - COST235 'out of leaf' vegetation
default value if not defined here or in config is 0
"foliage_path_factor" is used to compute the depth
of vegetation across the propagation path. MUST be a
value between 1 and 0. In any other case or with negative
values a 50% path is used.
===== -->
<tag type="double" name="hr_m" value="1.5"/>
<tag type="double" name="ht_m" value="1.5"/>

```

```
<tag type="double" name="n" value="2" />
<tag type="double" name="std_dev_dBm" value="5" />
</tag>
</environment>
</scenario>
```

Εικόνα 41: Παραμετροποίηση RFNT model ("RF" Group Tag – ομαδική ετικέτα) [84].

Τέλος ορίζονται και τρεις επεξεργαστές, ένας για τον δρομολογητή, ένας για τους αισθητήρες και ένας που θα αναλάβει την υλοποίηση των αισθητήρων και δρομολογητών.

### 3.5. Επιλογή Λογισμικών Εξομοίωσης

Από τους πιο γνωστούς και δημοφιλείς εξομοιωτές που αναφέραμε προηγουμένως και οι οποίοι είναι κατάλληλοι για WSN, απερρίφθησαν από περαιτέρω διερεύνηση οι TOSSIM, VIPTOS και NetTopo. Στην μέχρι τώρα πορεία της αναφοράς μας στους εξομοιωτές, έχει γίνει σχεδόν σαφές γιατί αυτοί δεν εξετάστηκαν. Συνοψίζοντας τις βασικές αδυναμίες του έχουμε τα εξής:

- **TOSSIM:**

Παρέχει πρωτόγονο και δύσχρηστο προγραμματιστικό περιβάλλον.

Επίσης ο κάθε αισθητήρας τρέχει ένα κλώνο του λογισμικού, δεδομένου ότι ο TOSSIM είναι φτιαγμένος για ομογενή περιβάλλοντα. Στην δική μας περίπτωση ο κάθε κόμβος θα έπρεπε να τρέχει λίγο διαφορετικό κώδικα στην εξομοίωση για να μπορεί να μας δώσει διαφορετικές τιμές στην προσομοίωση μέτρησης θερμοκρασίας. Δεν είναι δυνατόν όλοι οι αισθητήρες να μετρούν την ίδια θερμοκρασία.

- **NetTopo:**

Δεν είναι κατάλληλος για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές WSN καθώς υποστηρίζει έως 400 κόμβους.

Επιπροσθέτως, το γραφικό περιβάλλον προγραμματισμού που ουσιαστικά παρέχει στον χρήστη πεδία για συμπλήρωση, δεν είναι τόσο λειτουργικό και χρηστικό όσο αρχικά μπορεί να εικάσει κανείς.

- **VIPTOS:**

Το VIPTOS συνεργάζεται μόνο με TinyOS έκδοσης 1.x που ήδη είναι πολύ ξεπερασμένη. Άρα αυτό από μόνο του αποτελεί ένα μεγάλο σημείο αδυναμίας. Κατόπιν επικοινωνίας με την ομάδα ανάπτυξης του, μας έγινε γνωστό πως δεν είχαν πρόθεση να συνεχίσουν την υποστήριξη και την αναβάθμιση του λογισμικού. Τέλος η λειτουργία της δημιουργίας κώδικα NESL από μπλοκ διαγράμματα, κάθε άλλο παρά εύκολη, χειροπιαστή και υλοποιήσιμη απεδείχθη.

Ως εκ τούτου το ενδιαφέρον εστιάστηκε στους εξομοιωτές OMNET++, Castalia και Shawn, στους οποίους εκτελέστηκε ένα σχεδόν ίδιο σενάριο εξομοίωσης και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματά τους με πειραματικές μετρήσεις στον φυσικό κόσμο. Λέγοντας σχεδόν ίδιο σενάριο, εννοούμε πως πραγματοποιήθηκαν κάποιες μικρές παρεκκλίσεις ώστε να μπορεί να υποστηριχθεί η εξομοίωση από το εκάστοτε λογισμικό αναλόγως των χαρακτηριστικών του, χωρίς να αλλοιώνεται το εξομοιούμενο σενάριο.



## 4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Εξομοίωση Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων Μεγάλης Κλίμακας

#### 4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται με λεπτομέρεια τα δύο βασικά σημεία συνεισφοράς στην προσέγγιση της λύσης του προβλήματος. Γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα της εξομοίωσης και εξάγονται μοντέλα για την εξομοίωση περιοχών με αραιή και πυκνή βλάστηση. Στη συνέχεια αναπτύσσεται ευριστικός αλγόριθμος για την διαχείριση και κάλυψη περιοχής με αισθητήρες. Δίδεται ιδιαίτερη μέριμνα στην πραγματική τοπογραφία του δάσους η οποία διαφέρει σημαντικά από την ιδανική ή θεωρητική καθώς και στην πολυπλοκότητα και στο πλήθος επαναλήψεων του αλγορίθμου.

#### 4.2. Συνθήκες Φυσικού Περιβάλλοντος

##### 4.2.1. Μοντέλα Εξασθένησης Σήματος

Αναλύονται θεωρητικά και συνοπτικά η μετάδοση ραδιοσυχνοτήτων και των απωλειών που υφίσταται η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος στο διάστημα ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορα εμπειρικά μοντέλα μεγάλης κλίμακας, κατάλληλα για υπαίθριο χώρο ως τύπο περιοχής τόσο στον Shawn όσο και στο Omnet++. Το Castalia αντίθετα χρησιμοποιεί μοντέλο υπολογισμού εξασθένησης.

Στον σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνιών απαιτείται υπολογισμός όλων των παραγόντων που επηρεάζουν την επικοινωνία των μονάδων. Σε ό,τι αφορά τα ασύρματα δίκτυα η σχεδιάσή τους είναι συνάρτηση της συμπεριφοράς των ραδιοσυχνοτήτων στον περιβάλλοντα χώρο. Οι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν την επικοινωνία είναι [89]

- Η ισχύς σήματος που φτάνει στον δέκτη
- Ο θόρυβος που συνοδεύει το σήμα
- Η διασπορά των τιμών

Σχετικά με κάθε σύνδεση πραγματοποιείται ένας προϋπολογισμός σύνδεσης ο οποίος χρησιμοποιώντας την εκπεμπόμενη ισχύ του σήματος και όλες τις απώλειες μέχρι τον δέκτη υπολογίζει την ισχύ που φθάνει σε αυτόν. Στην συνέχεια γνωρίζοντας την ευαισθησία της κεραίας του δέκτη μπορούμε να αποφανθούμε για τον αν λαμβάνει το σήμα ή όχι. Στην περίπτωση που λαμβάνει υπολογίζουμε και το 'περιθώριο συνδεσιμότητας' (link margin) για την συγκεκριμένη σύνδεση.

Στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας και για πολυκατευθυντική μετάδοση σήματος, χρησιμοποιούμε συνήθως μια ιδεατή κεραία ως κεραία αναφοράς, τον 'ισότροπο πομπό', που εκπέμπει ισχύ με ενιαίο μοναδιαίο κέρδος ( $Gain = 1$ ) όμοια σε όλες τις κατευθύνσεις. Η αποδοτική ισχύς ισότροπης

μετάδοσης (effective isotropic radiated power) EIRP ενός πομπού ορίζεται ως το γινόμενο της εκπεμπόμενης ισχύος  $P_{Tx}$  επί το κέρδος της κεραίας

$G_{Tx}$  του πομπού: [89], [90]

$$EIRP = P_t \cdot G_t$$

Το κέρδος της κεραίας μπορεί να περιγραφεί ως η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς σε μια κατεύθυνση συγκριτικά με την ισχύ που θα μετέδιδε προς όλες τις κατευθύνσεις ένας 'ισότροπος πομπός' [91]. Αντίστοιχα η "EIRP" αντιπροσωπεύει την μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύ που εκπέμπει ένας πομπός στην κατεύθυνση που έχει το μέγιστο κέρδος της κεραίας [90]. Το 'περιθώριο συνδεσιμότητας' υπολογίζεται συγκρίνοντας την λαμβανόμενη ισχύ σήματος στο δέκτη με την ευαισθησία του δέκτη. Είναι ένα μέτρο ποιότητας της σύνδεσης και δίνει το περιθώριο που υπάρχει ανάμεσα στην κατάσταση λειτουργίας της σύνδεσης και στο οριακό σημείο αποτυχίας αυτής.

Το 'περιθώριο συνδεσιμότητας' δίνεται από τον εξής τύπο [91],

$$\text{Link Margin} = EIRP - L_{Path} + G_{Rx} - TH_{Rx}$$

όπου

$EIRP$  : αποδοτική ισχύς ισότροπης μετάδοσης σε dBm ή dBW

$L_{Path}$  : η συνολική εξασθένιση σήματος στη διαδρομή

$G_{Rx}$  : το κέρδος της κεραίας του δέκτη

$TH_{Rx}$  : το κατώφλι εισερχόμενου σήματος / ευαισθησία του δέκτη

#### 4.2.2. Απώλεια Διαδρομής Σήματος

Ο προσδιορισμός / πρόβλεψη της εξασθένισης του σήματος στη διαδρομή από τον πομπό στο δέκτη, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας κατά τον σχεδιασμό ασύρματων δικτύων επικοινωνιών. Η απώλεια διαδρομής περιλαμβάνει όλες τις απώλειες που υφίσταται το μεταδιδόμενο σήμα στην πορεία του από τον πομπό στον δέκτη. Στη συνέχεια περιγράφονται βασικά είδη απωλειών σήματος.

##### Free Space Path Loss

Περιγράφει την εξασθένιση της ισχύος του σήματος η οποία συμβαίνει κατά την οπτική επαφή πομπού-δέκτη χωρίς ενδιάμεσα εμπόδια [90]. Η σχέση έχει ως εξής:

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2$$

όπου:

- $\lambda$ : το μήκος κύματος σε μέτρα.
- $f$ : η συχνότητα του σήματος σε hertz.
- $d$ : η απόσταση από τον πομπό σε μέτρα.

- $c$ : η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

### Log Distance Path Loss

Για το μοντέλο Log-Distance η μέση εξασθένηση του σήματος περιγράφεται στην ακόλουθη σχέση [90].

$$L(d) = \left(\frac{d}{d_0}\right)^n, \quad L(db) = L_0(db) + n \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

όπου:

- $L(d)$  η εξασθένηση για απόσταση  $d$  μεταξύ του πομπού και του δέκτη.
- $n$  η δύναμη για την απώλεια σήματος
- $L_0$  η μέση απώλεια σήματος για μια γνωστή απόσταση  $d_0$ .

Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση τόσο μικρότερη είναι η δύναμη του λαμβανόμενου σήματος σε λογαριθμικά μεγέθη.

Η μορφολογία εδάφους πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη καθώς τα μοντέλα εξασθένησης σήματος εξαρτώνται από αυτήν. Δεδομένης της έλλειψης ψηφιακού αναγλύφου, εξετάζονται επίγεια μοντέλα για την εξασθένηση σήματος (*Near-Earth Propagation Models*) τα οποία περιέχουν μοντέλα πεδίου και βλάστησης.

### Weissberger model

Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται σε περιοχές με πυκνή και αραιή βλάστηση κατά την οπτική επαφή (LOS). Η ακόλουθη σχέση περιγράφει το μοντέλο [91].:

$$L(db) = 1.33 * F^{0.284} * df^{0.588}, \quad 14 < df \leq 400m$$

$$L(db) = 0.45 * F^{0.284} * df, \quad 0 \leq df \leq 14m$$

όπου:

- $df$ : το μήκος της βλάστησης σε μέτρα κατά την οπτική επαφή/γραμμή
- $F$ : η συχνότητα του σήματος σε GHz

### Early ITU-Recommendation

Το Early ITU [17] αποτελεί ένα πρώιμο εμπειρικό μοντέλο βλάστησης. Τα αποτελέσματά του συγκλίνουν με αυτά του μοντέλου Weissberger [91], [92], Περιγράφεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$L(db) = 0.2 * F^{0.3} * df^{0.6}$$

όπου:

- $df$ : το μήκος της βλάστησης σε μέτρα κατά την οπτική επαφή/γραμμή

- F: η συχνότητα του σήματος σε Ghz

### COST235 Foliage Model

Το μοντέλο βλάστησης COST235, παρέχει δύο σχέσεις για την εξασθένιση σήματος λόγω του παράγοντα βλάστηση [92]. Η πρώτη σχέση περιγράφει την εξασθένιση σε μια περιοχή που καταλαμβάνεται από δέντρα με φύλλα, ενώ η δεύτερη αναφέρεται στην εξασθένιση σε μια περιοχή με δέντρα αλλά χωρίς φύλλα.

$$L(\text{db}) = 15.6 * F^{0.009} * df^{0.26} \quad , \text{ για δέντρα με φύλλωμα}$$

$$L(\text{db}) = 26.6 * F^{-0.2} * df^{0.5} \quad , \text{ για δέντρα χωρίς φύλλωμα}$$

όπου:

- df: το μήκος της βλάστησης σε μέτρα κατά την οπτική επαφή/γραμμή
- F: η συχνότητα του σήματος σε GHz

### Ground Reflection 2-Ray Model

Σύμφωνα με το μοντέλο εδαφικής ανάκλασης δύο δρόμων η γη θεωρείται ως επίπεδη για μικρές αποστάσεις [92]. Συγκεκριμένα αυτό ισχύει για μερικές δεκάδες χιλιομέτρων. Συνεπώς το εν λόγω μοντέλο υπολογίζει αφενός την απόσταση εκπομπής πάνω στην γραμμή οπτικής επαφής (L.O.S.) και αφετέρου μια δεύτερη απόσταση η οποία έχει να κάνει με την ανάκλαση στην επιφάνεια του εδάφους. Ακολουθεί η μαθηματική σχέση.

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left( \frac{h_{TX} h_{RX}}{d^2} \right)^2$$

όπου:

$P_{RX}$ : Η ισχύς της κεραίας του δέκτη.

$P_{TX}$ : Η ισχύς της κεραίας του πομπού

$G_{TX}$ : Το κέρδος της κεραίας του πομπού

$G_{RX}$ : Το κέρδος της κεραίας του δέκτη

d: η απόσταση ανάμεσα στον πομπό και δέκτη σε μέτρα

$h_{TX}$ : το ύψος της κεραίας του πομπού

$h_{RX}$ : το ύψος της κεραίας του δέκτη

### Egli's Model

Ο Egli τροποποίησε το μοντέλο εδαφικής ανάκλασης δύο δρόμων καθώς παρατήρησε ότι εμφανίζονταν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών μορφολογικά περιοχών και συχνοτήτων [92]. Ως εκ τούτου, ένας πολλαπλασιαστής β εισήχθη στην εξίσωση μετάδοσης ομαλής γης, η αλλιώς "Ground Reflection 2-Ray Model", ο οποίος περιγράφει την ενδιάμεση 50% εξασθένιση να ισούται ως ακολούθως:

$$L_{50} = G_{TX} G_{RX} \left( \frac{h_{TX} h_{RX}}{d^2} \right)^2 \beta$$

όπου:

$$\beta = \left( \frac{40}{f} \right)^2, \text{ με συχνότητα αναφοράς τα 40MHz.}$$

### 4.3. Μετρήσεις Πεδίου

Στην προσπάθεια προσέγγισης του προβλήματος, εξετάστηκαν δύο τυπικές δασικές περιοχές πυκνής και αραιής βλάστησης με στόχο την συλλογή πραγματικών μετρήσεων από το περιβάλλον σε σχέση με την εξασθένιση του σήματος. Ο γενικότερος σκοπός του εγχειρήματος ήταν η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων αυτών από λογισμικό εξομίωσης WSN και η παραγωγή αξιόπιστων μοντέλων εξομίωσης ανά προτυποποιημένη περιοχή.

Η πρώτη επιλεγείσα περιοχή είναι αυτή της Καισαριανής, η οποία καλύπτεται από πυκνή βλάστηση πεύκων και παρουσιάζει αρκετή υψομετρική διαφορά. Η δεύτερη περιοχή στην οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα ήταν αυτή της Πεντέλης η οποία χαρακτηρίζεται από αραιή βλάστηση. Σε κάθε περιοχή οι μετρήσεις και οι παρατηρήσεις αναφέρονται αποκλειστικά στα επιλεγέντα σημεία των οποίων οι συντεταγμένες αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες 2 και 3.

Οι μετρήσεις συλλέχθηκαν και από τις δύο περιοχές. Στον πίνακα 2, παρουσιάζονται τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την Πεντέλη και στον πίνακα 3 τα δεδομένα της Καισαριανής. Για κάθε χωρικό σημείο NodelD/PointID αναγράφονται οι συντεταγμένες του x,y καθώς και το ύψος h. Ακολουθεί η ισχύς λήψης του σήματος σε dbms και κάποια σχόλια σχετικά με το περιβάλλον. Οι συντεταγμένες των αισθητήρων μετατράπηκαν από μορφή Garmin σε ΕΓΣΑ.

Οι ασύρματοι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: ισχύς κεραίας 100mW, κέρδος κεραίας (antenna gain) 2db και συχνότητα 433MHz. Τοποθετήθηκαν περίπου 2m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους όπως ακριβώς και ο δρομολογητής. Οι κόμβοι τοποθετήθηκαν σε τοπολογία αστέρα σχηματίζοντας μια κυψέλη, στην μέση της οποίας περίπου βρισκόταν η πύλη. Η ευαισθησία λήψης του δρομολογητή ήταν 112dBm (= -142dB). Οι μετρήσεις έγιναν σε πολύ καλές καιρικές συνθήκες, σε κλασσικό ανοιξιάτικο καιρό στην πατρίδα μας. Σε μια προσπάθεια να αποφευχθούν λανθασμένες ενδείξεις και μετρήσεις η κάθε μέτρηση γινόταν τρεις (3) ή τέσσερις (4) φορές. Αυτή η μέθοδος προσδίδει ποιότητα κατά κάποιον τρόπο στις μετρήσεις μας και αξιοπιστία σχετικά με το μετρούμενο μέγεθος σε σχέση πάντα με τον εξοπλισμό που είχαμε. Να σημειωθεί πως οι μετρήσεις δεν είναι πιστοποιημένες επίσημα με επαγγελματικό εξοπλισμό αλλά είναι αποτέλεσμα χρήσης προϊόντων της αγοράς και των προδιαγραφών τους.

Στη συνέχεια αυτές οι μετρήσεις εισήχθησαν στον εξομοιωτή Shawn σε xml μορφή για επεξεργασία. Αξίζει να σημειωθεί πως η χρησιμοποίηση του Shawn ήταν και αυτή αποτέλεσμα έρευνας, καθώς δεν ήταν ξεκάθαρο από την αρχή το λογισμικό το οποίο ταίριαζε καλύτερα στο συγκεκριμένο εγχείρημα.

Ο στόχος της όλης της προσπάθειας ήταν η προσέγγιση του πραγματικού πειράματος μέσω του σωστού μοντέλου εξομοίωσης το οποίο θα ανταποκρινόταν στα φυσικά μεγέθη και μετρήσεις. Βέβαια στην πορεία το θέμα που ανέκυψε ήταν και η επιλογή λογισμικού εξομοίωσης και για την επίλυση του οποίου έπρεπε να γίνουν κάποιες συγκριτικές δοκιμές.

Στους πίνακες που ακολουθούν (πίνακας 2 και 3) παρατίθενται οι μετρήσεις.

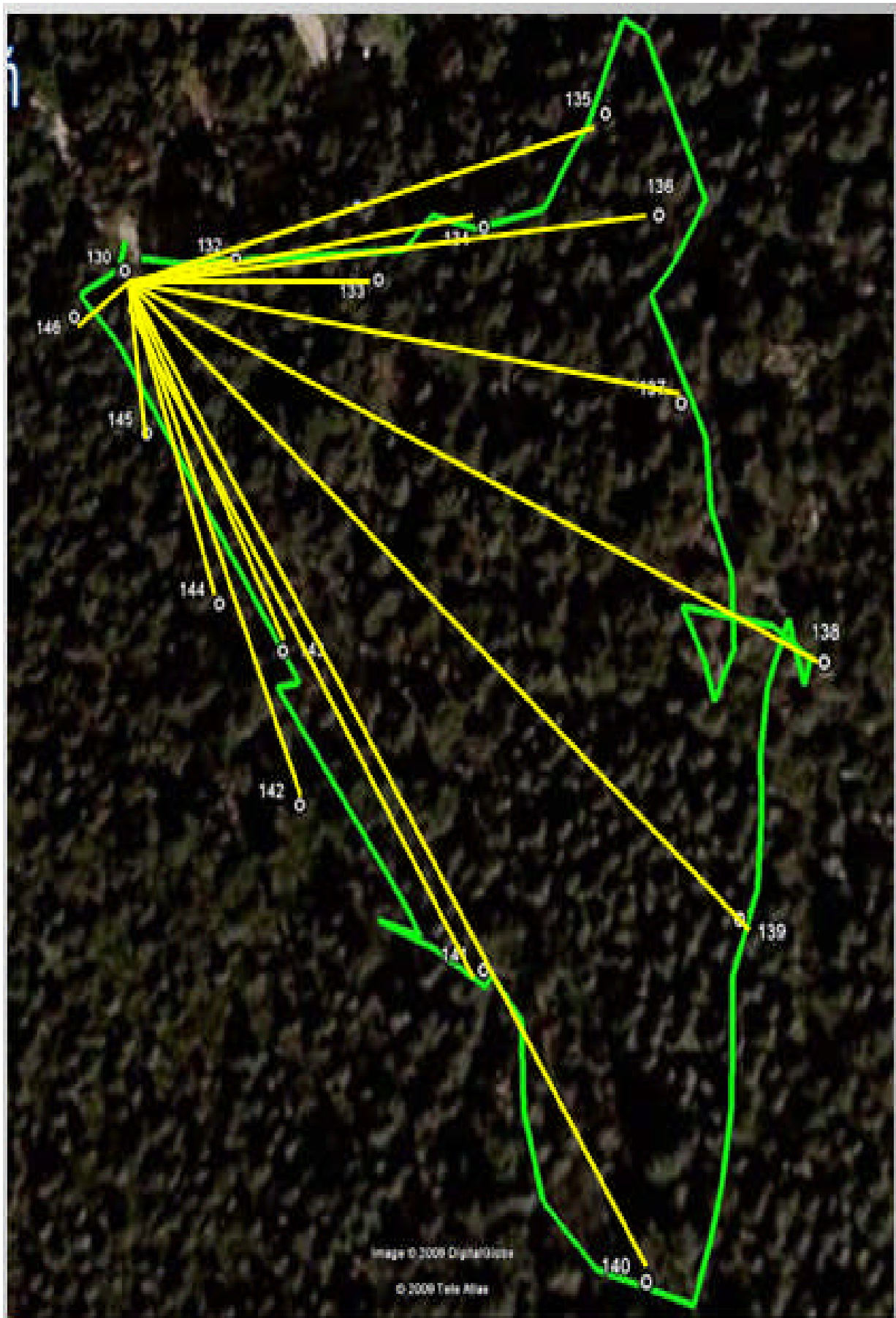
KESSARIANI area					
Point_ID	x	y	h	RxD (dBm)	Notes
130	482643.80	4201487.85	352.672	-20	Gateway's Possition
131	482643.14	4201487.60	352.672	-54	Beside the G/W
132	482670.81	4201489.21	358.672	-64	
133	482704.89	4201483.99	371.671	-60	on the Line Of Sight (L.O.S.)
134	482729.11	4201492.08	377.670	-83	#
135	482756.46	4201510.63	386.669	-85	high attenuation beyond 100m
136	482767.32	4201491.29	402.669	-91	very low power signal
137	482771.09	4201458.61	412.671	-95	very low power signal - limit down
138	482798.62	4201415.71	424.672	No	high elevation/ distance
139	482780.99	4201374.82	411.674	No	high elevation/ distance
140	482760.69	4201319.26	407.677	No	max. elevation/ distance
141	482728.24	4201365.04	395.676	-86	max. distance of signal reception
142	482687.42	4201391.20	389.676	-66	#
143	482683.18	4201417.81	377.675	-72	#
144	482668.24	4201426.22	373.675	-61	on the L.O.S.
145	482650.15	4201457.26	365.674	-65	out of L.O.S.
146	482631.60	4201479.43	370.673	-57	no elevation distance

Πίνακας 2: Καισαριανή – Πυκνή βλάστηση- μετρήσεις

PENTELI area					
Point_ID	x	y	h	RxD (dBm)	Notes
700	487105.65	4213915.99	463.005	-33	G/W Possition
701	487104.90	4213917.47	464.005	-64	Beside the G/W
702	487128.00	4213951.40	466.002	-78	no foliage
703	487118.42	4213980.01	467.001	-86	low foliage
704	487109.99	4214008.41	468.000	-90	Lowest signal power
705	487117.43	4214046.83	468.998	OXI	near pylon of electricity
706	487109.60	4214085.40	465.997	-85	#
707	487142.09	4214123.69	471.994	-86	max. distance of signal reception
708	487161.35	4214147.64	474.993	OXI	no reception
709	487202.48	4214183.48	484.990	OXI	
710	487241.74	4214158.39	498.990	OXI	
711	487267.72	4214149.66	502.990	OXI	
712	487287.36	4214147.72	504.990	OXI	
713	487270.11	4214101.55	498.992	OXI	
714	487236.15	4214008.95	488.997	-88	no reception
715	487231.26	4213983.97	490.999	-80	below the electricity pylon
716	487235.45	4213967.84	486.999	-87	no foliage/ near high voltage lines low power because of high voltage power lines and distance
717	487251.63	4213951.73	483.000	OXI	
718	487268.46	4213935.86	482.000	-87	
719	487258.19	4213928.48	476.000	-86	
720	487256.01	4213918.43	471.001	-80	
721	487263.77	4213895.52	472.002	-83	#
722	487277.09	4213889.89	477.002	-79	#
723	487260.79	4213875.99	470.003	-79	low elevation distance
724	487235.89	4213875.16	464.003	-89	inside a ditch inside a ditch - near high voltage lines
725	487222.67	4213881.47	462.003	-88	
726	487207.04	4213889.66	462.003	-81	(as above)
727	487200.56	4213903.54	469.003	-75	low vegetation
728	487180.54	4213908.14	468.003	-80	#
729	487169.85	4213900.72	464.004	-75	low elevation distance
730	487140.57	4213901.88	467.004	-58	no vegetation - road
731	487129.54	4213907.81	467004	-54	

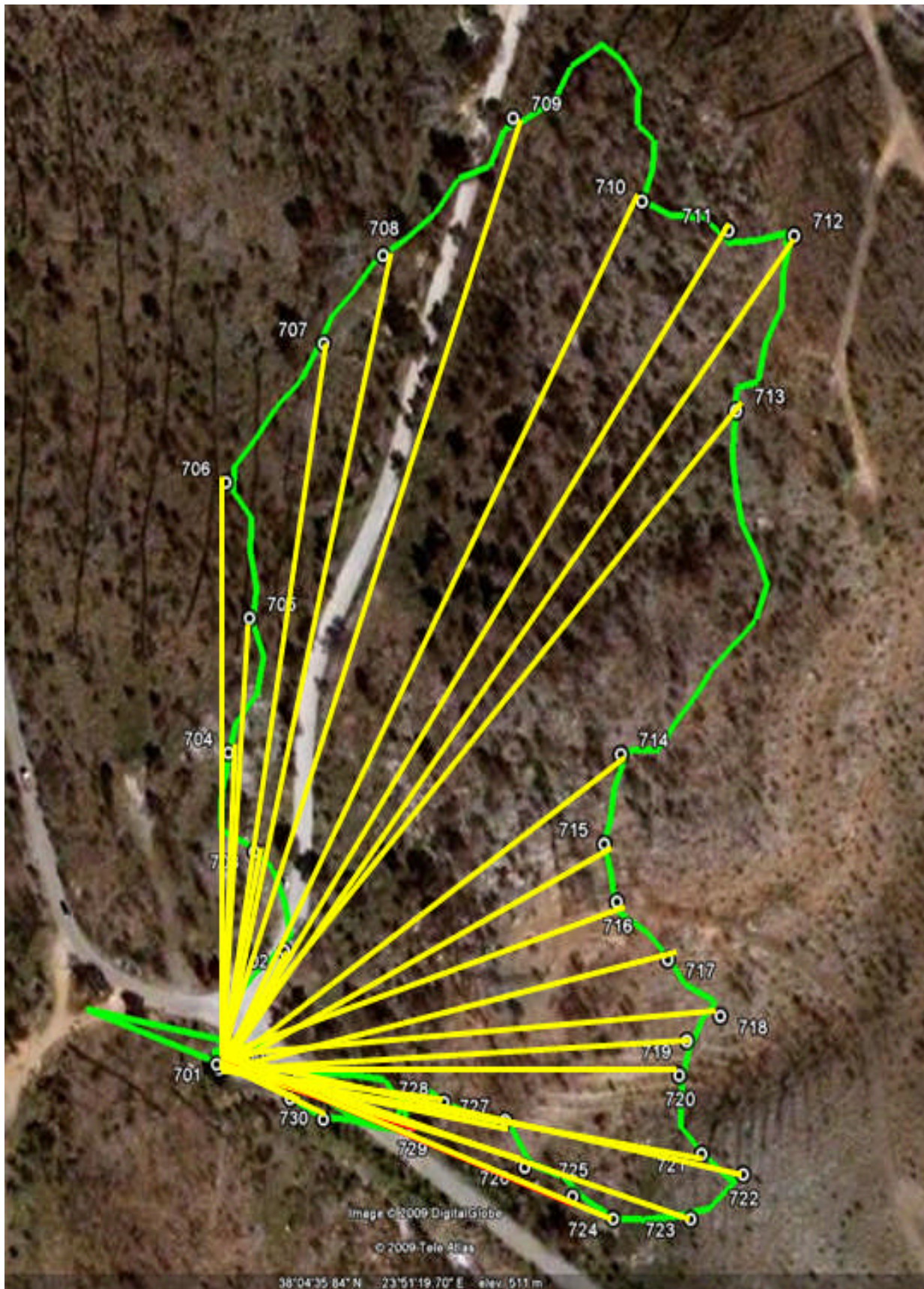
Πίνακας 3: Πεντέλη – Αραιή βλάστηση- μετρήσεις

Στις εικόνες 42 και 43 που ακολουθούν δεικνύονται δύο στιγμιότυπα από Google Maps σχετικά με τις υπό εξέταση περιοχές. Επάνω στους χάρτες καθορίζονται και τα PointIDs ώστε να φαίνονται τα σημεία αναφοράς. Η τοπολογία αστέρα του WSN δεν σχηματίζει μια ιδανική εξάγωνη κυψέλη/αστέρα αλλά απλά έναν αστέρα ο οποίος για πειραματικούς λόγους μορφοποιήθηκε έτσι. Σε γενικότερες γραμμές η υλοποίηση τοπολογία αστέρα στο δάσος δεν μπορεί να είναι ιδανική αλλά πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτήν καθώς τα δέντρα δεν βρίσκονται σε προκαθορισμένα σημεία βάσει κάποιου μαθηματικού μοντέλου ούτε και η μορφολογία εδάφους μπορεί να περιγραφεί συστηματικά.



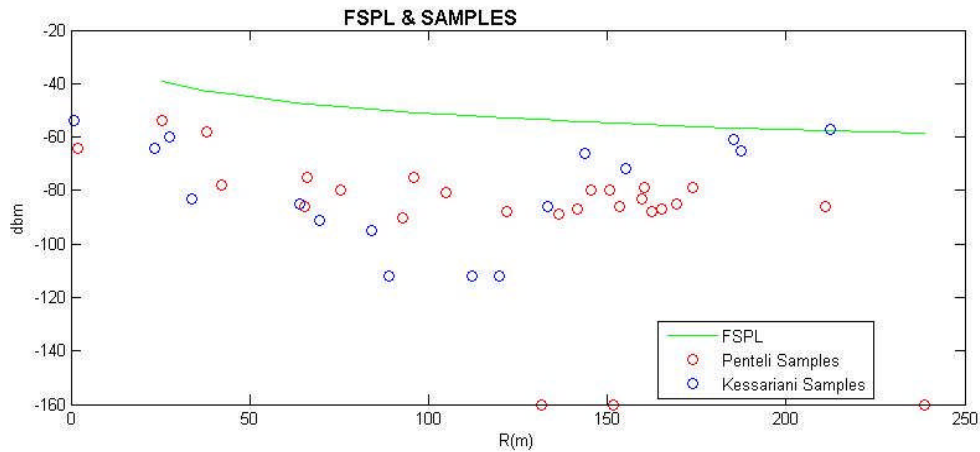
Εικόνα 42: Περιοχή Καισαριανής – Πυκνή βλάστηση





Εικόνα 43: Περιοχή Πεντέλης – Αραιή βλάστηση

Αξίζει να σημειωθεί, όπως δεικνύεται και στην εικόνα 44, ότι υπάρχει σαφής διαφορά της εξασθένισης του σήματος από την θεωρητική καμπύλη του μοντέλου εξασθένισης ελευθέρου χώρου (Free Space Path Loss) σε σχέση με τις δειγματικές τιμές πεδίου τόσο στην περιοχή της Καισαριανής (πυκνή βλάστηση) όσο και στην περιοχή της Πεντέλης (αραιή).



Εικόνα 44: Δειγματικές τιμές πεδίου Καισαριανής (πυκνή βλάστηση) και Πεντέλης (αραιή βλάστηση) σε σχέση με την FSPL καμπύλη.

Συγκεκριμένα η καμπύλη του Free Space Path Loss παρατίθεται στο σχήμα ως σημείο αναφοράς ώστε να γίνει αντιληπτή η πρόσθετη εξασθένιση σήματος που προκύπτει από την αραιή ή πυκνή βλάστηση της εκάστοτε περιοχής.

#### 4.4. Εξομοίωση και αποτελέσματα

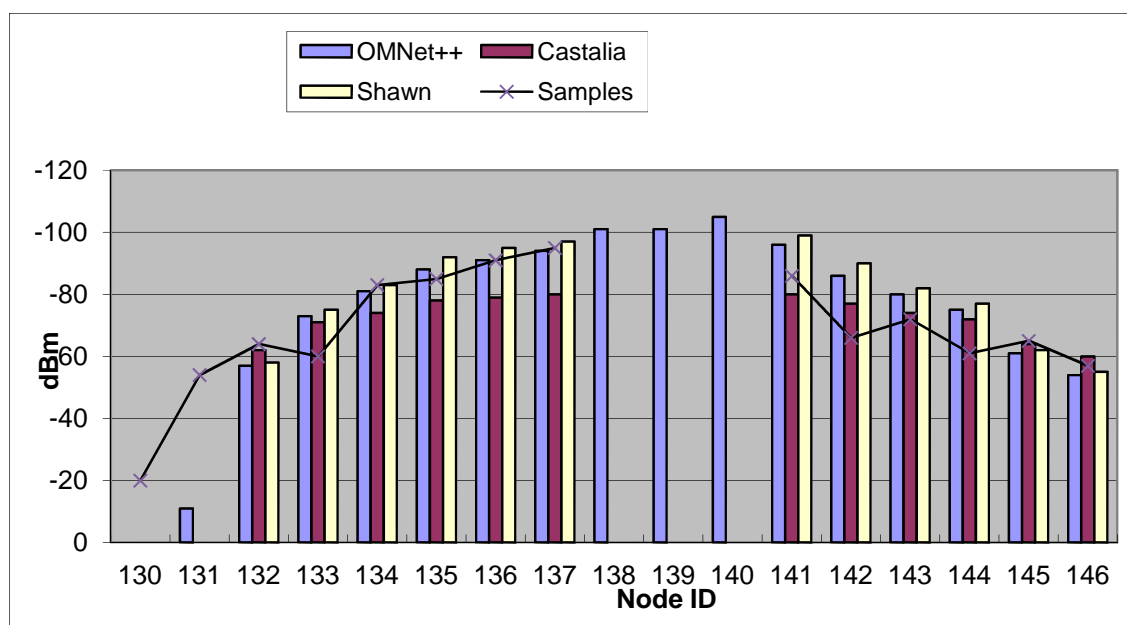
Η εξομοίωση πραγματοποιήθηκε βάσει μοντέλων εξασθένισης σήματος όσο αφορά το έδαφος και την βλάστηση (terrain and foliage models), καθώς για την επίτευξη ενός ρεαλιστικού σεναρίου θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη και οι δύο παράγοντες. Κατά συνέπεια τα σενάρια εξομοίωσης που εκτελέστηκαν για κάθε περιοχή ξεχωριστά και στους τρεις εξομοιωτές θα έπρεπε να έχουν κοινή βάση σε επίπεδο μοντέλου εξασθένισης σήματος λόγω απόστασης και βλάστησης [84]. Σε κάποιες περιπτώσεις υπήρξε μια μικρή διαφοροποίηση στα σενάρια που εκτελέστηκαν από εξομοιωτή σε εξομοιωτή καθώς δεν υπήρχε κοινό σημείο αναφοράς στο λογισμικό των εξομοιωτών και κάποια από τα επιλεγέντα μοντέλα περιέγραφαν καλύτερα τις συνθήκες του πειράματος. Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σχεδόν κοινού σεναρίου εξομοίωσης και στους τρεις εξομοιωτές περιγράφονται στον πίνακα 4

a/a	OMNet++	Castalia	Shawn	Samples	Sample-OMNet++ dif.	Sample-Castalia dif.	Sample-Shawn dif.
SensorID	mean(dBm)	mean(dBm)	mean(dBm)	mean(dBm)	dBm	dBm	dBm
130				-20			
131	-11			-54			
132	-57	-62	-58	-64	-7	-2	-6
133	-73	-71	-75	-60	13	11	15
134	-81	-74	-83	-83	-2	-9	0
135	-88	-78	-92	-85	3	-7	7
136	-91	-79	-95	-91	0	-12	4
137	-94	-80	-97	-95	-1	-15	2
138	-101						
139	-101						
140	-105						
141	-96	-80	-99	-86	10	-6	13
142	-86	-77	-90	-66	20	11	24
143	-80	-74	-82	-72	8	2	10
144	-75	-72	-77	-61	14	11	16
145	-61	-64	-62	-65	-4	-1	-3
146	-54	-60	-55	-57	-3	3	-2
<b>Mean of Absolute Difference:</b>					<b>7</b>	<b>8</b>	<b>8.5</b>

Πίνακας 4: Αποτελέσματα εκτέλεσης κοινού σεναρίου στους τρεις εξομοιωτές [74]

Παρατηρούμε πως την μικρότερη μέση απόλυτη απόκλιση σε dBms σε ό,τι αφορά την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος την παρουσιάζει το Omnet++ και ακολουθούν χωρίς να διαφέρουν και πολύ το Castalia και ο Shawn [74].

Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται σχετικό γράφημα με τα αποτελέσματα και των τριών εξομοιωτών για κάθε σημείο μέτρησης στο πείραμα της Καισαριανής σε σχέση με την καμπύλη των δειγμάτων για τα αντίστοιχα σημεία.



Πίνακας 5: Αποτελέσματα των τριών εξομοιωτών σε αντιπαραβολή με τα δείγματα [74]

Παρόλο που η ακρίβεια αποτελεί μείζον ζήτημα της εξομοίωσης, η μελέτη στους εξομοιωτές κινήθηκε σαφώς και πέραν από αυτήν στο πεδίο των χαρακτηριστικών τους.

Στον πίνακα 6 παρατίθενται σημαντικές επισημάνσεις σχετικά με τους εξομοιωτές όπως η επεκτασιμότητα, τον τρόπο με τον οποίον υποστηρίζουν τα WSN, την χρησιμότητα τους, την τεκμηρίωση με την οποία συνοδεύονται αν συνοδεύονται, το αν υποστηρίζουν εργαλεία οπτικοποίησης κ.α.

a/a	Castalia	Omnet	Shawn
Assessment No 1	Simultaneous simulation of plenty of natural phenomena	Not supported	Not supported
Assessment No 2	Simulation mostly based on time	Simulation mostly based on time	Simulation mostly based on iterations
Assessment No 3	Examines the wireless networks (Log-Distance Path Loss model)	Provides, special features for wired networks; this is extended in latest version.(Free Space P. L.)	Examines the wireless networks in a static way. (Log Distance Path Loss)
Documentation	Imperfect in previous versions. Much better in the latest one.	Excellent	Imperfect to just informative
Flexibility in architecture	Actual but further development is hard; easier in latest version because of improved documentation.	High	High
Modularity	Medium in former versions, Higher in the latest version.	High	High
Extensibility / Scalability	Medium as it is a bit difficult to understand coding	Extremely High	High
Performance/ Usability	Good	Good	Good
Easiness to grasp functionality	Low	High	Medium to High
Ease of use	High (many modules and models are predefined)	Medium to high	Medium to High
Stability	Good enough	Good enough	Good enough
Accuracy / Result convergence	Good enough, according to the selected model	Good enough, according to the selected model	Good enough, according to the selected model
Command line	Supported	Supported	Supported
Visualization tool	Not Supported yet	Supported. In latest version, depiction on Google Maps is available.	Not Supported. Just Edge model graph is provided
MAC communication	Supported	Must be developed	Supported
Mobility of Nodes	Supported (in latest version)	Supported	Supported
Messages	Required for node operation	Required for node operation	Not required for node operation

**Πίνακας 6: Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης των χαρακτηριστικών των εξομοιωτών [74]**

Για τον λόγο ότι ο εξομοιωτής Shawn δεν απείχε πολύ σε ό,τι αφορά την ακρίβεια σε σχέση με τους υπολοίπους και λόγω της ταχύτητάς του, του φιλικού περιβάλλοντος εργασίας και της ευκολίας χρήσης προτιμήθηκε στην χρήση για την παραγωγή μοντέλων εξομοίωσης πεδίου.

Για κάθε περιοχή του πειράματος εκτελέστηκε πληθώρα σεναρίων εξομοίωσης. Για κάθε σενάριο υπολογίστηκε η μέση απόκλιση των τιμών της εξομοίωσης σε σχέση με τις τιμές των δειγμάτων. Αυτού του είδους η στατιστική ανάλυση μπορεί να υποστηρίξει σε ικανοποιητικό σημείο το ποιο σενάριο ταιριάζει καλύτερα στην υπό εξέταση περιοχή, δεδομένου ότι η συνδεσιμότητα εξασφαλίζεται. Η χρήση

του κατάλληλου μοντέλου εξομοίωσης μπορεί να υποστηρίξει κρίσιμες αποφάσεις σε περιπτώσεις διαχείρισης κρίσεων σε περιβαλλοντικά έκτακτα γεγονότα.

#### 4.5. Μοντελοποίηση φυσικού περιβάλλοντος

Συγκρίνοντας λοιπόν τους τρεις εξομοιωτές OMNET++, Castalia και Shawn ως προς τα αποτελέσματά τους σχετικά με την εξασθένιση σήματος, ο Shawn φαίνεται να είναι αρκετά γρήγορος στην εξομοίωση, αρκετά εύκολος στην χρήση ενώ και το ζητούμενο της ακρίβειας δεν απέχει αρκετά από το επιθυμητό. Οι συνθήκες του πραγματικού πειράματος στο δάσος μπορούν να προσεγγιστούν επιτυχώς με την χρήση του κατάλληλου σεναρίου εξομοίωσης.

Σε αυτά τα σενάρια όσο χαμηλότερη είναι η μέση απόκλιση τόσο καλύτερη σύγκλιση με τις πραγματικές συνθήκες παρουσιάζουν. Συγκεκριμένα, για την περιοχή της Καισαριανής ο συνδυασμός του Free Space Path Loss και του COST235\_OUT foliage model για βλάστηση χωρίς φύλλωμα στο 50% της διαδρομής φαίνεται να παρουσιάζει την καλύτερη σύγκλιση. Παράλληλα, για την ίδια περιοχή θα μπορούσε επιτυχώς να χρησιμοποιηθεί και το Log Distance Path Loss Μοντέλο ως κατάλληλο για περιοχές που το έδαφος δεν είναι ομαλό.

Ωστόσο, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο εκείνο που δεικνύει τα καλύτερα στατιστικά καθώς βάσει αυτού θα μοντελοποιήσουμε αντίστοιχες περιβαλλοντικές περιοχές [93].

Στη συνέχεια, πίνακας 7, γίνεται παράθεση των πιο αντιπροσωπευτικών συνδυασμών μοντέλων εξασθένισης σήματος και βλάστησης για τις περιοχές Πεντέλη και Καισαριανή και υπολογίζεται η τυπική απόκλιση σε σχέση με τα δείγματα.

<u>Kessariani area- Dense foliage - SHAWN simulator</u>	<u>Penteli area –SCANT foliage– SHAWN simulator</u>
Path Loss: Ground Reflection 2-Ray (approximation) Foliage Loss: ITU-r 100% Mean of Absolute difference: 8.58	Path Loss: Ground Reflection 2-Ray (approximation) Foliage Loss: Weissberger 100% Mean of Absolute difference: 8.3
Path Loss: Ground Reflection 2-Ray (analytic) Foliage Loss: ITU-r 100% Mean of Absolute difference: 8.50	Path Loss: Ground Reflection 2-Ray (analytic) Foliage Loss: Weissberger 100% Mean of Absolute difference: 8.2
Path Loss: Egli Terrain Model Foliage Loss: COST235_OUT 80% Mean of Absolute difference: 8.00	Path Loss: Egli Terrain Model Foliage Loss: COST235_OUT 60% Mean of Absolute difference: 4.6
Path Loss: <b>Free Space Path Loss</b> Foliage Loss: <b>COST235_OUT 50%</b> Mean of Absolute difference: <b>7.25</b>	Path Loss: <b>Free Space Path Loss</b> Foliage Loss: <b>COST235_OUT 30%</b> Mean of Absolute difference: <b>4.0</b>



Path Loss: Log Distance Path Loss (d0=1m, L0=FSP) n=1,8	Path Loss: Log Distance Path Loss (d0=1m, L0=FSP) n=3
Foliage Loss: COST235_OUT 70%	Foliage Loss: Weissberger 20%
Mean of Absolute difference: 8.50	Mean of Absolute difference: 5.4

**Πίνακας 7: Συνδυασμοί μοντέλων εξασθένησης σήματος και βλάστησης. [93]**

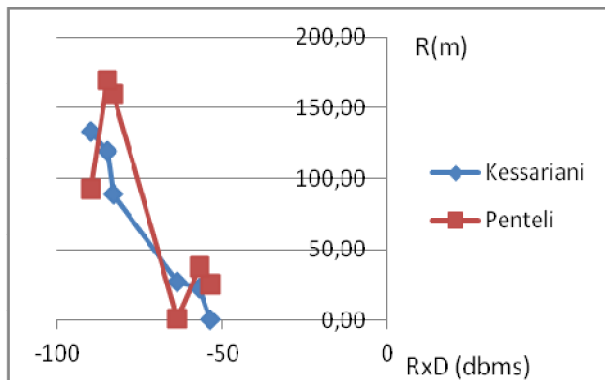
Χρησιμοποιώντας και τον παρακάτω μαθηματικό τύπο που δίνει την απόσταση μεταξύ δύο σημείων στον χώρο, δεικνύεται όπως άλλωστε αναμενόταν, ότι στην περιοχή με αραιή βλάστηση το εκπεμπόμενο σήμα λαμβάνεται επιτυχώς σε μεγαλύτερη απόσταση.

$$D_{3d} = \sqrt{Dx^2 + Dy^2 + Dh^2}$$

RxD (dbms)	Kessariani R(m) (DENSE)	Penteli R(m) (SCANT)	DR (m) Absolute values
-54	0,71	25,57	24,86
-57	23,32	37,87	14,55
-64	27,70	1,94	25,76
-83	89,00	159,69	70,69
-85	119,86	169,48	49,62
-90	133,30	92,66	40,64

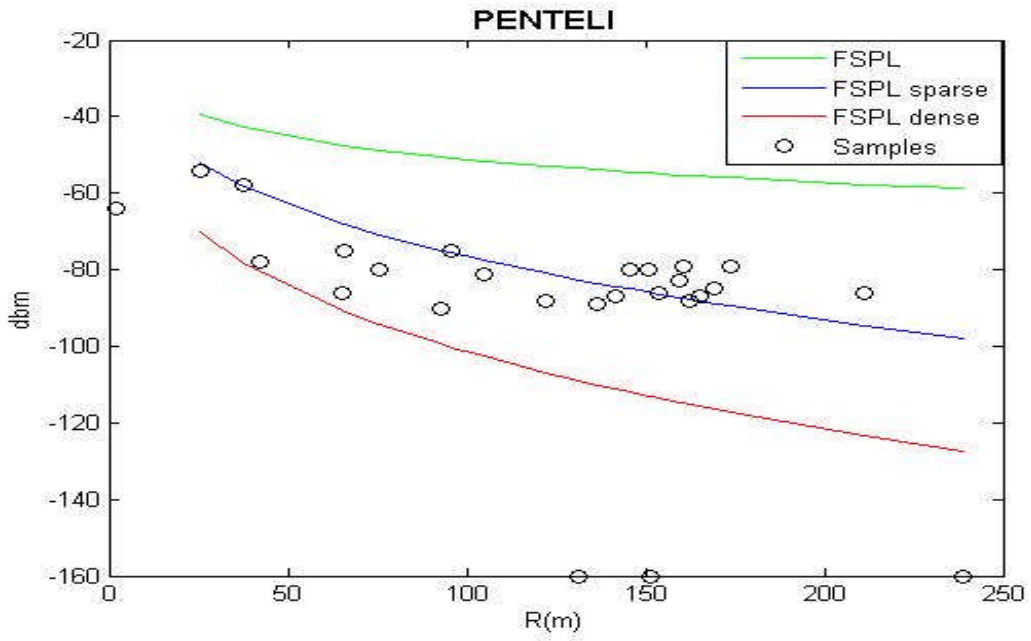
**Πίνακας 8: Ισχύς σήματος δέκτη αναλόγως αποστάσεων [93].**

Επιπροσθέτως, από τις παραπάνω τιμές εμφανίζεται ότι το σήμα μεταδίδεται σε μικρότερη απόσταση σε περιοχές με πυκνή βλάστηση. Τα συμπεράσματα αυτά δεικνύονται στο ακόλουθο γράφημα (πίνακας 9).

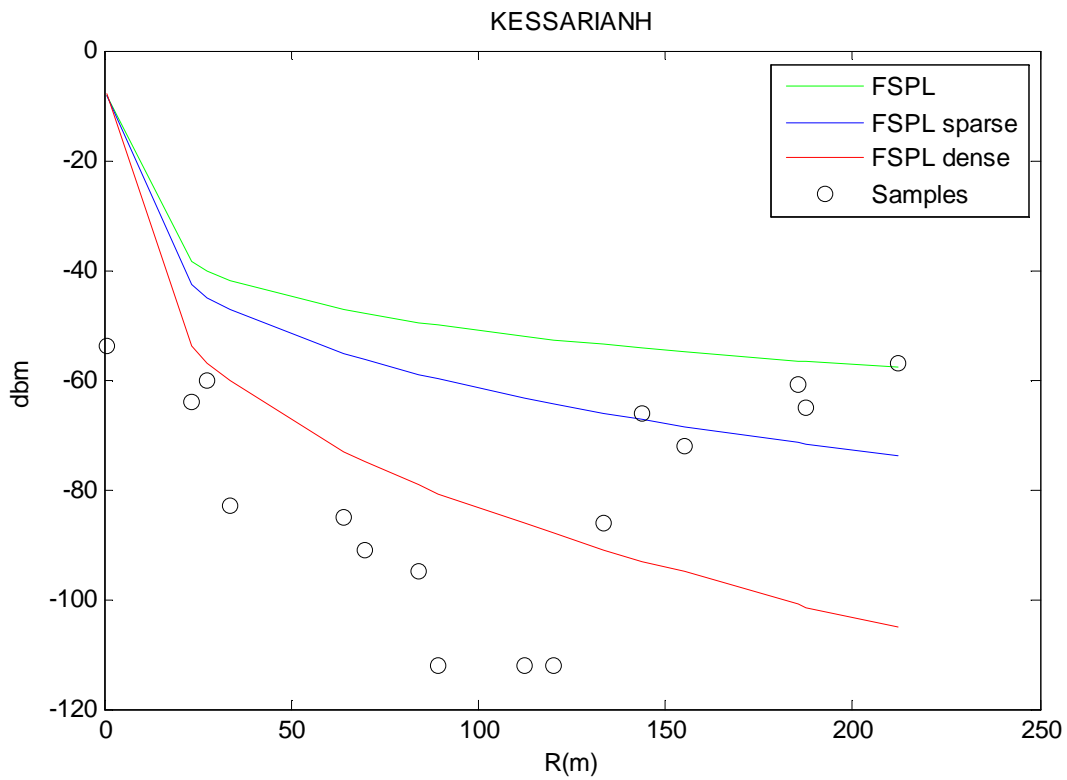


**Πίνακας 9: Γραφική παράσταση ισχύος λαμβανομένου σήματος και απόστασης [93]**

Στη συνέχεια παρατίθενται και δύο γραφήματα τόσο για την περιοχή της Πεντέλης (πίνακας 10) όσο και για αυτήν της Καισαριανής (πίνακας 11), όπου στο καθένα δεικνύονται τα δείγματα σε σχέση με τις καμπύλες FSPL, FSPL και την εξασθένηση σήματος από πυκνή βλάστηση (dense) και FSPL με την εξασθένηση (sparse).



Πίνακας 10: Πεντέλη (αραιή -sparse): Επίδραση της βλάστησης στην εξασθένηση σήματος

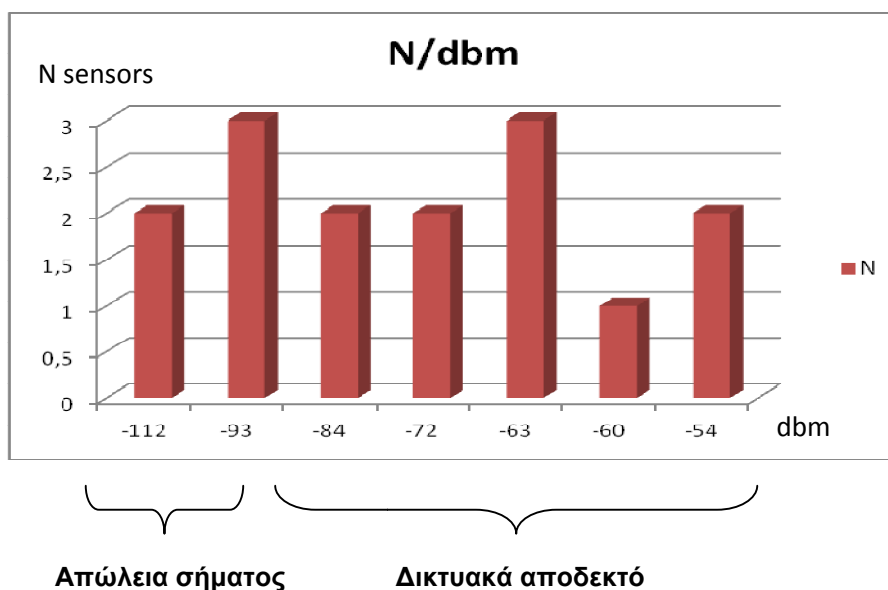


Πίνακας 11: Καισαριανή (πυκνή -dense ): Επίδραση της βλάστησης στην εξασθένηση σήματος

## 4.6. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας την αναφορά στους εξομοιωτές, το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η παραγωγή μοντέλων εξομοίωσης τα οποία αποτελούν σημείο αναφοράς σε αυτό που κατ' αρχήν αυθαίρετα ορίζουμε ως περιοχή με αραιή και πυκνή βλάστηση. Έχοντας καταλήξει στα μοντέλα αυτά τα οποία δεικνύονται στον πίνακα 7 με έντονη γραφή, είναι δυνατόν στη συνέχεια να εξομοιώσουμε και να χειριστούμε, βάσει αυτών, περιοχές με τα ίδια χαρακτηριστικά αραιής και πυκνής βλάστησης. Σε κάθε περίπτωση για την μοντελοποίηση και κατηγοριοποίηση των περιοχών ως π.χ. πολύ αραιή, αραιή, μέτριας, πυκνής και πολύ πυκνής βλάστησης η αναλυτική καταγραφή των χαρακτηριστικών τους είναι προαπαιτούμενη. Συγκεκριμένα, περιοχές με αποστάσεις δέντρων έως περίπου 5-6m θα μπορούν να χαρακτηρίζονται ως περιοχές με πυκνή βλάστηση και αναλογικά περιοχές με αποστάσεις δέντρων από 25 έως 35m θα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως περιοχές με αραιή βλάστηση. Αυτό αποτελεί μια σχετικά αυθαίρετη κατηγοριοποίηση στην οποία θα προβεί ο μηχανικός δικτύου βάσει των μοντέλων εξομοίωσης ανά περιοχή που έχουν παραχθεί. Ακόμη και οι πιθανές συντεταγμένες των δέντρων μέσω επεξεργασίας αεροφωτογραφιών είναι ιδιαίτερα χρήσιμες. Στην πορεία βάσει αυτής της κατηγοριοποίησης θα μελετηθεί η κάθε υποψήφια προς ανάπτυξη WSN περιοχή. Με την ως τώρα μεθοδολογία θα κατηγοριοποιηθεί, π.χ. περιοχή πολύ πυκνής βλάστησης και θα εφαρμοστεί στον εξομοιωτή το αντίστοιχο μοντέλο ώστε να επιχειρηθεί μια εφικτή και ικανοποιητική τοποθεσία αισθητήρων και των δρομολογητών όσο αφορά το δικτυακό μέρος του προβλήματος (συνδεσιμότητα, connectivity).

Επίσης βάσει της ανάλυσης των μετρήσεών μας και τις διασποράς των κόμβων στις διάφορες τιμές ισχύος του λαμβανομένου σήματος, παρατηρούμε ότι ένα δικτυακά αποδοτικό δίκτυο, δηλαδή ένα δίκτυο με ικανοποιητική συνδεσιμότητα κόμβων, υλοποιείται για τιμές λαμβανομένης ισχύος σήματος οριακά κάτω από -90dbm, όπως δεικνύεται και στο παρακάτω γράφημα, εικόνα 45.



Εικόνα 45: Περιοχές συχνότητων για αποδεκτό δίκτυο και απώλειας σήματος



## 5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Χωρική Διάταξη Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων Υψηλής Χωρικής Πυκνότητας

#### 5.1. Ομαδοποίηση κόμβων με χωρικά κριτήρια

Στην προσπάθεια σχεδιασμού και υλοποίησης ενός πραγματικού δικτύου αισθητήρων ευρείας κλίμακας και υψηλής χωρικής πυκνότητας, θα πρέπει να βρεθεί μια εφικτή λύση τοποθέτησης των αισθητήρων στο πεδίο σε σχέση με το απόλυτο θεωρητικό σενάριο που στην περίπτωση μας είναι το ιδανικό πλέγμα αισθητήρων. Οι πραγματικές συνθήκες στο πεδίο διαφέρουν πολύ από τις θεωρητικές καθώς το ανάγλυφο του εδάφους και η βλάστηση δεν περιγράφονται με κάποιον γνωστό τρόπο. Στην πορεία γίνεται μια προσπάθεια εύρεσης των σημείων τα οποία συγκλίνουν περισσότερο στο θεωρητικό σενάριο και στα οποία μπορούν να τοποθετηθούν αισθητήρες. Η τοποθέτηση αυτών των αισθητήρων αποτελεί και μέρος της λύσης του προβλήματος. Αυτοί οι αισθητήρες θα πρέπει να ομαδοποιηθούν καθώς είναι αυτοί που θα αποτελέσουν το πραγματικό δίκτυο και το grid το οποίο θα τοποθετηθεί στο πεδίο.

##### 5.1.1. Αλγόριθμος Bellman-Ford

Ένα στιγμιότυπο του υπολογισμού των αποστάσεων δεικνύεται παρακάτω στον πίνακα 12. Οι γραμμές του πίνακα αντιπροσωπεύουν το sensor ID, δηλαδή τον διακριτικό αριθμό του αισθητήρα και οι στήλες το tree ID, δηλαδή τον αντιπροσωπευτικό αριθμό του κάθε δέντρου. Οι τιμές του πίνακα αντιστοιχούν στις ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ του αισθητήρα  $i$  και του δέντρου  $j$ . Ο αλγόριθμος αυτός είναι γνωστός και σαν αλγόριθμος διανύσματος αποστάσεων ή αλλιώς ως Bellman Ford [94]. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιείται στο πρωτόκολλο δρομολόγησης RIP του διαδικτύου. Θεωρώντας μια μικρή περιοχή  $E_0$  σε μέτρα  $m$  γύρω από ένα δέντρο, παρατηρούμε πως ακόμη και για μικρή τιμή αυτής, π.χ.  $E_0=25m$ , έχουμε ταύτιση για τρεις (3) αισθητήρες. **Συνεπώς ο αισθητήρας π.χ. με sensorID=10 μπορεί να τοποθετηθεί στο δέντρο με treeID=7.**

		TREE ID									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SENSOR ID	1	925	349	349	402	869	132	18	824	878	958
	2	657	824	878	413	388	110	428	83	555	161
	3	113	396	313	240	410	352	711	307	48	396
	4	233	427	304	450	382	561	441	686	583	182
	5	169	166	509	230	488	410	435	512	144	201
	6	68	547	233	87	12	158	85	319	563	489
	7	1071	715	625	770	1065	545	617	724	206	842
	8	171	1003	772	152	668	250	506	1053	381	67
	9	502	841	966	1011	347	399	644	182	602	717
	10	759	583	488	1073	45	541	24	318	419	705

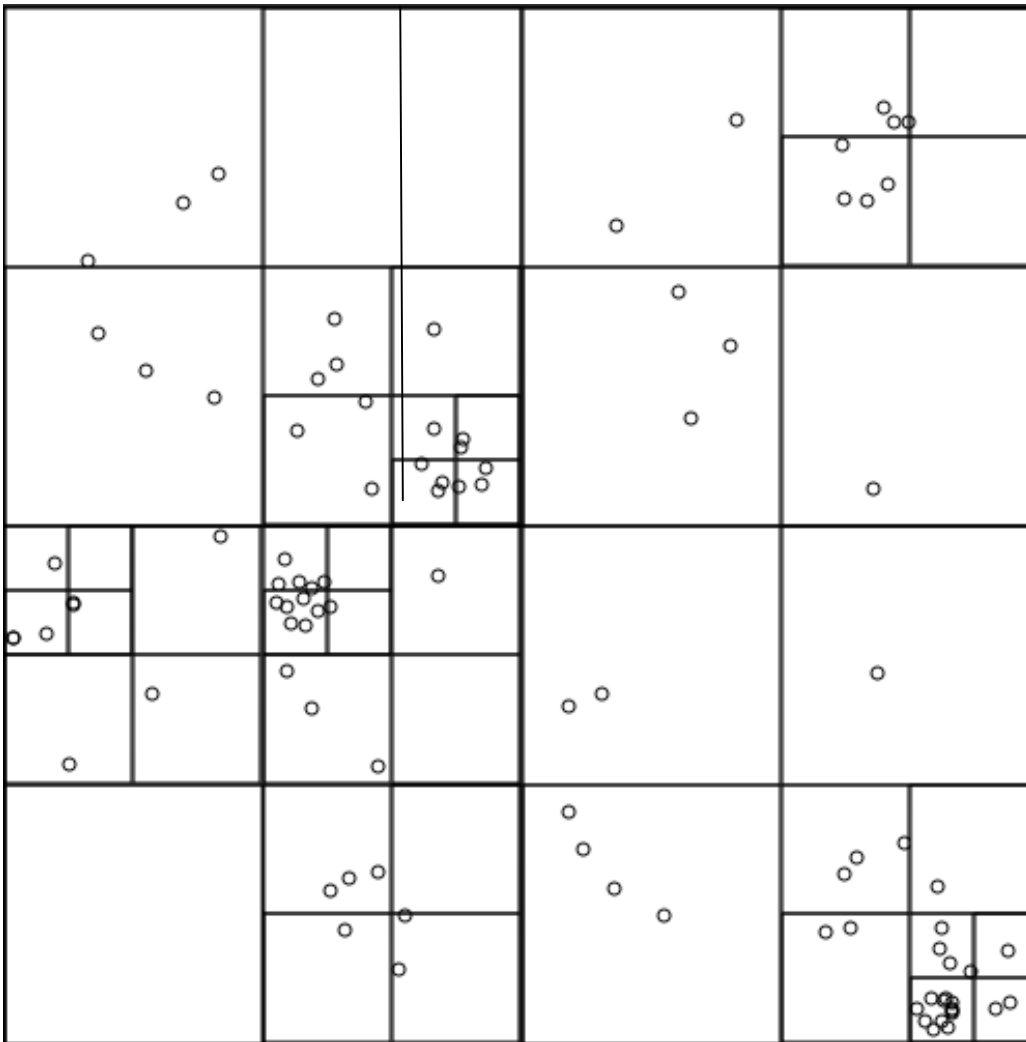
Πίνακας 12: Πίνακας αποστάσεων - Αλγόριθμος Bellman Ford

Σημειώνεται πως στον πίνακα αυτόν δεν περιγράφεται η βέλτιστη λύση όσο αφορά την πολυπλοκότητα του συνολικού αλγορίθμου, καθώς εδώ εξετάζονται οι αποστάσεις του κάθε αισθητήρα από όλα τα δέντρα, πράγμα που δεν ενδείκνυται τόσο από άποψη χρόνου όσο και από άποψη κατανάλωσης υπολογιστικής ισχύος. Με την χρήση των quad trees και την εκτέλεση του αλγορίθμου διανύσματος αποστάσεων σε κάθε τεταρτημόριο – quad επιτυγχάνεται η θεαματική μείωση της πολυπλοκότητας του συστήματος.

### 5.1.2. Αλγόριθμος Quad – Trees

Στο αλγόριθμο **Quad Trees [95]**, κάθε τετράγωνο αντιστοιχεί και σε ένα φύλλο του δέντρου. Ωστόσο το δέντρο δεν χρειάζεται να είναι ισοζυγισμένο. Δηλαδή αν υπάρχουν λίγα δέντρα στο quad δεν απαιτείται περαιτέρω κατάτμηση.

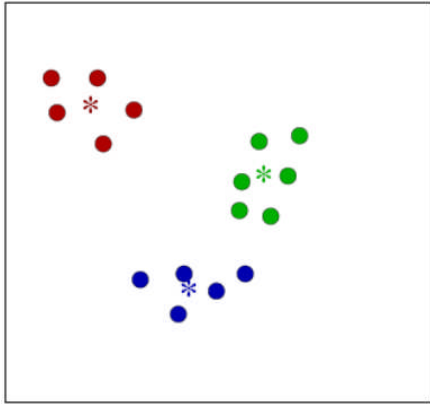
Σύμφωνα με τον εν λόγω αλγόριθμο μια τετραγωνική περιοχή μπορεί να κατατμηθεί σε τέσσερα ίσα τεταρτημόρια και η όποια διαδικασία επεξεργασίας να γίνει μέσα στο κάθε τετράγωνο. Ωστόσο, όταν ο πληθυσμός των σημείων αυξάνει μπορεί στο κάθε τεταρτημόριο να γίνει νέος διαχωρισμός σε 4 τετράγωνα. Σε άλλο τεταρτημόριο που δεν εμφανίζεται αύξηση του πληθυσμού, δεν πραγματοποιείται κατάτμηση. Κάθε τετραγωνάκι αποτελεί φύλλο ενός αρχικού δέντρου που είναι η αρχική τετραγωνική μας περιοχή. Δεδομένου ότι στο δέντρο μπορούν να υπάρχουν τετράγωνα τα οποία δεν έχουν κατατμηθεί περαιτέρω σημαίνει πως το δέντρο δεν απαιτείται να είναι ισοζυγισμένο πράγμα που για την δική μας εφαρμογή σημαίνει ότι στο εν λόγω σημείο δεν τοποθετείται δρομολογητής καθώς δεν υπάρχει ικανός πληθυσμός αισθητήρων που να δικαιολογεί την ύπαρξή του. Στιγμιότυπο λειτουργίας των Quad Trees παρατίθεται στην εικόνα 46.



Εικόνα 46: Στιγμιότυπο Quad Trees [96]

### 5.1.3. Αλγόριθμος K-means

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο Kmeans, το ζητούμενο είναι να ομαδοποιήσουμε  $k$  σημεία σε ομάδες – clusters, βρίσκοντας το γεωμετρικό τους κέντρο [97]. Κατόπιν επαναλήψεων και υπολογισμού των νέων κάθε φορά κέντρων προκύπτει η κατάσταση κατά την οποία τα κέντρα δεν μετακινούνται άλλο. Έτσι τα σημεία χωρίζονται σε ομάδες και μπορεί να υπολογιστεί το γεωμετρικό τους κέντρο. Ένα στιγμιότυπο του αλγορίθμου δεικνύεται στην εικόνα 47. Ο Kmeans μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση μας όταν μέσα σε ένα quad παρατηρείται ο πληθυσμός των αισθητήρων να βρίσκεται συγκεντρωμένος σε κάποια πλευρά ή γωνία του παρουσιάζοντας ανομοιογενή κατανομή.



Εικόνα 47: Στιγμιότυπο ομαδοποίησης αισθητήρων με τον αλγόριθμο Kmeans [98]

## 5.2. Ευριστικός Αλγόριθμος Κάλυψης Περιοχής

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται το γεωμετρικό – χωροταξικό ζήτημα της τοποθέτησης των αισθητήρων σε μια μη συστηματικά περιγραφόμενη περιβαλλοντική περιοχή. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του δικτυακού μέρους του προβλήματος λαμβάνονται υπόψη στον ευριστικό αλγόριθμο για την τοποθέτηση των αισθητήρων (localization).

### 5.2.1. Παραδοχές – Ανάλυση

Θεωρούμε μια στοιχειώδη περιβαλλοντική περιοχή, ένα στοιχειώδες πεδίο το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 48 με τους εξής συμβολισμούς: όπου

- # τα δέντρα
- \* οι αισθητήρες σε χωροθέτηση ιδανικού πλέγματος οι οποίοι σχηματίζουν κανονικά εξάγωνα

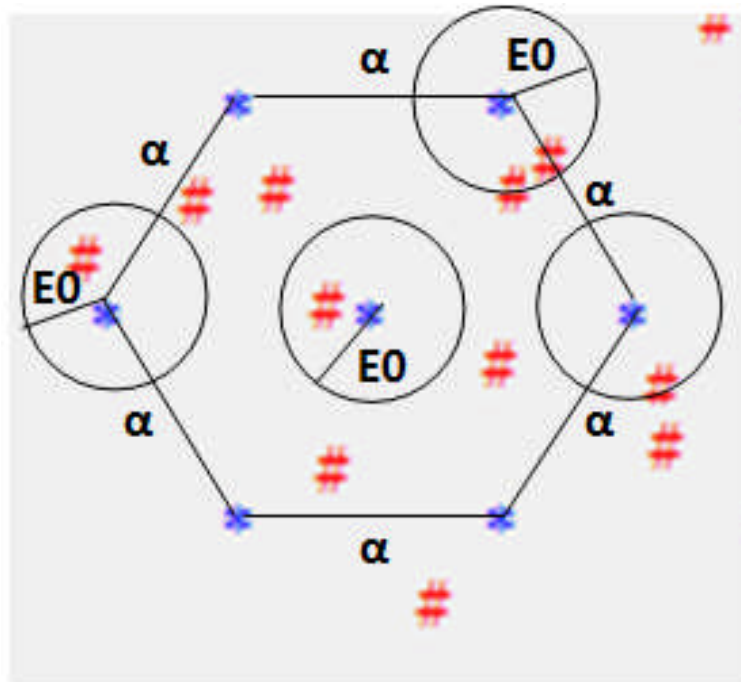
Η περίπτωση κατά την οποία το ιδανικό πλέγμα αισθητήρων συμπίπτει με τις συντεταγμένες των δέντρων θεωρείται σχεδόν απίθανη καθώς τότε το δάσος θα ήταν ιδανικό και μάλιστα θα μπορούσε η μορφολογία του να περιγραφεί με γραμμικές εξισώσεις. Το ζητούμενο στο πραγματικό πεδίο είναι να τοποθετηθεί κάθε αισθητήρας του πεδίου πάνω στο κοντινότερο σε αυτόν δέντρο. Αυτό όμως δεν μπορεί να συμβεί χωρίς όρους και περιορισμούς καθώς δεν έχει νόημα αν ο αισθητήρας πρέπει να μετακινηθεί και να φτάσει κοντά σε άλλον αισθητήρα του πλέγματος.

Θεωρούμε λοιπόν μια ακτινική απόσταση  $E_0$  γύρω από κάθε αισθητήρα ως αποδεκτή για την μετακίνηση αυτού, τέτοια ώστε:

$$0 < E_0 < \alpha/2,$$

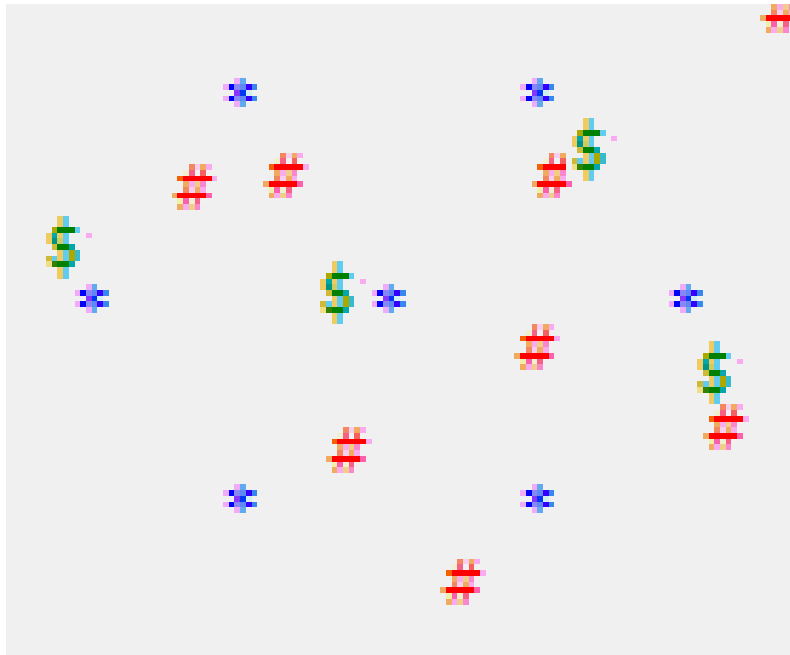
όπου  $\alpha$  είναι η πλευρά του κανονικού εξαγώνου και προφανώς του ισόπλευρου τριγώνου. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η  $E_0$  μπορεί να είναι μέχρι το μισό της τιμής του  $\alpha$ .

Κατά συνέπεια ελέγχεται η ύπαρξη δέντρου εντός του κυκλικού δίσκου με ακτίνα  $E0$ . Εάν βρεθούν περισσότερα του ενός δέντρα, τότε επιλέγεται το δέντρο εκείνο που απέχει λιγότερο από την θέση του αισθητήρα στο ιδανικό πλέγμα.



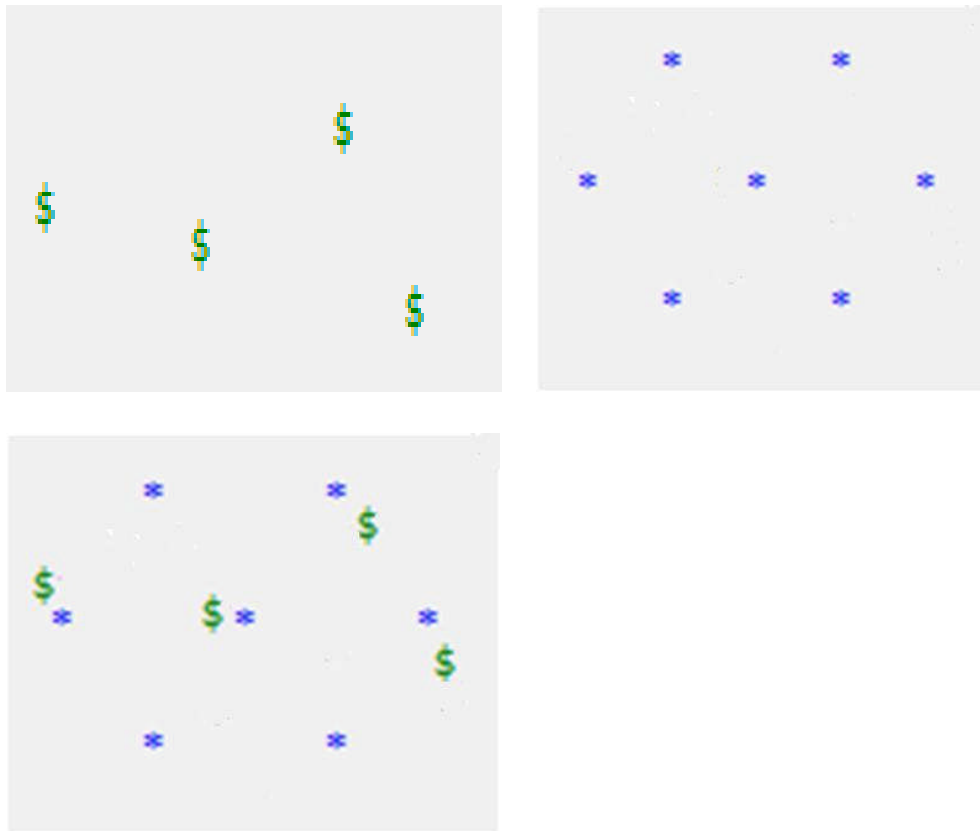
Εικόνα 48: Στοιχειώδες πεδίο με δέντρα και ιδανικό πλέγμα αισθητήρων [99], [32]

Στη συνέχεια εκτελείται η διαδικασία “Matching” κατά την οποία υπολογίζονται οι αποστάσεις και εντοπίζονται οι αισθητήρες που έχουν γύρω τους δέντρο σε απόσταση  $E0$ , έτσι ώστε εάν υπάρχει εντός αυτής της περιοχής δέντρο να τοποθετηθεί επάνω σε αυτό ο αισθητήρας. Στην εικόνα 49, με \$ δεικνύονται οι αισθητήρες εκείνοι που έχουν μετακινηθεί και ως εκ τούτου έχει καταστεί εφικτή η τοποθέτησή τους πάνω σε δέντρο, χωρίς να έχει σβηστεί κατ’ αρχήν στο σχήμα ο αρχικός αισθητήρας του πλέγματος ο οποίος κρίθηκε ότι πρέπει να μετακινηθεί.



Εικόνα 49: Matched sensors [99], [32]

Στο υπό εξέταση παράδειγμα οι αισθητήρες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον από το αρχικό grid είναι τέσσερις (4) και αυτοί αποτελούν το πραγματικό και εφικτό grid, το οποίο δεικνύεται στην εικόνα 50 και αποτελεί το στοιχειώδες δίκτυο αισθητήρων που μπορεί να τοποθετηθεί στο πεδίο.



Εικόνα 50: Πραγματικό – Στοιχειώδες πλέγμα που μπορεί να αναπτυχθεί στο πεδίο \$, σε σύγκριση με το ιδανικό \* [99], [32]

Σημειώνεται πως με ανατροφοδότηση μεταξύ των σταδίων χωροθέτησης – δημιουργίας νέων τοπολογιών, και υπολογισμό της εξασθένησης του σήματος μέσω εξομοίωσης εκ νέου κάθε φορά, παράγεται το ζητούμενο πλέγμα αισθητήρων που παρέχει την απόσταση ασφαλείας στην εκπομπή και λήψη του σήματος και διασφαλίζει την συνδεσιμότητα.

Δίδοντας κάποιες μετρικές - metrics σχετικά με περιοχή πυκνής βλάστησης μπορούμε να προσδιορίσουμε την E0 για το ιδανικό πλέγμα να παίρνει τιμές μεταξύ 0.5 – 1m.

#### **Ιδανικό Grid: E0 = 0.5 - 1m**

Ωστόσο στο πραγματικό πλέγμα για ανάπτυξη αισθητήρων σε μέση βλάστηση η E0 μπορεί να πάρει τιμές από 10 έως 25m.

#### **Πραγματικό Grid: E0 = 10, 15, 20, 25m**

Έστω τώρα το υποθετικό σενάριο κατά το οποίο σε ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο  $1\text{Km}^2$  με σχετικά μέτρια βλάστηση ο αριθμός των αισθητήρων που χρειάζονται για την ανάπτυξη του ιδανικού πλέγματος ανέρχεται στους 480 με πλευρά ισοπλεύρου τριγώνου 50m. Βρίσκουμε ενδεικτικά το πλήθος των matched sensors για τιμές του E0.

Συνοπώς έχουμε:

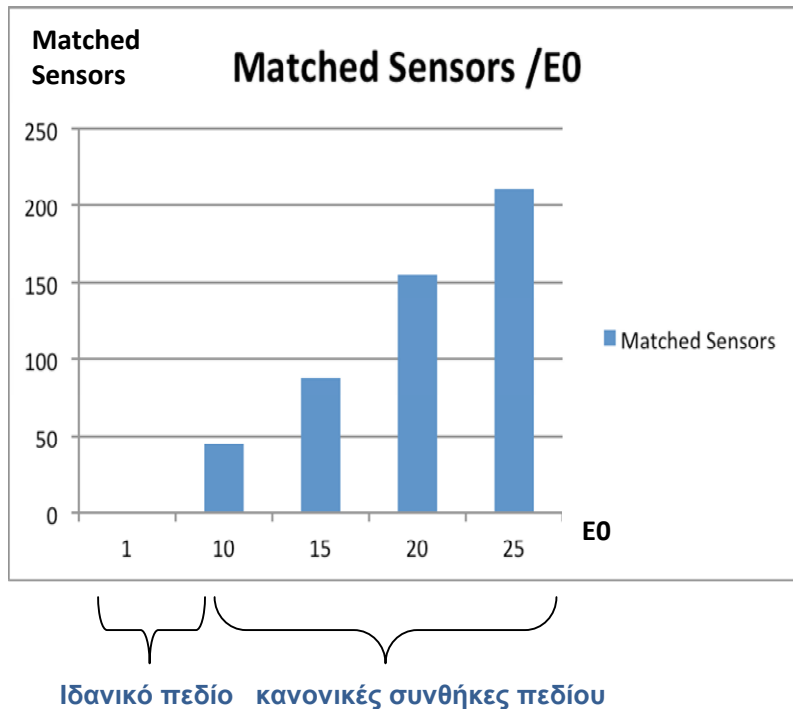
- Πεδίο:  $1\text{Km}^2$
- Πλήθος αισθητήρων ιδανικού πλέγματος: 480
- Πλευρά ισοπλεύρου τριγώνου: 50m
- E0:  $1 < E0 < 25$

Στον πίνακα 13 παραθέτονται οι υπολογισμοί για κάθε E0 με τιμές από το 1 έως το 25 και με βήμα 5, του πλήθους και του ποσοστού των αισθητήρων που μπορούν να μετακινηθούν και να τοποθετηθούν πάνω σε δέντρο.

E0	Matched Sensors	Percentage %
1	0	0
10	45	9
15	88	17
20	155	31
25	211	43

**Πίνακας 13:** Πλήθος και ποσοστό αισθητήρων που μπορούν να μετακινηθούν ανά E0.

Παρατηρούμε ότι όσο λιγότεροι αισθητήρες πρέπει να μετακινηθούν τόσο πιο ιδανικό είναι το πεδίο, ενώ όσο περισσότεροι αισθητήρες μετακινούνται τόσο πιο κοντά σε πραγματικές συνθήκες πεδίου βρισκόμαστε. Ο συσχετισμός αυτός ακριβώς δεικνύεται διαγραμματικά στην εικόνα 51.



Εικόνα 51: Χαρακτηρισμός του πεδίου ανά πλήθος αισθητήρων και E0.

### 5.2.2. Βασικές Αρχές Ευριστικού Αλγορίθμου Διαχείρισης και Κάλυψης Πεδίου

Στόχος του αλγορίθμου είναι η κάλυψη ενός ευρέος πεδίου με ένα αποτελεσματικό και αξιόπιστο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο θα ανιχνεύει γρήγορα και εύστοχα πιθανά συμβάντα και θα στέλνει με την μέγιστη δυνατή ασφάλεια το σήμα έγκαιρης προειδοποίησης. Σημείο εκκίνησης της διαδικασίας επίλυσης μπορεί να αποτελέσει η ύπαρξη κάποιας αεροφωτογραφίας από την οποία μετά από επεξεργασία της βάσει σχετικού αλγορίθμου και λογισμικού θα μπορούν να εξαχθούν οι συντεταγμένες των δέντρων του χώρου. Το ζήτημα της μεγάλης έκτασης του πεδίου, η επεξεργασία του οποίου απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ και καταναλώνει πόρους του συστήματος γενικότερα, μπορεί να αντιμετωπιστεί και να μετριαστεί με την χρήση του αλγορίθμου quad trees και την κατάτμηση του πεδίου σε μικρότερες περιοχές. Στη συνέχεια η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να γίνει εντός quad και μάλιστα παράλληλα. Ο αλγόριθμος επιδιώκει την εύρεση των δέντρων εκείνων που βρίσκονται σε εγγύτητα  $E0(m)$  σε σχέση τους αισθητήρες οι οποίοι τοποθετούνται σε επίπεδο εξομοίωσης αρχικά βάσει του θεωρητικού σεναρίου σε grid με ισόπλευρα τρίγωνα (κανονικά εξάγωνα). Όταν πληρούται το κριτήριο εγγύτητας  $E0(m)$  τότε ο αλγόριθμος ταυτίζει τις συντεταγμένες του αισθητήρα αυτού με τις συντεταγμένες του δέντρου με το οποίο βρίσκεται αρκετά κοντά βάσει του κριτηρίου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διαδικασία matching.

Σε επόμενα βήματα ελέγχεται ο πληθυσμός των ταυτισμένων αισθητήρων που αποτελούν άλλωστε και το πραγματικό δίκτυο σε σχέση με ένα ελάχιστο όριο  $M$ . Εάν οι “matched sensors” είναι περισσότεροι από  $M$  σε πλήθος, τότε στο κέντρο  $(a/2, a/2)$  του με πλευρά  $a$  quad, τοποθετείται



δρομολογητής / gateway με ακτίνα  $R$  ίση με  $R = \frac{a\sqrt{2}}{2}$ . Σημειώνεται πως η εν λόγω ακτίνα  $R$  δίνει περιθώρια για επικαλύψεις - overlaps σε γειτονικά quads. Είναι η αναγκαία ακτίνα, το κάτω φράγμα αυτής, ώστε να καλύπτουμε όλη την περιοχή και να μην έχουμε σπές, δηλαδή περιοχές χωρίς κάλυψη. Αυξάνοντας την ακτίνα κατά βούληση και πάντα εντός ορίων εμβέλειας μπορεί κανείς να επιτύχει μεγαλύτερες επικαλύψεις σε γειτονικά quads και κατ' επέκταση μεγαλύτερο βαθμό εφεδρείας, redundancy, του δικτύου.

Εφόσον λοιπόν μετά τους αισθητήρες προστίθεται και ο δρομολογητής εντός του quad τότε δημιουργείται δίκτυο, το οποίο μένει να αξιολογηθεί ως προς την συνεκτικότητά του (connectivity), ώστε η μετάδοση του σήματος από τους αισθητήρες στον δρομολογητή να είναι αξιόπιστη. Στην περίπτωση που δεν πληρούται το κριτήριο, τότε επανασχεδιάζεται το grid (αλλάζει η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων ή μετακινείται όλο το grid ή περιστρέφεται) και επαναλαμβάνονται τα βήματα από την αρχή ώστε να βρεθεί ένα εφικτό χωροταξικά και επικοινωνιακά δίκτυο. Αυτό ισχύει για όλα τα quads. Να σημειωθεί ότι οι δρομολογητές gateways στέλνουν το σήμα τους ασύρματα μέσω π.χ. GSM σε κάποιον σταθμό εποπτείας και καταγραφής των συμβάντων. Είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση και σε Google Maps.

Στη συνέχεια αναλύονται οι παραδοχές και τα βήματα του αλγορίθμου.

1. Θεωρούμε πως για να προσεγγίσουμε αλγοριθμικά τη λύση, θα πρέπει να υπάρχει κάποιο δεδομένο στον χώρο. Έστω ότι αυτό είναι οι συντεταγμένες των δέντρων. (π.χ. από επεξεργασία αεροφωτογραφιών).
2. Για λόγους μείωσης της πολυπλοκότητας του συστήματος, χωρίζουμε την περιοχή σε επιμέρους quads με την χρήση του αλγορίθμου των quad trees, ώστε να είναι εφικτή η εργασία εντός quad.
3. Για την ανάπτυξη του συνολικού δικτύου θα χρησιμοποιηθεί η βελτιστοποιημένη διευρυμένη τοπολογία πλέγματος κυψελών με επικαλύψεις (προσθήκη κυψελών μαζί με sensor grid ισοπλευρών τριγώνων).
4. Διενεργείται δοκιμή ταύτισης της αρχικής τοποθεσίας των αισθητήρων του πλέγματος εντός του κάθε quad σε σχέση με τις συντεταγμένες των δέντρων. Η εργασία στα quads μπορεί να είναι και παράλληλη.
5. Αναζητείται μια περιοχή  $E0(m)$  ως ελάχιστη επιτρεπτή Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ αισθητήρα και δέντρου. Θεωρούμε πως όταν ο αισθητήρας απέχει έως  $E0(m)$  από το κοντινότερο του δέντρο τότε μπορούμε να πούμε ότι μπορεί να ταυτιστεί με τις συντεταγμένες του δέντρου, ώστε να τοποθετηθεί επάνω του.
6. Η διαδικασία ταύτισης (matching) διενεργείται μέσω του Αλγορίθμου Διανύσματος Αποστάσεων γνωστού και ως Bellman –Ford ή Ford Flukerson. Δεδομένου ότι το matching

διενεργείται εντός του κάθε quad ο αριθμός επαναλήψεων της διαδικασίας ταύτισης μειώνεται σε σχέση με πιθανή εκτέλεσή του για όλη την αρχική περιοχή.

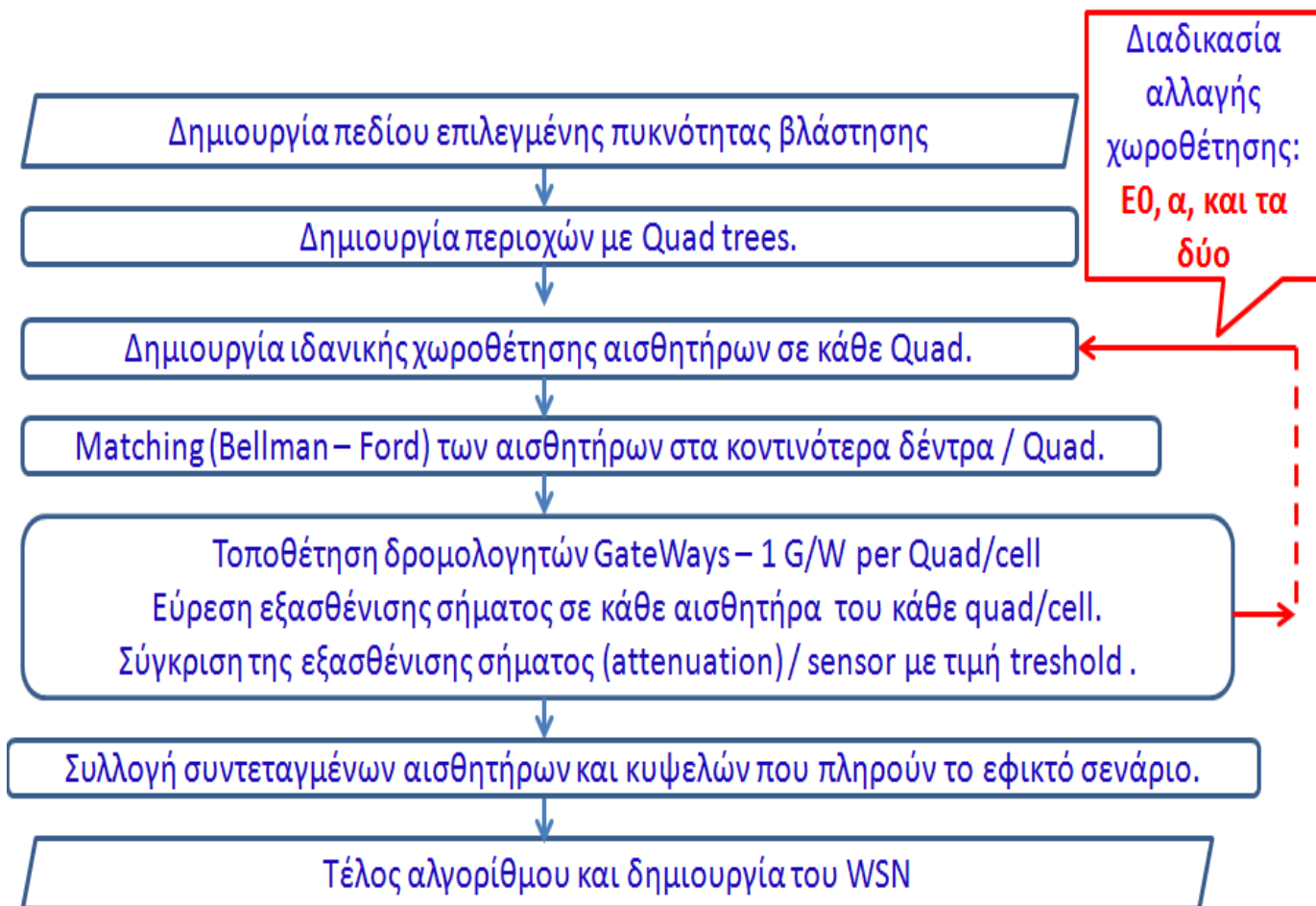
7. Προβλέπεται διαδικασία χειροκίνητης, προς το παρόν, μετατόπισης του πλέγματος αισθητήρων με στόχο την εύρεση εκείνου του σεναρίου που ταυτίζει τους περισσότερους αισθητήρες στα δέντρα.
8. Στη συνέχεια, έχοντας πλέον δεδομένες τις συντεταγμένες των αισθητήρων οι οποίοι μπορούν να τύχουν μετακίνησης και τοποθέτησης ανά quad, τότε αναζητούμε τα quads εκείνα που περιέχουν πληθυσμό αισθητήρων πάνω από ένα όριο  $M$ .
9. Στα quads με πληθυσμό αισθητήρων  $>M$ , αντιστοιχούμε και μία κυψέλη/ cell με κέντρο το κέντρο του quad. Στα υπόλοιπα εξετάζεται η περίπτωση του αλγορίθμου Kmeans, ώστε να ομαδοποιήσει αισθητήρες οι οποίοι πιθανό να βρίσκονται διάσπαρτοι σε γειτονικά αραιά quads και το πλήθος τους υπαγορεύει την προσθήκη κυψέλης.
10. Τα properties του κάθε cell, είναι οι αισθητήρες και τα δέντρα που ανήκουν σε αυτό, παράλληλα με τις συντεταγμένες του gateway (Xκ, Yκ) και της ακτίνας μήκους R.
11. Ενσωματώνονται και οι εξισώσεις σχετικά με το foliage και το path loss model σε κάθε quad βάσει των μοντέλων των ταξινομημένων περιοχών ώστε να μπορεί να γίνει και εκτίμηση συνεκτικότητας (connectivity).
12. Ολοκληρώνεται σε ένα σύστημα το δικτυακό κομμάτι του προβλήματος μαζί με το τοπολογικό, προσδίδοντας μια συνολική προσέγγιση στη λύση του προβλήματος.

### 5.2.3. Σχηματική Περιγραφή του Αλγορίθμου

Στην συνέχεια παρατίθεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου (εικόνα 52) ο οποίος συνδυάζει μια εφικτή δικτυακή και γεωμετρική λύση στο πεδίο. Σε πρώτη φάση το λογισμικό δημιουργεί ένα πεδίο επιλεγμένης πυκνότητας βλάστησης και τυπικής απόκλισης. Στη συνέχεια δημιουργούνται τα απαιτούμενα quads στην περιοχή με κριτήριο τον πληθυσμό των δέντρων ανά quad να είναι μεγαλύτερο από ένα ζητούμενο όριο. Οποιοδήποτε quad παρουσιάζει χαμηλό πληθυσμό δέντρων βάσει καθοριζόμενου ορίου ο αλγόριθμος δεν θα συνεχίζει εντός του. Συνεπώς το παραγόμενο quad tree δεν κρίνεται αναγκαίο να είναι ισοζυγισμένο.

Έπειτα δημιουργείται ένα πλέγμα αισθητήρων βάσει της κατηγοριοποιημένης δασικής περιοχής και της τοπολογίας που έχουμε επιλέξει (βελτιστοποιημένη τοπολογία πλέγματος κυψελών με επικαλύψεις). Στο επόμενο βήμα εκτελείται η διαδικασία “matching” για την εύρεση εγγύτητας μεταξύ αισθητήρων και δέντρων με την χρήση του αλγορίθμου Bellman-Ford σε κάθε quad, καθώς οι αισθητήρες θα πρέπει να τοποθετηθούν στα πλησιέστερα δέντρα. Ως βοηθητικό εργαλείο στην εύρεση καλύτερου matching παρέχεται και η λειτουργία μετατόπισης του πλέγματος κατά  $D_x$  και  $D_y$ . Αφού τελειώσει η διαδικασία matching τότε στο κέντρο του κάθε quad αντιστοιχείται κι ένας δρομολογητής. Εάν το quad δεν περιέχει ικανό πλήθος δέντρων και κατ’ επέκταση αισθητήρων δεν τοποθετείται

δρομολογητής. Άλλωστε για να έχουμε και περαιτέρω κατάτμηση του quad σημαίνει ότι έχουμε ικανό πληθυσμό δέντρων-αισθητήρων βάσει του κριτηρίου κατάτμησης. Καθώς λοιπόν έχουν τοποθετηθεί και οι αισθητήρες αλλά και οι δρομολογητές τότε εκτελείται η διαδικασία εξομοίωσης για την εύρεση εξασθένισης σήματος σε κάθε quad βάσει της μοντελοποίησης που έχει γίνει από πριν ανά περιοχή και υπολογίζεται για την συγκεκριμένη τοπολογία η δικτυακή συμπεριφορά του δικτύου (connectivity). Στην περίπτωση που η ισχύς του λαμβανομένου σήματος βρίσκεται κάτω από το κατώφλι συνδεσιμότητας, τότε θεωρούμε ότι ο αλγόριθμος έχει εκτελεστεί επιτυχώς και έχει παράξει ένα ικανοποιητικό δίκτυο σε επίπεδο δικτυακό και σε επίπεδο τοπολογίας- γεωμετρίας. Σε διαφορετική περίπτωση ακολουθείται η ανάδραση στο λογικό διάγραμμα ώστε να δημιουργηθεί μια νέα τοπολογία η οποία θα εξεταστεί με την σειρά της σε ό,τι αφορά την δικτυακή της απόδοση. Στο τέλος του αλγορίθμου συλλέγουμε τις συντεταγμένες των αισθητήρων και των δρομολογητών και καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη του δικτύου αισθητήρων στο πεδίο.



Εικόνα 52: Λογικό Διάγραμμα του ευριστικού αλγορίθμου κάλυψης πεδίου

### 5.2.4. Μια αντικειμενοστρεφής υλοποίηση

Σχετικά με τα συστατικά του λογισμικού (εικόνα 53) οι βασικές κλάσεις είναι πέντε (5):

```

class trees {
    int treeID;
    float x,y; }

class sensors {
    int sensorID;
    float x,y;
}

class matchedSensors {
    int matchedSensorsID;
    float x,y;
}

class quad {
    int quadID;
    float x,y;
    float height,width;

    List<trees> treeList = new List<trees>;
    List<sesnors> senseList = new List<sesnors>;
    List<matchedSesnors> mSensList = new List<matchedSesnors>;

    public void matching (List<sensors> senseList, List<trees> treeList)
    {
        // matching algo
    }

    public List<matchedSensors> mQuadSensors()
    {
        return mSensList;
    }
}

class cell { // cell is every leaf in the quad tree. It is NULL if no Gateway is placed
    int cell_ID
    float x,y,
    float R,
    quad quad_ID;

    public void GWplacement (quad Q1)
    {
        // G/W placement algo
    }
}

```

Εικόνα 53: Αντικειμενοστρεφής προσέγγιση των συστατικών του αλγορίθμου σε C#

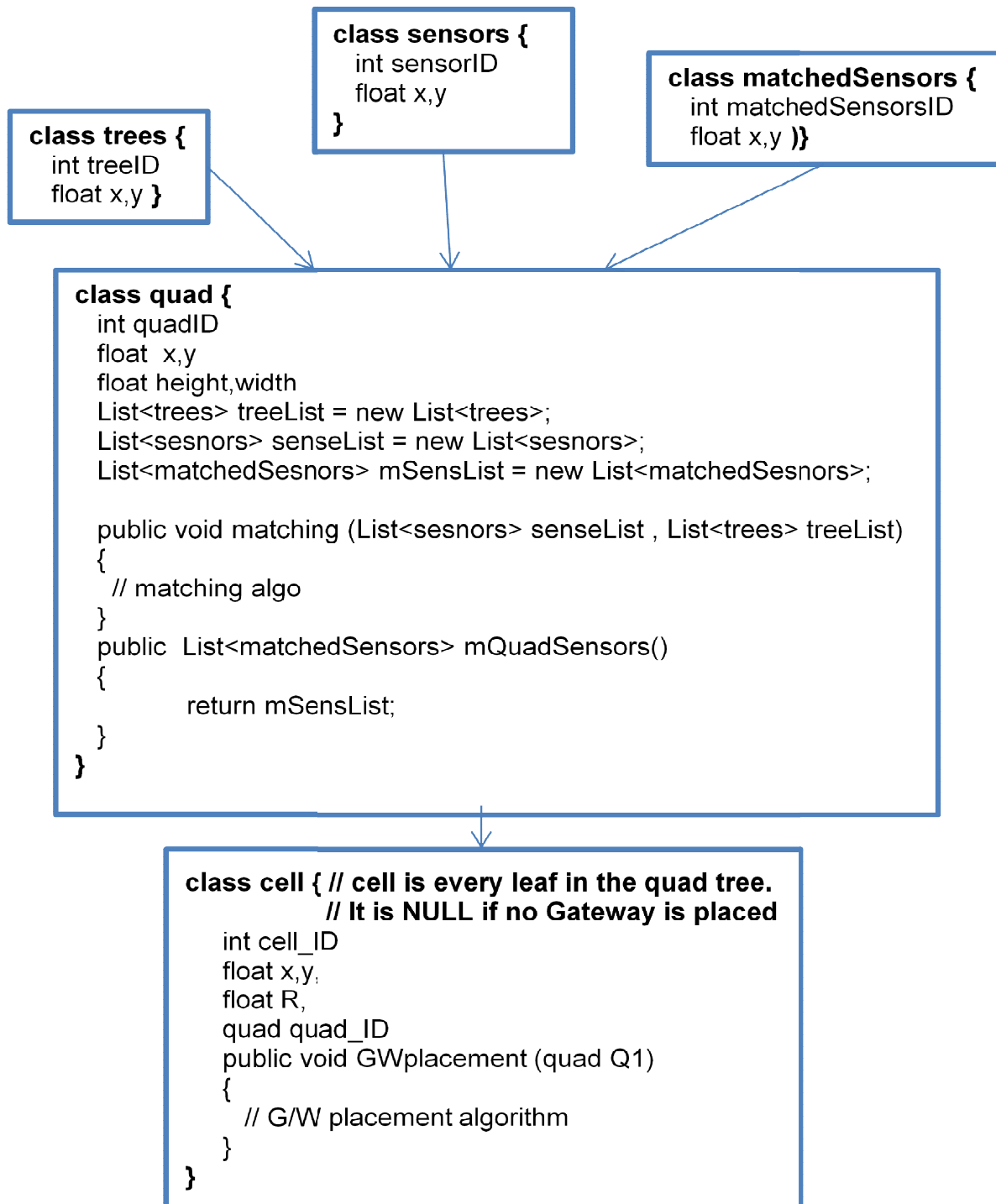
Οι κλάσεις `trees`, `sensors` και `matchedSensors` αποτελούνται βασικά από μια μεταβλητή με το ID του στιγμιοτύπου και τις συντεταγμένες  $x,y$ . Αναφορικά με συντεταγμένες χώρου μπορεί να προστεθεί και η μεταβλητή  $z$ .

Η κλάση `quad` συντίθεται από τις υπόλοιπες και η ορθή δημιουργία στιγμιοτύπων αυτής με τα αντίστοιχα `properties` είναι κρίσιμης σημασίας.

Συγκεκριμένα ένα quad χαρακτηρίζεται από ένα quad\_ID, τις συντεταγμένες του κέντρου του x,y καθώς και από το μήκος και το ύψος του. Επίσης περιέχει και τρεις συνδεδεμένες λίστες στις οποίες φυλάσσονται τα δέντρα που ανήκουν στο εν λόγω quad, οι αισθητήρες αλλά και οι αισθητήρες που έχουν γίνει matched. Περιλαμβάνει ακόμη και τις μεθόδους matching() με τον αλγόριθμο ταύτισης αισθητήρων και την mQuadSensors() η οποία επιστρέφει την λίστα με τους matched sensors για το κάθε στριγμιότυπο του quad.

Τέλος, η class cell αποτελείται από ένα cell\_ID, τις συντεταγμένες στις οποίες θα τοποθετηθεί ο Gateway (x,y), την ακτίνα κάλυψης R και το quad στο οποίο αναφέρεται το cell. Ακολουθεί επίσης και η μέθοδος **GWplacement (quad Q1)** στην οποία περιλαμβάνεται και ο αλγόριθμος τοποθέτησης του δρομολογητή.

Το διάγραμμα εξαρτήσεων λογισμικού δεικνύεται στην εικόνα 54.



Εικόνα 54: Συστατικά του λογισμικού και εξαρτήσεις

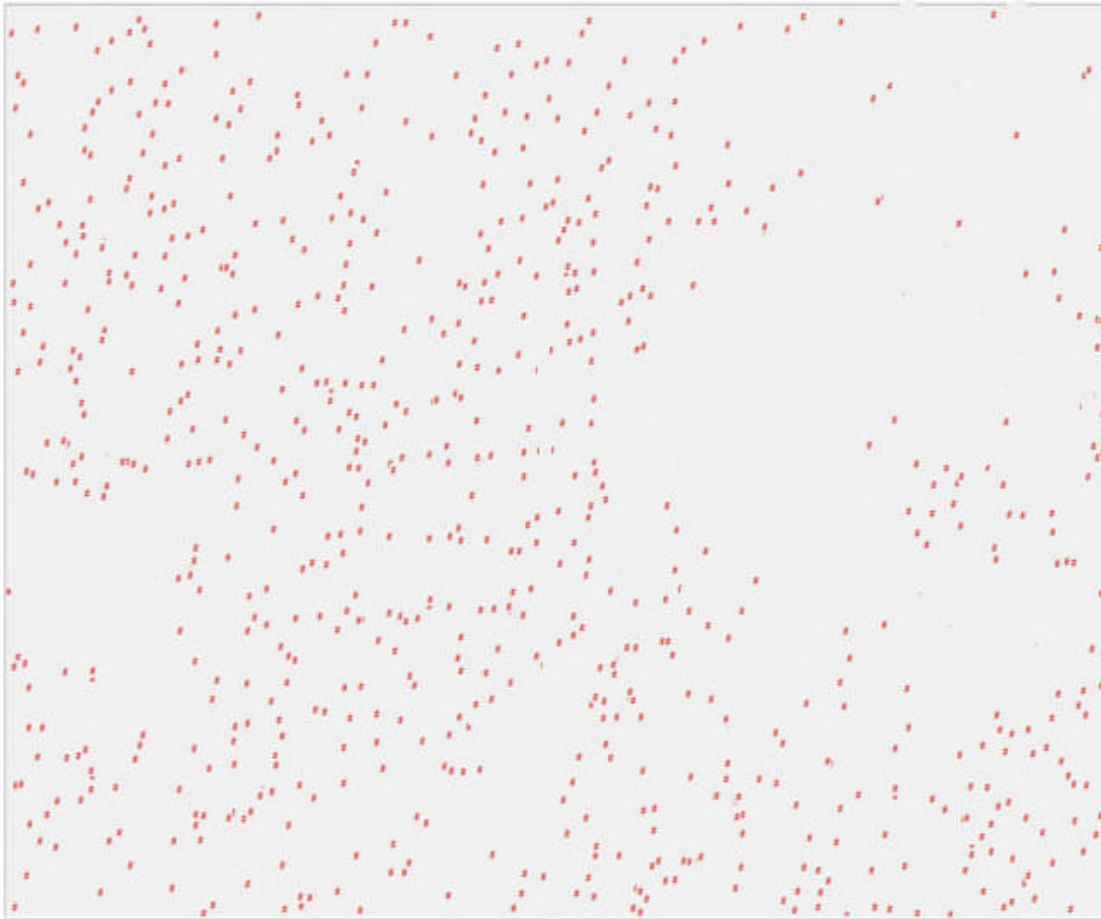
### 5.3. Στιγμιότυπα εκτέλεσης

Στην συνέχεια γίνεται παράθεση στιγμιοτύπων εκτέλεσης του λογισμικού σε ό,τι αφορά την κατάτμηση της αρχικής περιοχής σε μικρότερες και την χωροθέτηση των αισθητήρων. Σημειώνεται πως το λογισμικό είναι υπό κατασκευή και εξέλιξη. Επί του παρόντος εστιάζει στην επίλυση του γεωμετρικού προβλήματος λαμβάνοντας δικτυακά δεδομένα από τα αποτελέσματα που έχουν παραχθεί από την

εξομοίωση και την μοντελοποίηση περιοχών. Δηλαδή το λογισμικό δεν συνδυάζει μέχρι στιγμής το «όλα σε ένα», όπως περιγράφεται στον ευριστικό αλγόριθμο.

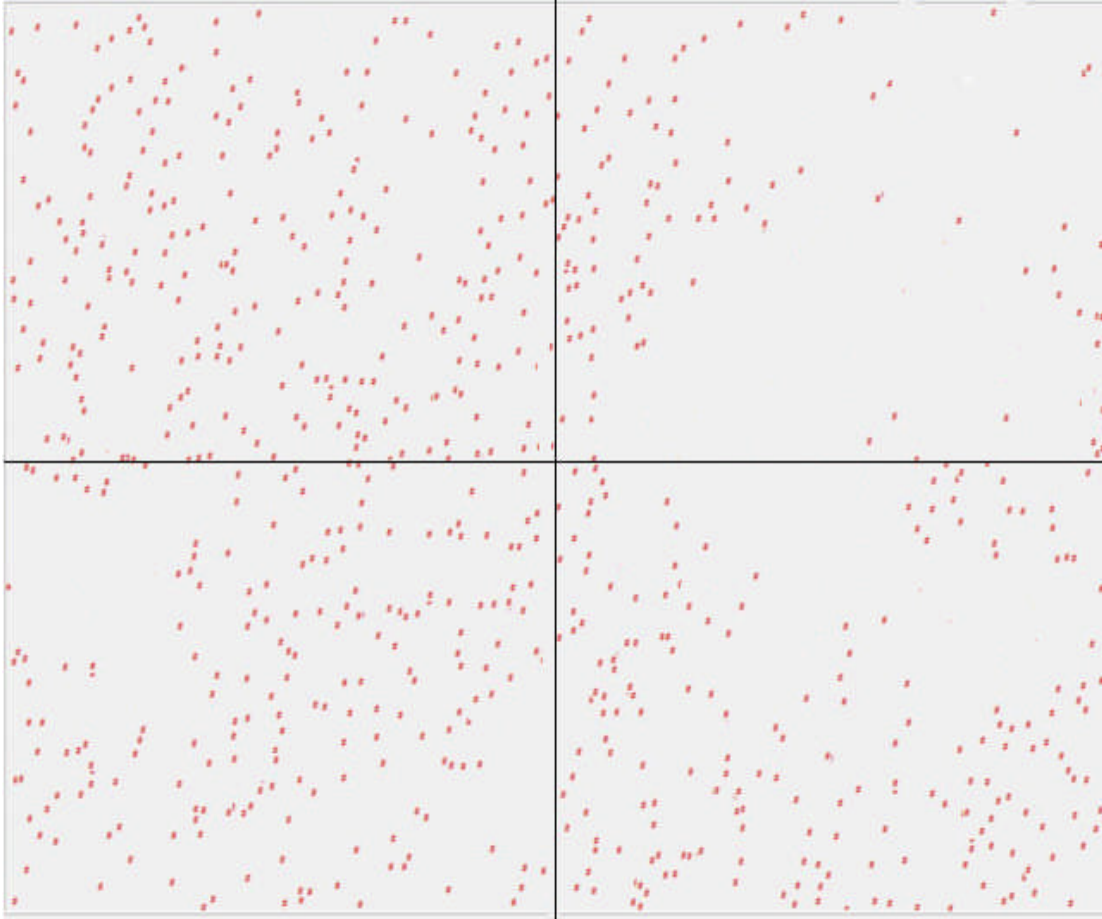
### 5.3.1. Εφαρμογή στο σύνολο μιας υποθετικής περιοχής

Ξεκινάμε με μια περιοχή η οποία περιέχει μια τυχαία διασπορά δέντρων (εικόνα 55). Τα δέντρα συμβολίζονται στο σχήμα με #. Εκτελείται το πρώτο βήμα του αλγορίθμου των quad trees και κατατμείται η περιοχή σε 4 τετράγωνα. Αναλόγως του πληθυσμού των δέντρων επιλέγονται και τα quads για τα οποία θα γίνει περαιτέρω κατάτμηση. Από την διαγώνιο των quads υπολογίζουμε και την ακτίνα ενός κύκλου ο οποίος θα έχει κέντρο το κέντρο του quad και ακτίνα τέτοιου μήκους ώστε το quad να είναι εγγεγραμμένο, να περιέχεται στον κύκλο. Το κέντρο των τελικών quad θα αποτελέσει και το πιθανό σημείο τοποθέτησης των δρομολογητών. Θεωρούμε μια μέση εμβέλεια  $R(m)$  των δρομολογητών η οποία έχει υπολογιστεί πειραματικά. Όταν το quad ικανοποιεί τις συνθήκες του επαρκούς πληθυσμού σε δέντρα και της απαιτούμενης εμβέλειας  $R$  του δρομολογητή, δηλαδή το ήμισυ της διαγώνιου  $\Delta$  του quad βρίσκεται εντός του διαστήματος  $250m \leq \Delta/2 \leq 200m$ , τότε δεν κατατμείται άλλο και τοποθετείται στο κέντρο του ο δρομολογητής  $G/W$ . Βασικότερη συνθήκη όλων είναι η κατ' αρχήν αποδεκτή εμβέλεια  $R$  του δρομολογητή να είναι κοντά στην προκύπτουσα  $\Delta / 2$ .



Εικόνα 55: Τυχαία διασπορά δέντρων.

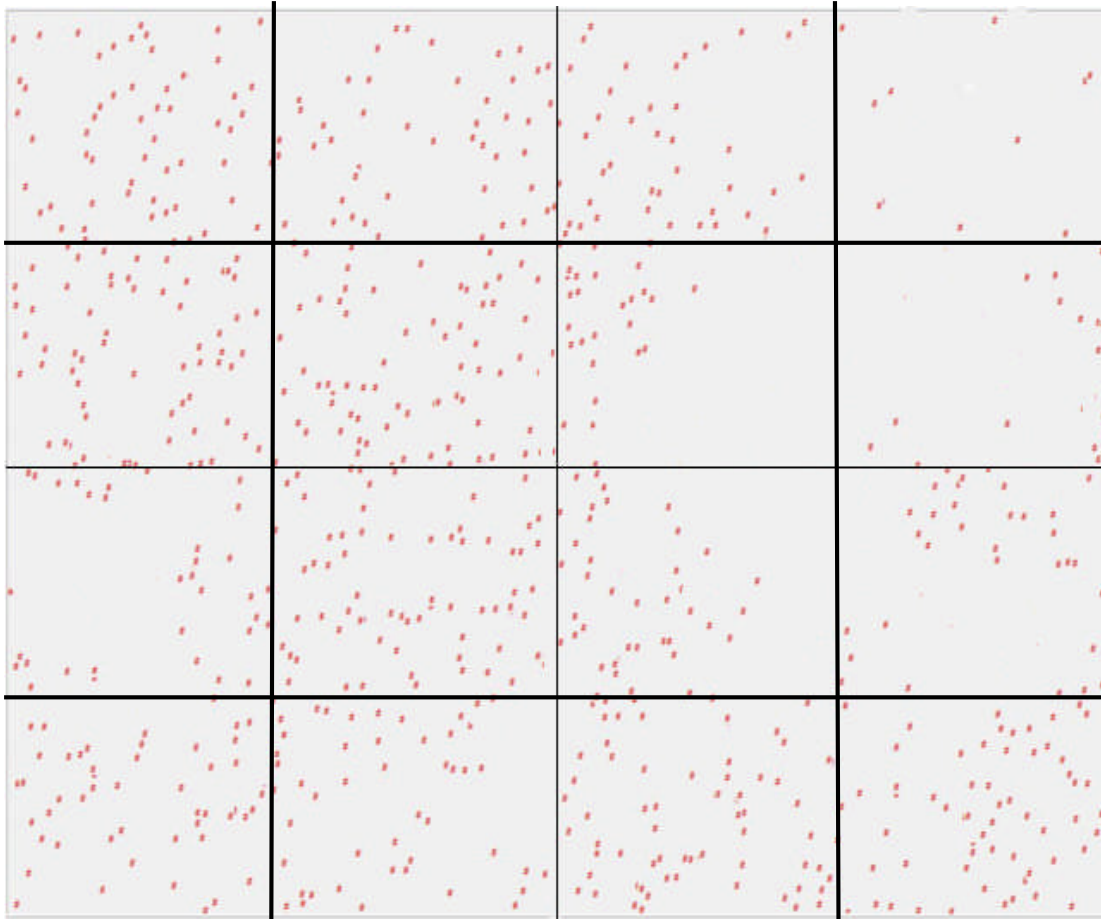
Θεωρούμε μια περιοχή  $1400\text{m} \times 1400\text{m}$ , ήτοι  $1,96\text{Km}^2$  (σχεδόν  $2\text{ Km}^2$ ) όπως δεικνύεται στην εικόνα 56 και την κατατμούμε σε quads. Ως κριτήριο διακοπής της επαναληπτικής κατάτμησης ανά quad, απαιτούμε ο πληθυσμός δέντρων εντός quad να είναι μικρότερος ενός αριθμού  $M$  ή (OR) το ήμισυ της Διαγωνίου  $\Delta$  του quad να είναι μεταξύ  $250\text{m} \leq \Delta/2 \leq 200\text{m}$ .



Εικόνα 56: Πρώτο βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου των quad trees

Το αρχικό πεδίο των  $1,96\text{Km}^2$  έχει τώρα χωριστεί σε 4 quads με πλευρά  $700\text{m}$  έκαστο. Μέχρι στιγμής το δέντρο είναι ισοζυγισμένο.





Εικόνα 57: Δεύτερο βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου των quad trees

Στο δεύτερο βήμα του αλγορίθμου (εικόνα 57), προκύπτουν 16 quads πλευράς 350m, και το ήμισυ της διαγωνίου του quad ικανοποιεί τη σχέση:

$$250\text{m} \leq \Delta / 2 \leq 200\text{m} .$$

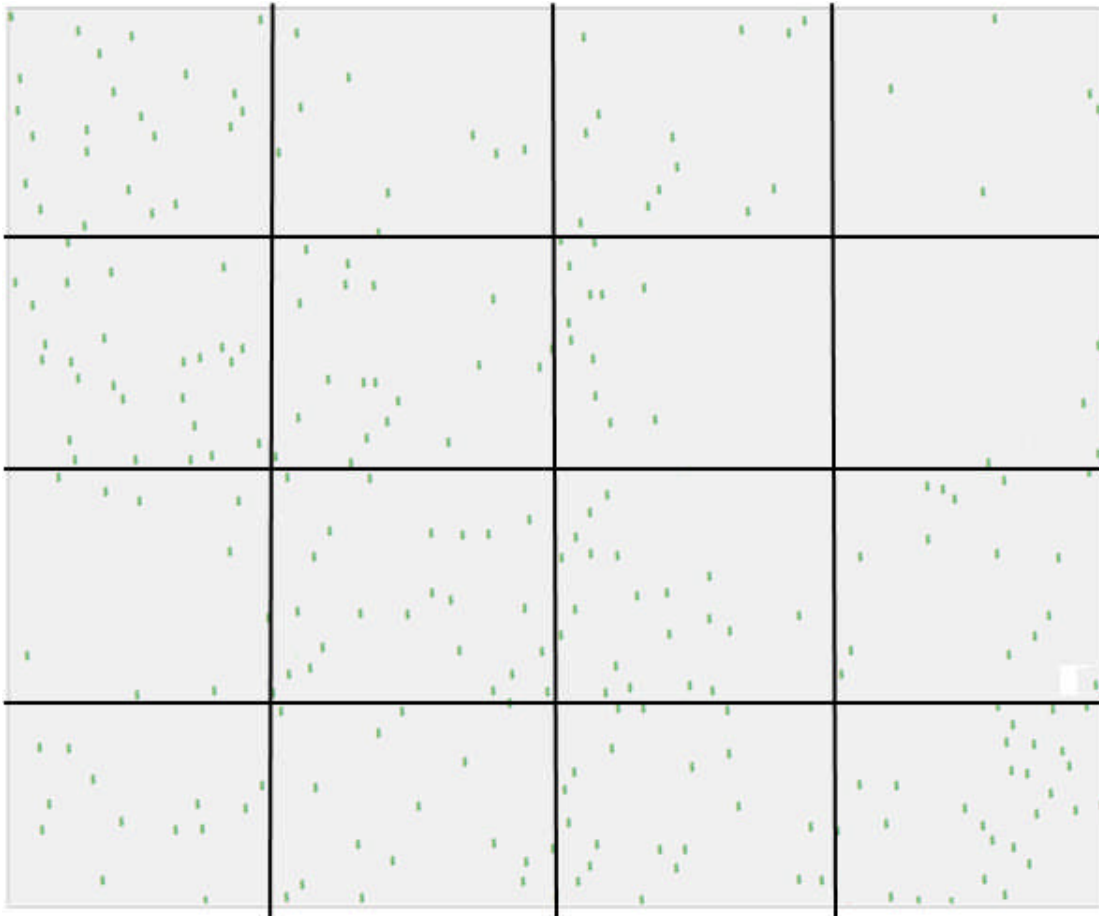
Επίσης έχουμε:

$$\Delta/2 = R_{GW} = 245\text{m} \text{ (εντός της υπολογισμένης, ανά περιοχή, εμβέλειας gateway)}$$

Ελέγχουμε βάσει των κριτηρίων εάν θα πρέπει να συνεχίσει ο αλγόριθμος των quad trees. Παρατηρούμε πως η πιθανή ακτίνα R του δρομολογητή είναι κοντά στην αποδεκτή εμβέλεια του δρομολογητή βάσει των περιοχών μοντελοποίησης.

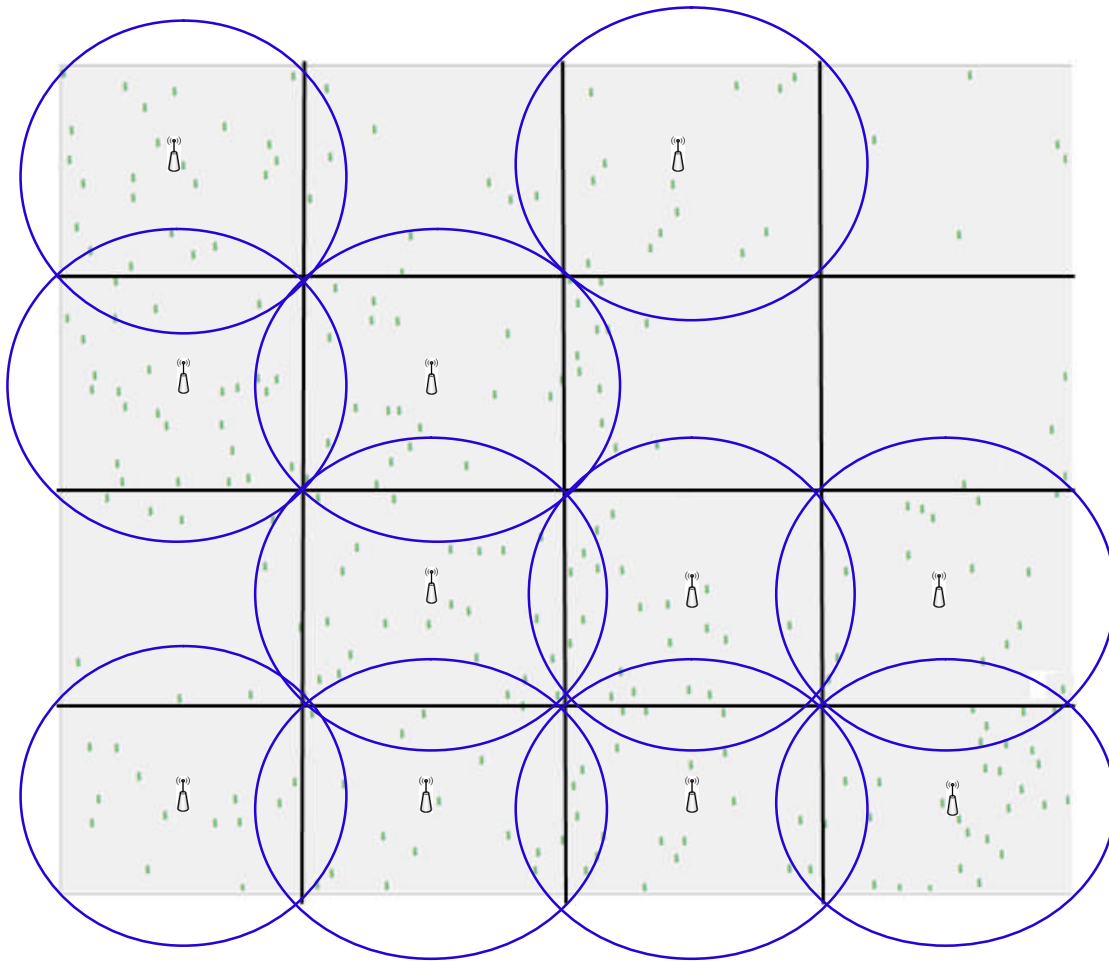
Συνεπώς διακόπτεται ο αλγόριθμος των quad trees και ξεκινά η εκτέλεση του αλγορίθμου Bellman - Ford εντός του κάθε quad που εμφανίζει πληθυσμό δέντρων  $> M$ . Στη συνέχεια, βάσει ορισμού περιοχής  $E0(m)$  εγγύτητας στα δέντρα ευρίσκονται οι “matched sensors”, οι οποίοι συμβολίζονται με \$.

Στο τέλος της διαδικασίας matching εντοπίζονται οι συντεταγμένες των αισθητήρων που είναι δυνατό να τοποθετηθούν επάνω σε δέντρο σε μια περιοχή εγγύτητας (απόσταση μεταξύ δέντρου και ιδανικού πλέγματος αισθητήρων)  $E0(m)$  (εικόνα 58).



Εικόνα 58: Matched sensors, οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε δέντρα εγγύτητας  $E0(m)$ .

Στη συνέχεια στα quads εκείνα που παρουσιάζουν πληθυσμό matched sensors μεγαλύτερο ενός ορίου  $M$ , **matched sensors**  $> M$ , τοποθετούμε τον δρομολογητή - Gateway στο κέντρο του quad. Η ακτίνα θα είναι τέτοια που το quad που θα προκύψει να είναι εγγεγραμμένο μέσα στον κύκλο που ουσιαστικά αποτελεί και την **κυψέλη** την οποία καλύπτει ο δρομολογητής, όπως δεικνύεται στην εικόνα 59.



Εικόνα 59: Τοποθέτηση των δρομολογητών στα quads με πληθυσμό *matched sensors*  $>M$ .

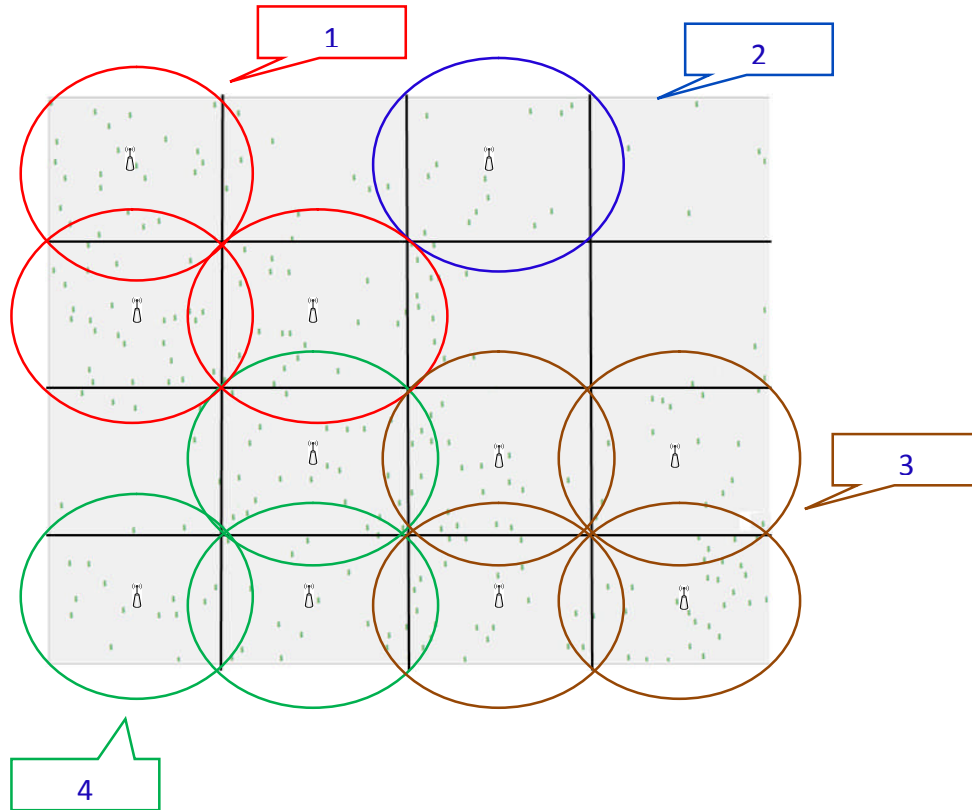
Έπειτα σε κάθε quad που έχει τοποθετηθεί δρομολογητής εκτελούμε την διαδικασία **εξομοίωσης δικτύου** ώστε να αποφανθούμε για την **συνδεσιμότητα - connectivity** των κόμβων με τον δρομολογητή .

Παρατηρούμε πως η τοπολογία δικτύου παρουσιάζει επικαλύψεις – overlaps, με συνέπεια το δίκτυο να παρουσιάζει **εφεδρείες** και κάποια σχετική ανοχή σε βλάβες – **redundancy**.

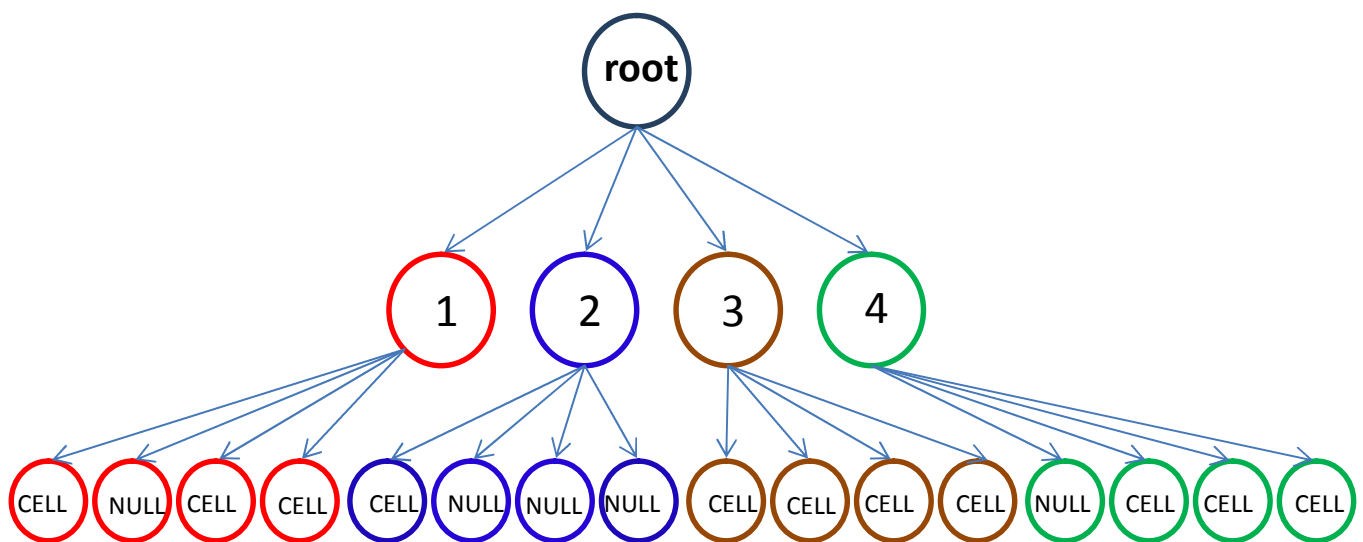
Για την εγκατάσταση ενός τόσο ακριβού δικτύου και τέτοιας γεωγραφικής έκτασης επιβάλλεται η εκ των προτέρων εκτίμηση της συνδεσιμότητας των κόμβων αλλά και της εφεδρείας σε βλάβες (π.χ. σε πιθανή βλάβη του δρομολογητή).

Υψηλότερα επίπεδα εφεδρείας επιτυγχάνονται πάντα με μεγαλύτερο κόστος αναφορικά με τον εξοπλισμό. Μπορούμε δηλαδή να τοποθετήσουμε περισσότερους gateways και να αυξήσουμε την επιφάνεια των **επικαλύψεων – overlaps**. Μπορούμε δηλαδή να αλλάξουμε το κριτήριο δημιουργίας quads και να απαιτήσουμε να δημιουργηθούν quads με πλευρά μικρότερη των 350m. Συνεπώς σε μια τέτοια περίπτωση τα quads θα αυξηθούν αρκετά, μαζί με το πλήθος των δρομολογητών και μαζί με το επίπεδο εφεδρείας – redundancy και βεβαίως το κόστος.

Τέλος το παραγόμενο quad tree δεικνύεται στη συνέχεια (εικόνα 60 και 61). Κάθε φύλλο του αποτελεί και ένα cell με τα αντίστοιχα class properties και στο οποίο τοποθετείται δρομολογητής. Αν δεν είναι cell τότε περιέχει NULL. Επί της ουσίας δηλαδή το δέντρο δεν είναι ισοζυγισμένο.



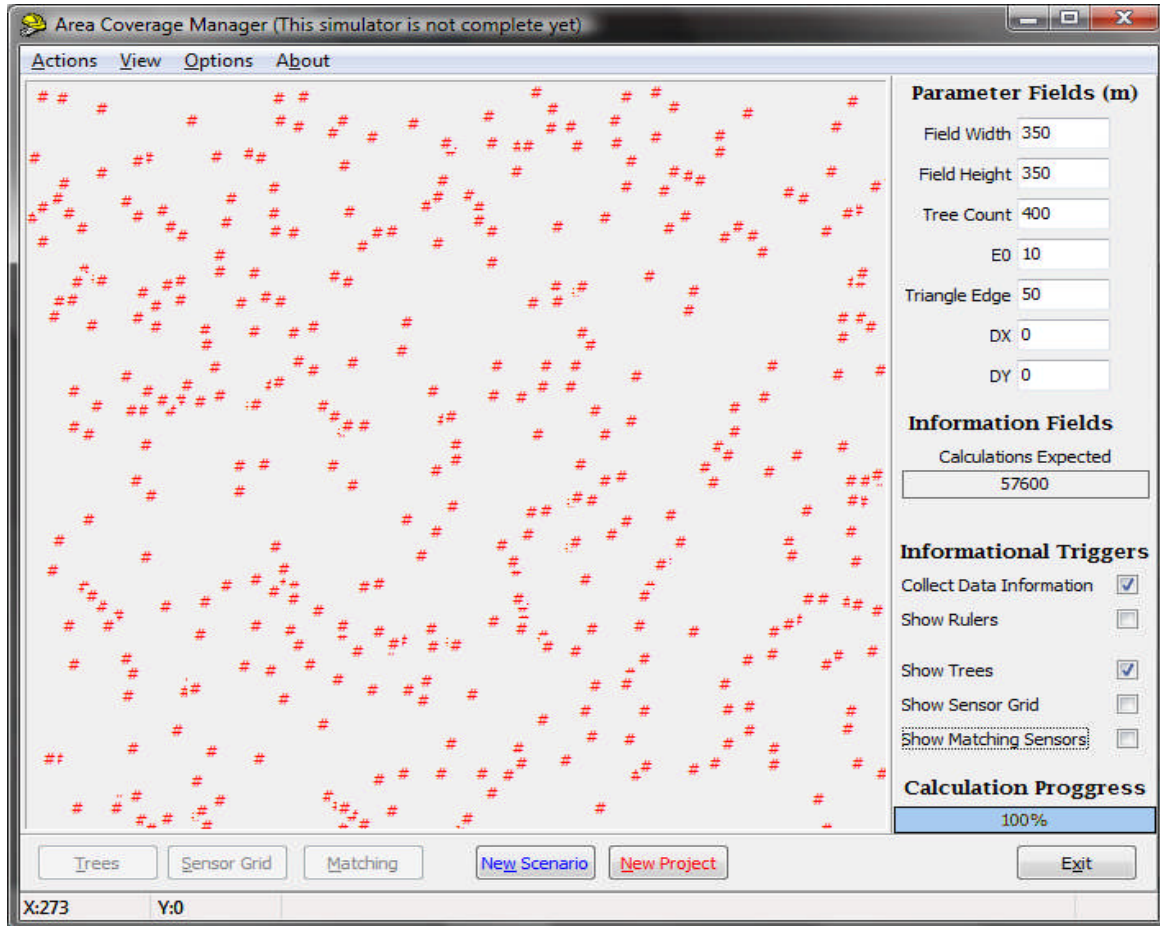
Εικόνα 60: Το πεδίο με τα quads και τους δρομολογητές



Εικόνα 61: Το παραγόμενο quad tree

### 5.3.2. Εφαρμογή σε quad

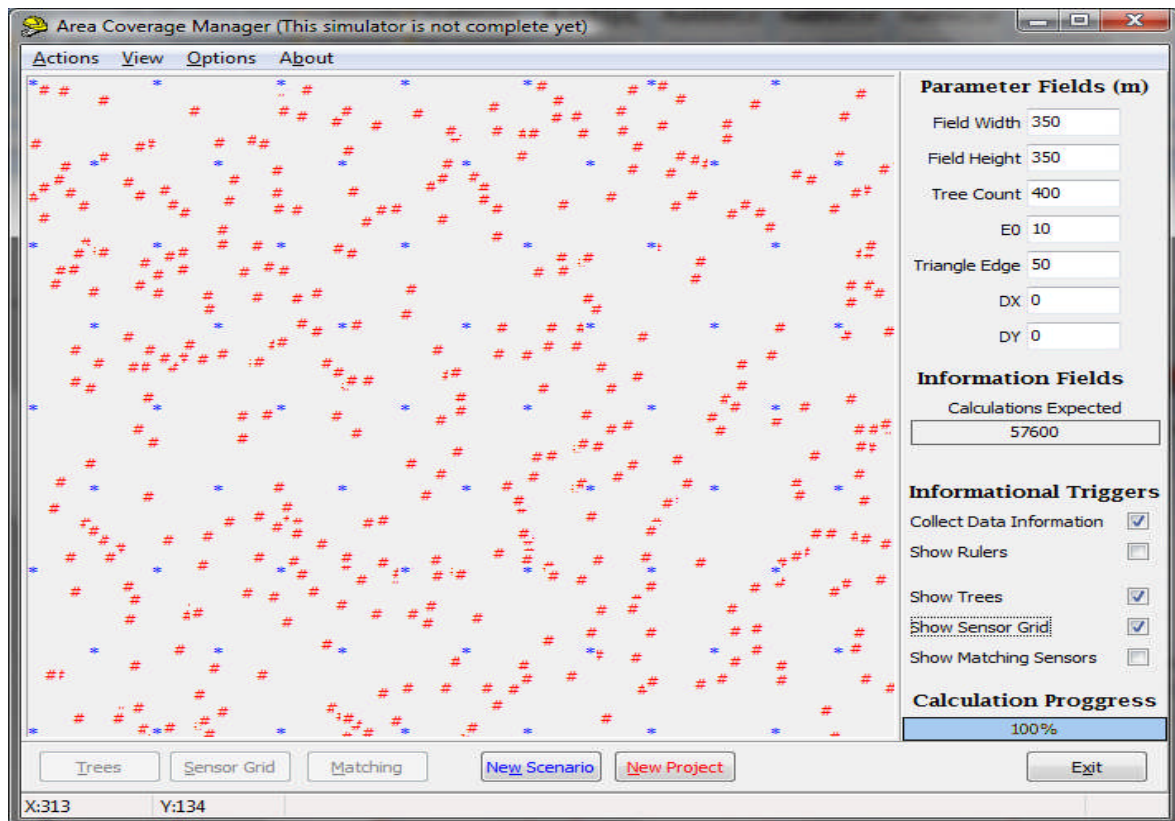
Εργαζόμαστε τώρα μέσα στο κάθε quad. Θεωρούμε μια περιοχή 350 x 350m με 400 δέντρα. Έστω ότι η πλευρά του ισόπλευρου τριγώνου είναι ίση με 50m λόγω της μοντελοποιημένης περιοχής και η ζητούμενη E0 τίθεται στα 15m. Τα στοιχεία αυτά μαζί με την τυχαία διασπορά των δέντρων δεικνύονται στην εικόνα 62. Σημειώνεται πως τα δέντρα έχουν συντεταγμένες και οι αποστάσεις απεικονίζονται βάσει κλίμακας στο παράθυρο του λογισμικού.



Εικόνα 62: Τυχαία διασπορά 400 δέντρων σε 350 x 350m.

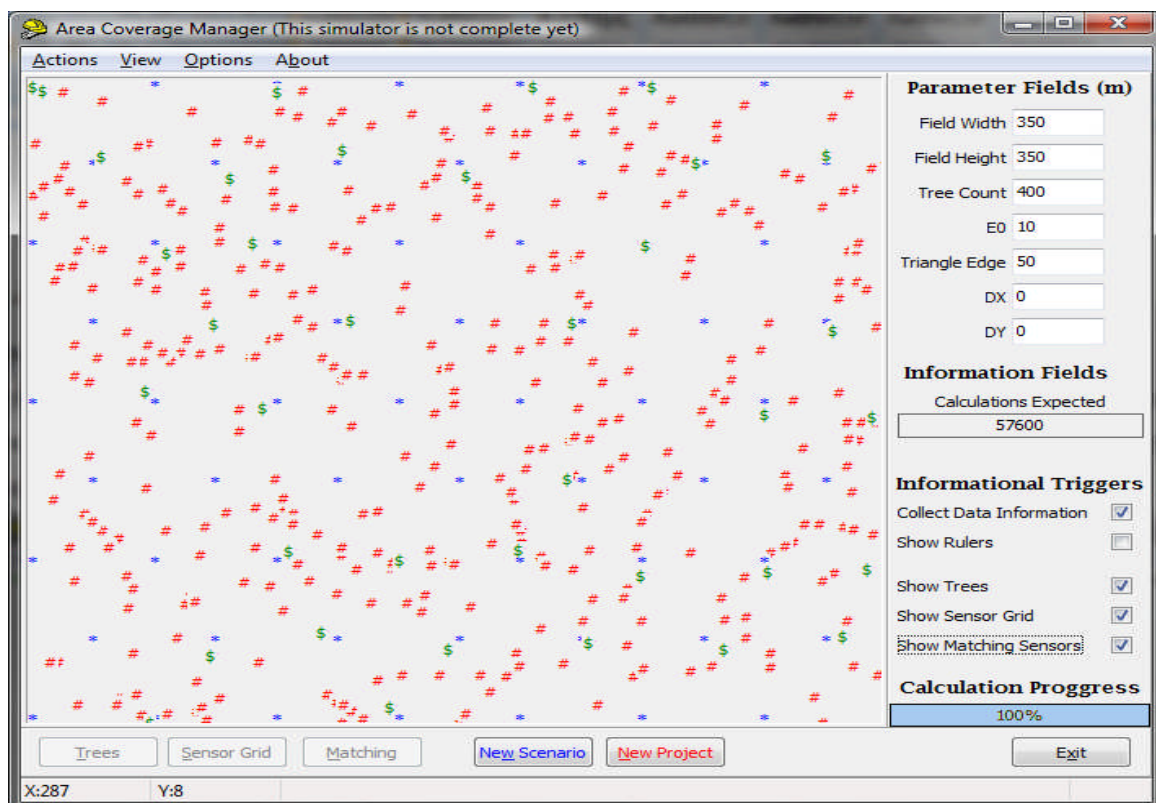
Στη συνέχεια εφαρμόζεται το ιδανικό πλέγμα αισθητήρων για την περίπτωση (πλευρά τριγώνου ίση με 50m), όπως εμφανίζεται στην εικόνα 63. Τα πεδία Dx και Dy δεν έχουν ακόμη ενεργοποιηθεί. Δηλαδή το πλέγμα αισθητήρων δεν έχει μετακινηθεί ούτε στον άξονα x ούτε και στον άξονα y.





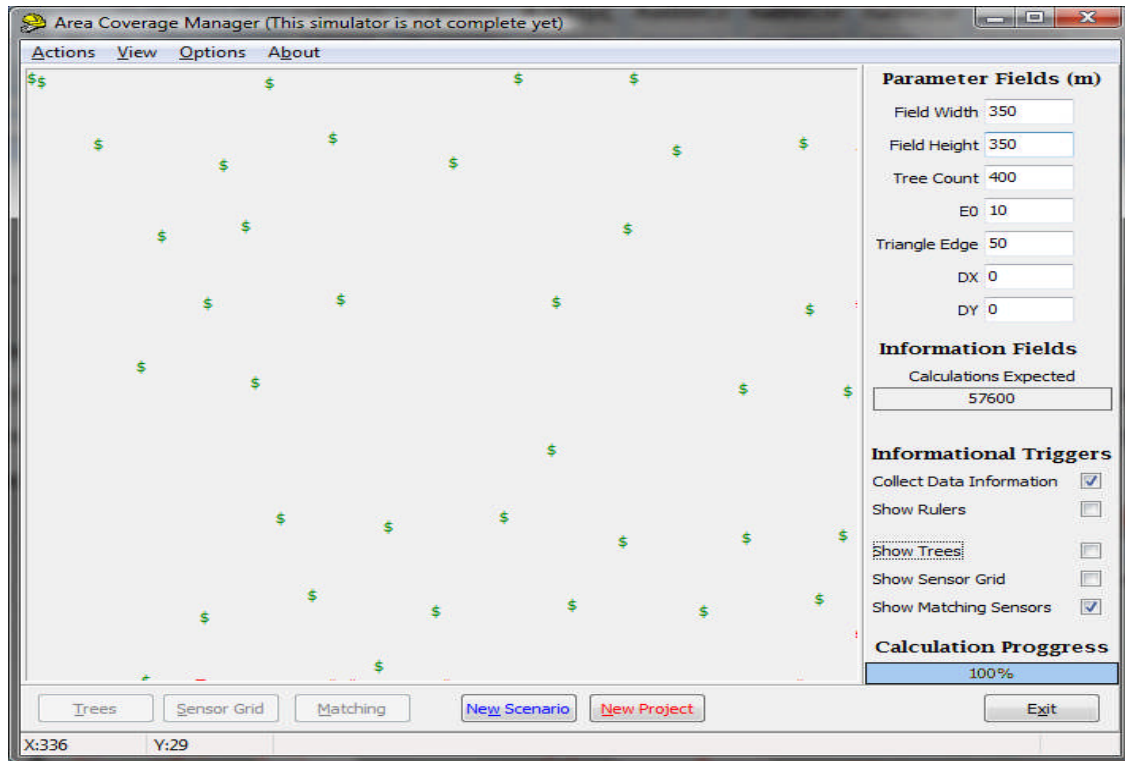
Εικόνα 63: Εφαρμογή πλέγματος αισθητήρων στην διασπορά των δέντρων

Έπεται η εκτέλεση της διαδικασίας “matching” για την εύρεση των αισθητήρων που μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε δέντρο. Οι αισθητήρες αυτοί συμβολίζονται με \$ στην εικόνα 64.

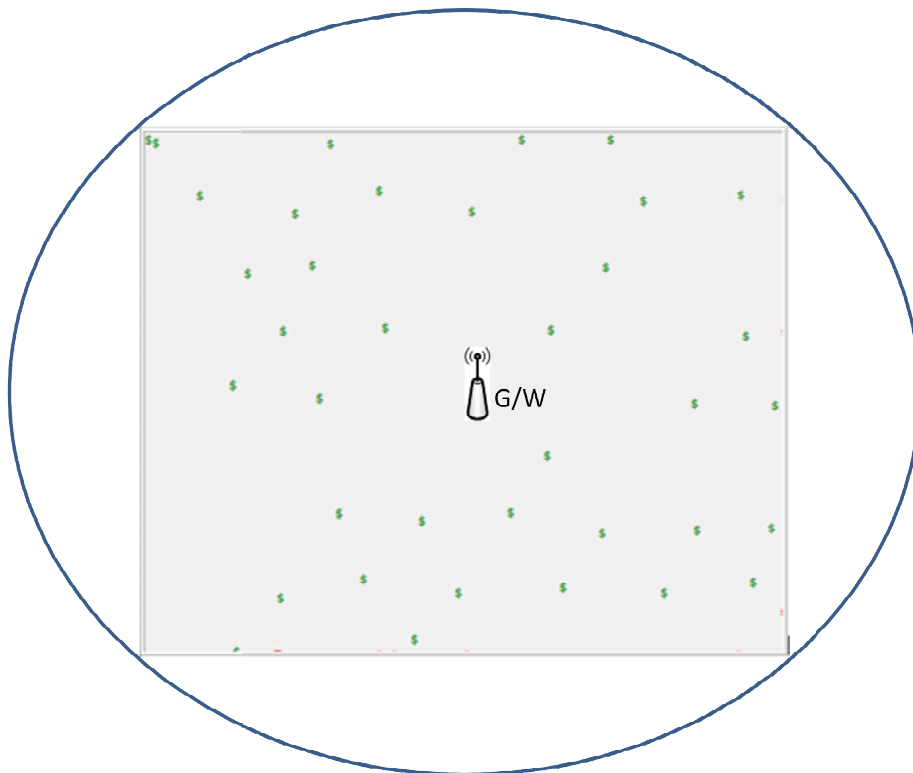


Εικόνα 64: Απεικόνιση αισθητήρων που έχουν γίνει “matched” – σύμβολο \$.

Μετά την διαδικασία “matching” [99], εμφανίζουμε μόνο τους αισθητήρες που μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε δέντρο και αποτελούν το πραγματικό πλέγμα που μπορεί να αναπτυχθεί στο πεδίο (εικόνα 65). Τέλος στην εικόνα 66 δεικνύεται και η προκύπτουσα κυψέλη μετά την τοποθέτηση του δρομολογητή.



Εικόνα 65: Πραγματικό πλέγμα αισθητήρων που μπορεί να τοποθετηθεί στο πεδίο.



Εικόνα 66: Τοποθέτηση δρομολογητή και δημιουργία κυψέλης

Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως η τοποθέτηση του δρομολογητή στο κέντρο του quad εξασφαλίζει βάσει κριτηρίων την συνδεσιμότητα και συνεισφέρει στην εφεδρεία – redundancy λόγω των επικαλύψεων που προκύπτουν. Σε περίπτωση που η διασπορά των αισθητήρων είναι πιθανό να μην καλύπτει ομοιόμορφα το quad, δηλαδή ο μεγαλύτερος πληθυσμός του quad βρίσκεται συγκεντρωμένος σε μια περιοχή του τετραγώνου, είναι δυνατό να εξεταστεί η τοποθέτηση του δρομολογητή εντός quad αλλά όχι στο κέντρο βάσει του **Kmeans** αλγορίθμου. Κάτι τέτοιο θα πρέπει να εξεταστεί ανά περίπτωση και να αντισταθμιστούν τα οφέλη δημιουργίας ενός πιο ισχυρού δικτύου εντός quad με την απώλεια κάποιου βαθμού εφεδρείας από την έλλειψη επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών τετραγώνων.

Τέλος, σημειώνεται πως το λογισμικό κρατάει στατιστικά στοιχεία και τις συντεταγμένες των σημείων μετά από κάθε εκτέλεση (εικόνα 67). Για την παραγωγή καλύτερου εφικτού σεναρίου μπορεί να επαναληφθεί η διαδικασία έχοντας ορίσει τιμές στην μετατόπιση του πλέγματος. Το καλύτερό σενάριο είναι εκείνο που έχει ως αποτέλεσμα το “matching” των περισσότερων αισθητήρων.

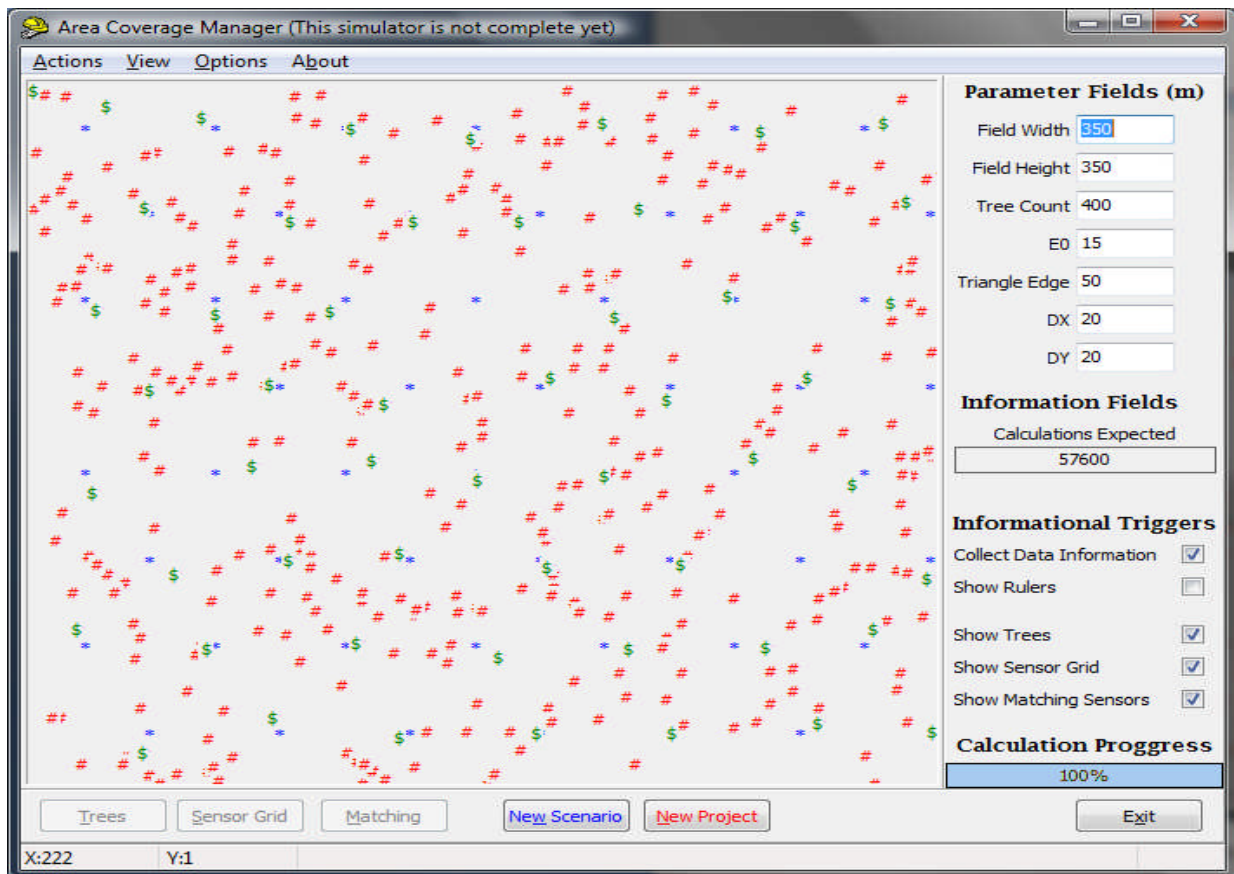
Statistics	Trees Coordinates	Sensors Coordinates	Distances	Matched Sensors Coords
Sensor Count	X= 45 Y= 94	X= 0 Y= 0	Distance= 104	X= 4 Y= 2
72	X= 10 Y= 312	X= 50 Y= 0	Distance= 312	X= 0 Y= 0
Sensors matched	X= 229 Y= 149	X= 100 Y= 0	Distance= 273	X= 100 Y= 3
51	X= 21 Y= 83	X= 150 Y= 0	Distance= 86	X= 0 Y= 0
	X= 332 Y= 298	X= 200 Y= 0	Distance= 446	X= 205 Y= 0
	X= 200 Y= 247	X= 250 Y= 0	Distance= 318	X= 254 Y= 0
	X= 291 Y= 10	X= 300 Y= 0	Distance= 291	X= 291 Y= 10
	X= 209 Y= 128	X= 350 Y= 0	Distance= 245	X= 0 Y= 0
	X= 342 Y= 262	X= 25 Y Y= 43	Distance= 431	X= 28 Y= 38
	X= 23 Y= 160	X= 75 Y= 43	Distance= 162	X= 81 Y= 50
	X= 79 Y= 61	X= 125 Y= 43	Distance= 100	X= 127 Y= 34
	X= 98 Y= 234	X= 175 Y= 43	Distance= 254	X= 178 Y= 48
	X= 223 Y= 174	X= 225 Y= 43	Distance= 283	X= 0 Y= 0
	X= 130 Y= 127	X= 275 Y= 43	Distance= 182	X= 272 Y= 41
	X= 126 Y= 254	X= 325 Y= 43	Distance= 284	X= 325 Y= 37
	X= 172 Y= 165	X= 375 Y= 43	Distance= 238	X= 0 Y= 0
	X= 244 Y= 154	X= 0 Y= 86	Distance= 289	X= 0 Y= 0
	X= 246 Y= 320	X= 50 Y= 86	Distance= 404	X= 55 Y= 90
	X= 333 Y= 182	X= 100 Y= 86	Distance= 379	X= 90 Y= 85
	X= 291 Y= 266	X= 150 Y= 86	Distance= 394	X= 0 Y= 0
	X= 336 Y= 55	X= 200 Y= 86	Distance= 340	X= 187 Y= 80
	X= 260 Y= 198	X= 250 Y= 86	Distance= 327	X= 251 Y= 86
	X= 126 Y= 250	X= 300 Y= 86	Distance= 280	X= 297 Y= 75
	X= 274 Y= 176	X= 350 Y= 86	Distance= 326	X= 338 Y= 85
	X= 4 Y= 70	X= 25 Y= 129	Distance= 70	X= 17 Y= 140
	X= 128 Y= 89	X= 75 Y= 129	Distance= 156	X= 74 Y= 129

Εικόνα 67: Συντεταγμένες και στατιστικά στοιχεία του προγράμματος

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα της εικόνας 67, παρατηρούμε ότι οι αισθητήρες που μπορούν να τοποθετηθούν σε δέντρα ανέρχονται στους 51 για το σενάριο που εκτελέστηκε. Μετακινώντας το grid βρίσκεται και καλύτερος αριθμός που είναι και ο μεγαλύτερος αναφορικά με τους matched sensors. Σε κάθε περίπτωση μειώνοντας και την πλευρά α του Grid των αισθητήρων πετυχαίνουμε πολύ καλύτερο matching εφόσον αυξάνεται και το πλήθος των αισθητήρων του πλέγματος, αλλά αυτό έχει μεγαλύτερο κόστος υλοποίησης.

Στην εικόνα 68, έχουμε το αποτέλεσμα της διαδικασίας “matching” για μετακινημένο πλέγμα με τιμές  $D_x=20$ ,  $D_y=20$





Εικόνα 68: Τοπολογία με grid που έχει υποστεί ολίσθηση κατά 20m στο Dx και Dy.

Παρατηρούμε πως με την μετατόπιση του πλέγματος πετυχαίνουμε διαφορετικές τιμές στο πλήθος των αισθητήρων που μπορούν να γίνουν matched. Για κάθε project οι τιμές αυτές αποθηκεύονται σε αρχείο καταγραφών με όλα τα δεδομένα εισόδου και εξόδου όπως φαίνεται στην εικόνα 70.

Sims Count	XFieldDim	YFieldDim	Tree Count	E0	Edge	DX	DY	Sensor Count	Matched
1	350	350	400	15	50	0	0	72	51
2	350	350	400	15	50	0	0	72	51
3	350	350	400	15	30	40	40	168	124
4	350	350	400	15	50	40	40	72	44
5	350	350	400	15	50	0	0	72	51
6	350	350	400	15	50	20	20	72	53

Εικόνα 69: Αρχείο καταγραφών με όλα τα δεδομένα εισόδου και εξόδου του προβλήματος

## 5.4. Συμπεράσματα και Μελλοντικοί Στόχοι

Η διατριβή ασχολήθηκε με το πρόβλημα της σχεδίασης και ex-ante αξιολόγησης διατάξεων ασύρματων δικτύων αισθητήρων υψηλής χωρικής πυκνότητας σε αφιλόξενα φυσικά περιβάλλοντα. Το πρόβλημα αυτό είναι διεπιστημονικό και συνδυάζει αντικείμενα από τον τομέα των δικτύων και συγκεκριμένα της προσομοίωσης, καθώς και από τον τομέα των επιστημών του χώρου. Πρόκειται για δίκτυα αισθητήρων με χιλιάδες κόμβους, τα οποία λειτουργούν σε "αφιλόξενα" περιβάλλοντα με πολλούς περιορισμούς σε ενέργεια, ευκολία τοποθέτησης, φυσικά γνωρίσματα, κ.ά. Από την ανάλυση που προηγήθηκε φάνηκε ότι "ευφυή" πρωτόκολλα οργάνωσης τέτοιων δικτύων δεν είναι κατάλληλα για αυτή την κλίμακα και κατηγορία προβλημάτων. Σε επίπεδο χωροθέτησης, εφόσον οι διαθέσιμες πιθανές θέσεις των κόμβων δεν είναι γνωστές, δεν είναι εφικτός ο ορισμός προβλημάτων βέλτιστης χωροθέτησης, η επίλυση των οποίων να μπορεί να έχει εφαρμογή στο πεδίο, οπότε οδηγηθήκαμε σε μια ευριστική λύση, στην οποία συνδυάστηκε η δικτυακή με τη χωρική τοπολογία υπό το πρίσμα του προβλήματος που περιγράφηκε. Η δικτυακή τοπολογία αναλύθηκε περαιτέρω με χρήση κατάλληλου λογισμικού εξομοίωσης δικτύων.

Τα παραπάνω έλαβαν χώρα ως προσπάθεια μας ολοκληρωμένης προσέγγισης του προβλήματος που περιλαμβάνει στοιχεία τόσο από τις επιστήμες του χώρου, όσο και από την περιοχή των δικτύων, τα οποία συνδυάζει με αλγόριθμους και εργαλεία που προτείνει υπό το πρίσμα της επιστήμης της Μηχανικής, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη το κόστος και την πρακτική εφικτότητα μιας λύσης.

Στο πλαίσιο αυτό εξετάστηκαν φυσικές και δικτυακές τοπολογίες οι οποίες παρέχουν εφεδρεία, συνδεσιμότητα και αξιοπιστία δικτύου και στοχεύουν σε κάλυψη ευρείας περιοχής με υψηλή χωρική πυκνότητα αισθητήρων. Αναπτύχθηκε ευριστικός αλγόριθμος ο οποίος συνδυάζει και τα δύο μέρη του προβλήματος (δικτυακό, γεωμετρικό) και παράγει εφικτές λύσεις σχετικά με την χωροθέτηση των αισθητήρων και των δρομολογητών. Επιπρόσθετα, ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί και την βάση ενός εξομοιωτή που αποφαίνεται και για την συνεκτικότητα και επικοινωνία των κόμβων.

Αναπτύχθηκε αλγόριθμος και λογισμικό το οποίο υπολογίζει τις συντεταγμένες για την τοποθέτηση αισθητήρων, πάνω σε καμβά πιθανών σημείων (δέντρων, για την περίπτωση του δάσους) τα οποία υπολογίστηκαν τυχαία. Σε συνδυασμό με τη ροή εργασιών που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5, προτείνεται μια ενιαία ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος η οποία λαμβάνει υπόψη της αμφότερες τις παραμέτρους του φυσικού και δικτυακού χώρου.

Με βάση τα παραπάνω, εντοπίζονται στη συνέχεια ορισμένα θέματα για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο αυτό.

- **Ενιαίο λειτουργικό και υπολογιστικό κέλυφος χωρικής ανάπτυξης και δικτυακής εξομοίωσης.** Η ολοκλήρωση του δικτυακού εξομοιωτή, με τον ευριστικό αλγόριθμο χωρικής ανάπτυξης ώστε να παράγει υπολογισμούς - metrics ως προς τις συσκευές που θα χρειαστούν, και θα αξιολογεί κάθε ενδεχόμενη χωροθέτηση σε συνδυασμό με τη συνεκτικότητα και αξιοπιστία του δικτύου, καθώς και την βαθμονόμηση - calibration της

περιοχής. Το ενιαίο κέλυφος θα εξετάζει εναλλακτικές επιλογές (αλγορίθμους) για τη φυσική χωροθέτηση και θα εκτελεί τα μαθηματικά μοντέλα εξασθένησης σήματος λόγω διάδοσης και φυλλώματος. Επίσης, θα επιλύει ενοποιημένα το ισοδύναμο πρόβλημα της χωροθέτησης δρομολογητών με αποτέλεσμα ένα εργαλείο Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Δικτύων Ασυρμάτων Αισθητήρων με δυνατότητα απεικόνισης σε πλατφόρμες web mapping, το οποίο ενοποιεί τη χωρική και δικτυακή αξιολόγηση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων κατά τη φάση της σχεδίασης.

- **Ενοποίηση με εργαλεία φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης για την αντιμετώπιση προβλημάτων σε πραγματικά πεδία.** Ένα δεύτερο θέμα για περαιτέρω έρευνα είναι η ενοποίηση της προσέγγισης που προτείνουμε, με εργαλεία από την περιοχή της φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης. Με τον τρόπο αυτό θα μπορεί υπό συνθήκες να αίρεται η ανάγκη για μετρήσεις πεδίου αναγκαίες για την βαθμονόμηση - callibration του εξομοιωτή δικτύων, καθώς στοιχεία της πυκνότητας και του είδους των φυλλωμάτων θα γίνονται διαθέσιμα από την επεξεργασία οπτικών δεδομένων. Επίσης πρόκληση αποτελεί η εξαγωγή των χωρικών συντεταγμένων των πιθανών θέσεων τοποθέτησης αισθητήρων στο πεδίο (π.χ. δέντρα) από εναέριες ή δορυφορικές φωτογραφίες ορατού και μη φάσματος.
- **Ορισμός και προσέγγιση του προβλήματος της βέλτιστης χωροθέτησης.** Με δεδομένη τη διαθεσιμότητα των συντεταγμένων των πιθανών σημείων τοποθέτησης αισθητήρων με τεχνικές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αίρεται και ο περιορισμός του μη-ορισμένου προβλήματος βέλτιστης φυσικής χωροθέτησης. Στην περίπτωση αυτή, η έρευνα μπορεί να συμπεριλάβει και την προσέγγιση του προβλήματος βέλτιστης χωρικής τοποθέτησης αισθητήρων σε πραγματικό πεδίο με αναλυτικούς ή και με ευριστικούς αλγορίθμους.

Η προσέγγιση αυτή σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα περαιτέρω ερευνητικής εργασίας στα προτεινόμενα αντικείμενα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ασφάλειας και εποπτείας πεδίου σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, καθώς και σε παρακολούθηση κρίσιμων υποδομών, όπου χρησιμοποιούνται δίκτυα αισθητήρων υψηλής χωρικής πυκνότητας σε αφιλόξενα περιβάλλοντα.



**ΑΝ ΑΦΟΡΕΣ**

- [1] Xu J., Wang H., Lang F., Wang P., and Hou Z., “Study on WSN topology division and lifetime,” 2011 IEEE Int. Conf. Comput. Sci. Autom. Eng., pp. 380–384, Jun. 2011.
- [2] Al-Turjman F., Hassanein H. S., Ibnkahla M., “Connectivity Optimization for Wireless Sensor Networks Applied to Forest Monitoring,” 2009 IEEE Int. Conf. Commun., pp. 1–6, Jun. 2009.
- [3] Camilo T., Sá Silva J, Rodrigues A., Boavida F., “GENSEN: A topology generator for real wireless sensor networks deployment”, SEUS'07 Proceedings of the 5th IFIP WG 10.2 international conference on Software technologies for embedded and ubiquitous systems Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2007
- [4] Hou Y. T., Member S., Shi Y., Member S., Sherali H. D., Midkiff S. F., “On Energy Provisioning and Relay Node Placement for Wireless Sensor Networks,” vol. 4, no. 5, pp. 2579–2590, 2005.
- [5] Younis M. Akkaya K., "Strategies and Techniques for Node Placement in Wireless Sensor Networks: A Survey," Elsevier Ad Hoc Network Journal, Vol. 6 No. 4, pp. 621-655, 2008.
- [6] Xunbo L. I, Zhenlin W., “Cellular Genetic Algorithms for Optimizing the Area Covering of Wireless Sensor Networks”, Chinese Journal of Electronics, vol. 20, no. 2, 2011.
- [7] Athanassoulis M., Alagiannis I., Hadjiefthymiades S., “Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks: A Utility-Based Architecture”, European Wireless 2007, Paris, April 1-4, 2007
- [8] Wireless Sensor Networks Research Group. 2014. Wireless Sensor Networks Research Group. [ONLINE] Available at: <http://www.sensor-networks.org>. [Accessed 25 May 2014].
- [9] Home - Philips Research. 2014. Home - Philips Research. [ONLINE] Available at: <http://www.research.philips.com>. [Accessed 25 May 2014]
- [10] Project Parameters - Chronius. 2014. Project Parameters - Chronius. [ONLINE] Available at: <http://www.chronius.eu>. [Accessed 25 May 2014].
- [11] Schlebusch, T.; Röthlingshöfer, L.; Saim Kim; Köny, M.; Leonhardt, S., "On the Road to a Textile Integrated Bioimpedance Early Warning System for Lung Edema," Body Sensor Networks (BSN), 2010 International Conference on , vol., no., pp.302,307, 7-9 June 2010

- [12] CodeBlue A WSN for Medical Care and Disaster Response 2014. . [ONLINE] Available at: <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/talks/ucsd-codeblue.pdf>. [Accessed 15 July 2014].
- [13] Jason Lester Hill, “System Architecture. For Wireless Sensor Networks”, Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley, 2003.
- [14] IntelliCIS - COST Action IC0806. 2014. *IntelliCIS - COST Action IC0806*. [ONLINE] Available at: <http://www.intellicis.eu>. [Accessed 25 May 2014].
- [15] *nextgenerationinfrastructures :: Home*. 2014. [ONLINE] Available at: <http://www.nextgenerationinfrastructures.eu> [Accessed 25 May 2014].
- [16] Internet of Things - Wikipedia, the free encyclopedia. 2014. *Internet of Things - Wikipedia, the free encyclopedia*. [ONLINE] Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_of\\_Things](http://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_Things). [Accessed 25 May 2014].
- [17] Martinelli, M.; Ioriatti, L.; Viani, F.; Benedetti, M.; Massa, A., "A WSN-based solution for precision farm purposes," Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009, vol.5, no., pp.V-469,V-472, 12-17 July 2009
- [18] Jiber, Y.; Harroud, H.; Karmouch, A., "Precision agriculture monitoring framework based on WSN," Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International, vol., no., pp.2015,2020, 4-8 July 2011
- [19] L. V Shum, P. Rajalakshmi, a Afonja, G. McPhillips, R. Binions, L. Cheng, and S. Hailes, “On the Development of a Sensor Module for Real-Time Pollution Monitoring,” 2011 Int. Conf. Inf. Sci. Appl., pp. 1–9, Apr. 2011.
- [20] Leveque, Antoine; Pecheux, Francois; Louerat, Marie-Minerve; Aboushady, Hassan; Vasilevski, Michel, "SystemC-AMS Models for Low-Power Heterogeneous Designs: Application to a WSN for the Detection of Seismic Perturbations," Architecture of Computing Systems (ARCS), 2010 23rd International Conference on, vol., no., pp.1,6, 22-23 Feb. 2010.
- [21] Chaamwe N., Liu W., Jiang H, “Seismic monitoring in underground mines: A case of mufulira mine in Zambia: Using wireless sensor networks for seismic monitoring,” 2010 Int. Conf. Electron. Inf. Eng., vol. 1, no. Iceie, pp. V1–310–V1–314, Aug. 2010.
- [22] J. Barbaran, Diaz, M., Esteve, I., Rubio, B. (2007), 'RadMote: A Mobile Framework for Radiation Monitoring in Nuclear Power Plants', World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 3, International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering, 1(3), 28 - 33.
- [23] Cheng X., Yang N., and Shi Y, “Design of radiation detection system with WSN,” Proc. 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Sci. Wirel. Technol. Conf., pp. 946–949, Jul. 2011.

- [24] Tuna G., Gulez K., Mumcu T. V., Gungor V. C., “Mobile Robot Aided Self-Deploying Wireless Sensor Networks for Radiation Leak Detection,” 2012 5th Int. Conf. New Technol. Mobil. Secur., pp. 1–5, May 2012.
- [25] Hartung C., Han R., Seielstad C., and Holbrook S., “FireWxNet: A Multi-Tiered Portable Wireless System for Monitoring Weather Conditions in Wildland Fire Environments Categories and Subject Descriptors,” pp. 28–41.
- [26] Son B., Her Y., and Kim J., “A Design and Implementation of Forest-Fires Surveillance System based on Wireless Sensor Networks for South Korea Mountains,” vol. 6, no. 9, pp. 124–130, 2006.
- [27] Yu L. and Wang N., “Real-time forest fire detection with wireless sensor networks,” Proceedings. 2005 Int. Conf. Wirel. Commun. Netw. Mob. Comput. 2005., vol. 2, pp. 1214–1217, 2005.
- [28] Kolega E., Vecoukis V., Douligeris C., “Forest Fire Sensing and Decision Support using Large Scale WSNs”, International Congress on Environmental Modeling and Software (iEMSs), S21 session (S.21.02) <http://www.iemss.org/iemss2010/proceedings.html> Ottawa, Ontario, Canada, July 5-8 2010.
- [29] Vescoukis V., Olma T., and Markatos N., “Experience from a Pilot Implementation of an ‘In-Situ’ Forest Temperature Measurement Network,” 2007 IEEE 18th Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun., pp. 1–5, Sep. 2007.
- [30] LEWIS F. L., “Wireless Sensor Networks”, to appear in Smart Environments: Technologies, Protocols and Applications ed. D. J. Cook and S.K. Das, John Wiley, New York 2004.
- [31] Shrestha A. and Xing L., “A Performance Comparison of Different Topologies for Wireless Sensor Networks,” 2007 IEEE Conf. Technol. Homel. Secur., pp. 280–285, May 2007.
- [32] Kolega E., Vescoukis V., Sofos I., “A Large Scale WSN-based Forest Fire Sensing and Management System”, IntelliCIS, COST ACTION ICO806, Intelligent Monitoring, Control and Security of Critical Infrastructure Systems, 4th Action Workshop, Vilanova I la Geltru, Spain, 13-14 June 2011.
- [33] Kolega E., Vescoukis V., “High Density WSN applications in Forest Areas: Analysis and deployment approach”, Wireless Autonomous Devices, Academy Publish (chapter, book to be printed), 2014
- [34] Kolega E., Vescoukis V., “Design and Development Tools for Large Scale WSN Infrastructures”, 2nd IntelliCIS Training School: “Simulation-based design of Complex Infrastructure Systems”, Aachen, Germany, 4-8 March 2013
- [35] Index of /~nsrl/creu1011/PowerPoints. 2014. Index of /~nsrl/creu1011/PowerPoints. [ONLINE] Available at:

- <http://www.radford.edu/nsrl/creu1011/PowerPoints/>. [Accessed 25 May 2014]. (XBOW MoteWorks\_Getting\_Started\_Guide\_7430-0102-01\_E.pdf)
- [36] coalesenses :: Home. 2014. *coalesenses :: Home*. [ONLINE] Available at: <http://www.coalesenses.com/index.php>. [Accessed 25 May 2014].
- [37] Cisco Has Acquired Arch Rock - Cisco Systems . 2014. *Cisco Has Acquired Arch Rock - Cisco Systems* . [ONLINE] Available at: <http://www.cisco.com/web/about/ac49/ac0/ac1/ac259/archrock.html>. [Accessed 25 May 2014].
- [38] Libelium - Connecting Sensors to the Cloud. 2014. *Libelium - Connecting Sensors to the Cloud*. [ONLINE] Available at: <http://www.libelium.com>. [Accessed 25 May 2014].
- [39] Top 50 Internet of Things Applications - Ranking | Libelium. 2014. *Top 50 Internet of Things Applications - Ranking | Libelium*. [ONLINE] Available at: [http://www.libelium.com/top\\_50\\_iot\\_sensor\\_applications\\_ranking](http://www.libelium.com/top_50_iot_sensor_applications_ranking). [Accessed 25 May 2014].
- [40] Wasmote - Plug & Sense! - Code Generator - v02. 2014. *Wasmote - Plug & Sense! - Code Generator - v02*. [ONLINE] Available at: [http://www.libelium.com/development/wasmote/code\\_generator](http://www.libelium.com/development/wasmote/code_generator). [Accessed 25 May 2014].
- [41] Sensible Solutions Sweden AB. 2014. *Sensible Solutions Sweden AB*. [ONLINE] Available at: <http://www.sensiblesolutions.se>. [Accessed 25 May 2014].
- [42] MTS-SE1000 PIR, Magnetic & Microphone Sensor Board With Buzzer. 2014. *MTS-SE1000 PIR, Magnetic & Microphone Sensor Board With Buzzer*. [ONLINE] Available at: <http://www.advanticsys.com/shop/mtsse1000-p-16.html>. [Accessed 25 May 2014].
- [43] TinyOS Home Page. 2014. *TinyOS Home Page*. [ONLINE] Available at: <http://www.tinyos.net/>. [Accessed 25 May 2014].
- [44] Contiki: The Open Source Operating System for the Internet of Things. 2014. *Contiki: The Open Source Operating System for the Internet of Things*. [ONLINE] Available at: <http://www.contiki-os.org/#about>. [Accessed 25 May 2014].
- [45] 2014.[ONLINE] Available at: <http://www.zigbee.org/>. [Accessed 25 May 2014].
- [46] The Wireless Embedded Internet. 2014. *The Wireless Embedded Internet*. [ONLINE] Available at: <http://6lowpan.net/>. [Accessed 25 May 2014].
- [47] IPv6 over Low power WPAN (6lowpan) - Charter. 2014. *IPv6 over Low power WPAN (6lowpan) - Charter*. [ONLINE] Available at: <http://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter>. [Accessed 25 May 2014].



- [48] 6LoWPAN . 2014. *6LoWPAN* . [ONLINE] Available at: <http://www.6lowpan.org/1.html>. [Accessed 25 May 2014].
- [49] *ietf :: Home*. 2014. [ONLINE] Available at: <http://tools.ietf.org/html/rfc4944> [Accessed 25 May 2014].
- [50] English Home . 2014. *English Home* . [ONLINE] Available at: <https://www.bluetooth.org/apps/content/>. [Accessed 25 May 2014].
- [51] ETSI - GSM. 2014. *ETSI - GSM*. [ONLINE] Available at: <http://www.etsi.org/website/technologies/gsm.aspx>. [Accessed 25 May 2014].
- [52] ETSI - GPRS. 2014. *ETSI - GPRS*. [ONLINE] Available at: <http://www.etsi.org/website/technologies/gprs.aspx>. [Accessed 25 May 2014].
- [53] WIMAX Forum. 2014. *WIMAX Forum*. [ONLINE] Available at: <http://www.wimaxforum.org/index.htm>. [Accessed 25 May 2014].
- [54] Wi-Fi Alliance . 2014. Wi-Fi Alliance . [ONLINE] Available at: <http://www.wi-fi.org/>. [Accessed 25 May 2014].
- [55] WISEBED - Wireless Sensor Network Testbeds :: Home. 2014. *WISEBED - Wireless Sensor Network Testbeds :: Home*. [ONLINE] Available at: <http://wisebed.eu>. [Accessed 25 May 2014].
- [56] [[SETIS]]. 2014. [ONLINE] Available at <http://setis.ec.europa.eu/about-setis/technology-roadmap/european-initiative-on-smart-cities> [Accessed 15 July 2014].
- [57] 2014. [ONLINE] Available at <http://ec.europa.eu/research/mariecurieactions/media-library/success-stories/items/marie-curie-actions-story-15-05-2012-health.htm> [Accessed 15 July 2014].
- [58] 2014. [ONLINE] Available at [http://ec.europa.eu/research/health/medical-research/cardiovascular-diseases/projectsfp7\\_en.html](http://ec.europa.eu/research/health/medical-research/cardiovascular-diseases/projectsfp7_en.html). [Accessed 15 July 2014].
- [59] [[ TIBUCON PROJECT ]]. 2014. *[[ TIBUCON PROJECT ]]*. [ONLINE] Available at: <http://www.tibucon.eu/>. [Accessed 25 May 2014].
- [60] makeSense. 2014. *makeSense*. [ONLINE] Available at: <http://www.project-makesense.eu/>. [Accessed 25 May 2014].
- [61] The Network Simulator - ns-2. 2014. *The Network Simulator - ns-2*. [ONLINE] Available at: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. [Accessed 25 May 2014].
- [62] Zeng X., Bagrodia R., and Gerla M., “GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks,” Proceedings. Twelfth Work. Parallel Distrib. Simul. PADS '98 (Cat. No.98TB100233), pp. 154–161.

- [63] Xian X., Shi W., and Huang H., "Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation," 2008 3rd IEEE Conf. Ind. Electron. Appl., pp. 1439–1443, Jun. 2008.
- [64] Sundani H., Li H., Devabhaktuni V., Alam M., Bhattacharya P., "Wireless Sensor Network Simulators: A Survey and Comparisons", International Journal of Computer Networks (IJCN), Volume (2), Issue (5), 2010
- [65] <http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse567-11/ftp/sensor/index.html> , 2011
- [66] Korkalainen M., Sallinen M., Kärkkäinen N., and Tukeva P., "Survey of Wireless Sensor Networks Simulation Tools for Demanding Applications," 2009 Fifth Int. Conf. Netw. Serv., pp. 102–106, 2009.
- [67] Abuarqoub A., Al-fayez F., Alsboui T., Hammoudeh M., and Nisbet A., "Simulation Issues in Wireless Sensor Networks : A Survey," no. c, pp. 222–228, 2012.
- [68] Weingartner, E.; vom Lehn, H.; Wehrle, K., "A Performance Comparison of Recent Network Simulators," Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on , vol., no., pp.1,5, 14-18 June 2009
- [69] Singh, C.P.; Vyas, O.P.; Tiwari, M.K., "A Survey of Simulation in Sensor Networks," Computational Intelligence for Modelling Control & Automation, 2008 International Conference on , vol., no., pp.867,872, 10-12 Dec. 2008
- [70] Jevtic M., Zogovic N., Dimic G., "Evaluation of Wireless Sensor Network Simulators", 17th Telecommunications forum TELFOR 2009 Serbia, Belgrade, November 24-26, 2009.
- [71] ns-3. 2014. *ns-3*. [ONLINE] Available at: <http://www.nsnam.org/>. [Accessed 06 July 2014].
- [72] Colesanti U. M., Crocianti C., Vitaletti A., "On the Accuracy of OMNeT ++ in the Wireless Sensor Networks Domain : Simulation vs . Testbed.", PE-WASUN '07 Proceedings of the 4th ACM workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks, Pages 25-31, ACM New York, NY, USA ©2007
- [73] Pham, Hai N.; Pediaditakis, D.; Boulis, A., "From Simulation to Real Deployments in WSN and Back," World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2007. WoWMoM 2007. IEEE International Symposium on a , vol., no., pp.1,6, 18-21 June 2007
- [74] Kolega, E.; Vescoukis, V.; Voutos, D., "Assessment of network simulators for real world WSNs in forest environments," Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2011 IEEE International Conference on , vol., no., pp.427,432, 11-13 April 2011

- [75] Levis P., Lee N., Welsh M. Culler D., "TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications", SenSys '03 Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems Pages 126 – 137, ACM New York, NY, USA ©2003
- [76] TOSSIM - TinyOS Wiki. 2014. *TOSSIM - TinyOS Wiki*. [ONLINE] Available at: <http://docs.tinyos.net/index.php/TOSSIM>. [Accessed 25 May 2014].
- [77] Cheong E., Lee E., Zhao Y.. "Viptos: A Graphical Development and Simulation Environment for TinyOS-based Wireless Sensor Networks", SenSys '05 Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems Pages 302 - 302 ACM New York, NY, USA ©2005
- [78] Viptos . 2014. *Viptos* . [ONLINE] Available at: <http://ptolemy.berkeley.edu/viptos/>. [Accessed 25 May 2014].
- [79] Lei Shu; Chun Wu; Yan Zhang; Jiming Chen; Lei Wang; Hauswirth, M., "NetTopo: Beyond Simulator and Visualizer for Wireless Sensor Networks," Future Generation Communication and Networking, 2008. FGCN '08. Second International Conference on , vol.1, no., pp.17,20, 13-15 Dec. 2008
- [80] Chun Wu. "NetTopo: A Framework of Simulation and Visualization for Wireless Sensor Networks", ACM journal Ad Hoc Networks, Pages 799-820, Volume 9 Issue 5, July, 2011
- [81] 2014. [ONLINE] Available at <http://www.semanticreality.org/nettopo/index.htm> [Accessed 12 May 2010].
- [82] Mallanda C., Suri A., Kunchakarra V., Iyengar S., Kannan R., Durresti A., "Simulating Wireless Sensor Networks with OMNeT++" ,Sensor Network Research Group, Department of Computer Science, Louisiana State University, Baton Rouge, LA., 2005
- [83] OMNeT++ Network Simulation Framework. 2014. *OMNeT++ Network Simulation Framework*. [ONLINE] Available at: <http://www.omnetpp.org>. [Accessed 25 May 2014].
- [84] Βούτος Δ. «Προσαρμογή λογισμικών Προσομοίωσης Δικτύων για την Προσομοίωση Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων Υψηλής Χωρικής Πυκνότητας», ΕΜΠ, Μάρτιος 2010
- [85] Castalia. 2014. *Castalia*. [ONLINE] Available at: <http://castalia.npc.nicta.com.au>. [Accessed 25 May 2014].
- [86] Rastegarnia, A.; Solouk, V., "Castalia Network Animator (CNA): A Visualization Tool for Castalia Wireless Sensor Network Simulator," Information Technology: New Generations (ITNG), 2012 Ninth International Conference on , vol., no., pp.48,53, 16-18 April 2012

- [87] Fekete, S.P.; Kroller, A.; Fischer, S.; Pfisterer, D., "Shawn: The fast, highly customizable sensor network simulator," *Networked Sensing Systems*, 2007. INSS '07. Fourth International Conference on , vol., no., pp.299,299, 6-8 June 2007
- [88] 2014. [ONLINE] Available at: <http://shawn.sourceforge.net/>. [Accessed 25 May 2014].
- [89] Rappaport Theodore S., *Wireless communications : principles and practice*, Prentice Hall, 1996
- [90] Abdollah Ghasemi, Ali Abedi, Farshid Ghasemi, *Propagation Engineering in Wireless Communications*, XVII, 434p. 176 illus, Springer, 2012
- [91] Seybold J., "Introduction to RF Propagation", Wiley-Interscience/John Wiley & Sons, INC. 2005.
- [92] Parsons J.D., *The Mobile Radio Propagation Channel*, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2000
- [93] Kolega E., Vescoukis V., Voutos D., "WSN Simulation Modelling for Forest Areas: Topologies, Connectivity and Path Loss", *Recent Patents on Telecommunications Journal* Vol. 1, No 1, pp. 2-16(15), July 2012.
- [94] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", Prentice Hall Inc., 3rd edition, *Routing Algorithms*, Pp 441
- [95] Damn Cool Algorithms: Spatial indexing with Quadtrees and Hilbert Curves - Nick's Blog. 2014. *Damn Cool Algorithms: Spatial indexing with Quadtrees and Hilbert Curves - Nick's Blog*. [ONLINE] Available at: <http://blog.notdot.net/2009/11/Damn-Cool-Algorithms-Spatial-indexing-with-Quadtrees-and-Hilbert-Curves>. [Accessed 25 May 2014].
- [96] QuadTree Insert Example. 2014. *QuadTree Insert Example*. [ONLINE] Available at: <http://www.mikechambers.com/files/html5/javascript/QuadTree/examples/insert.html>. [Accessed 25 May 2014].
- [97] Clustering - K-means. 2014. *Clustering - K-means*. [ONLINE] Available at: [http://home.deib.polimi.it/matteucc/Clustering/tutorial\\_html/kmeans.html](http://home.deib.polimi.it/matteucc/Clustering/tutorial_html/kmeans.html). [Accessed 25 May 2014].
- [98] Vipin Kumar, "The kmeans Algorithm", *Parallel Issues in. Data Mining*, VECPAR 2002, <http://www.cs.uvm.edu/~xwu/kdd/Slides/Kmeans-ICDM06.pdf>
- [99] Kolega E. Vescoukis V., "Efficient WSN infrastructures for large environmental area monitoring", *Intelligent Monitoring, Control and Security of Critical Infrastructure Systems (IntelliCIS)*, 8th Workshop Aachen – Germany, 4-5 March 2013.