



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ
ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (IoT) ΜΕ
ΕΜΦΑΣΗ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ
ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΔΑΣΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ
ΤΗΣ ΘΑΣΟΥ.

ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟΣ Δ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Μπαζιάνα Μπέττυ
Επίκουρη Καθηγήτρια
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Λαμία 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ
ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (IoT) ΜΕ
ΕΜΦΑΣΗ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ
ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΔΑΣΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ
ΤΗΣ ΘΑΣΟΥ.

ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟΣ Δ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Μπαζιάνα Μπέττυ
Επικουρη Καθηγήτρια
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Λαμία 2025



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

STUDY AND SIMULATION OF INTERNET OF
THINGS (IoT) SCENARIOS WITH FOCUS ON FIRE
DETECTION APPLICATIONS IN A FOREST AREA:
THE CASE OF THASOS.

RAFTOPOULOS D. GEORGIOS

FINAL THESIS

ADVISOR

Baziana Betty
Assistant Professor
Department of Informatics and Telecommunications
University of Thessaly

Lamia 2025

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από τις διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφική. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία:/...../20.....

Ο – Η Δηλ.

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα «ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (IoT) ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΔΑΣΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΘΑΣΟΥ», εκπονήθηκε από τον φοιτητή ΡΑΦΤΟΠΟΥΛΟ Δ. ΓΕΩΡΓΙΟ του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Θα ήθελα λοιπόν να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου σε όλους όσους συμπαραστάθηκαν και συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Κατά κύριο λόγο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ξενάκη Απόστολο για την πολύτιμη προσφορά του και την μετάδοση γνώσεων καθοριστικών για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στην επιβλέπουσα της πτυχιακής μου εργασίας, Επίκουρη Καθηγήτρια κα. Μπαζιάννα Μπέτυ, της οποίας η αρωγή και η υποστήριξη υπήρξε πολύτιμη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η *Μελέτη και Προσομοίωση Σεναρίων Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) με Έμφαση σε Εφαρμογές Εντοπισμού Πυρκαγιάς σε Δασική Περιοχή*. Συγκεκριμένα θα εμβαθύνουμε σε ένα υποθετικό σενάριο έγκυρου και άμεσου εντοπισμού πυρκαγιάς σε δασική περιοχή (δύσβατη και μη) στην περιοχή του Ραχωνίου της Θάσου. Ξεκινώντας θα αναλύσουμε το φαινόμενο της πυρκαγιάς ούτως ώστε να κατανοήσουμε τους τρόπους με τους οποίους προκαλείται και εξαπλώνεται, ώστε να προσαρμόσουμε την εγκατάσταση μας αναλόγως. Έπειτα θα μελετήσουμε τους αισθητήρες ως εξαρτήματα, αλλά και τα ασύρματα δίκτυα που μπορούμε να κατασκευάσουμε. Παράλληλα θα παρουσιάσουμε τον προσομοιωτή που θα χρησιμοποιήσουμε για να δημιουργήσουμε την εγκατάσταση μας, μελετώντας τις τοπολογίες των δικτύων WSN, τις τεχνολογίες που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε καθώς και τους τρόπους εγκατάστασης. Τέλος, θα διερευνήσουμε κάποια σενάρια μέσω του προσομοιωτή και θα καταλήξουμε σε συγκρίσεις και συμπεράσματα.

ABSTRACT

The object of this thesis is the study and simulation of internet of things(IoT) with focus on fire detection applications in a forest area. In particular, we will delve into a hypothetical scenario of valid and immediate fire detection in a forest area (inaccessible and not) in the area of Rakhoni, Thassos. We will start by analyzing the fire phenomenon in order to understand the ways in which it is caused and spread, so that we can adapt our installation accordingly. Then we will study the sensors as components, but also the wireless networks that we can build. At the same time we will present the simulator we will use to create our installation, studying the topologies of WSN networks, the technologies we can use as well as the techniques of installment. Finally, we will explore some scenarios through the simulator and come to comparisons and conclusions.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	9
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	10
ABSTRACT.....	12
Εισαγωγή	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Πυρκαγιά - Δημιουργία, ανάλυση και επεξήγηση	18
1.1 Θεμελιώδη στοιχεία της φωτιάς.....	18
1.2 Μετάδοση της θερμότητας σε δασικές πυρκαγιές.....	19
1.3 Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών	20
1.3.1 Η καύσιμη ύλη.....	20
1.3.2 Οι καιρικές συνθήκες.....	24
1.4 Η συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών	28
1.4.1 Περιγραφή της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών.....	28
1.4.2 Η συμπεριφορά των μεγάλων δασικών πυρκαγιών του 2007 στην Ελλάδα.	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Αισθητήρες.....	31
2.1 Ιστορική Αναδρομή Αισθητήρων	32
2.2 Αποκλίσεις αισθητήρων	32
2.3 Γενικά χαρακτηριστικά αισθητήρων	33
2.4 Εφαρμογές αισθητήρων	34
2.5 Παραδείγματα και ανάλυση αισθητήρων στοιχείων, χρήσιμων κατά την ανίχνευση και πρόληψη δασικής πυρκαγιάς.	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSN Networks)	42
3.1 Χαρακτηριστικά ασύρματων δικτύων αισθητήρων.....	43
3.2 Δομικά στοιχεία Αισθητήριων κόμβων	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Παρουσίαση του προσομοιωτή WSN - CupCarbon	46
4.1 Περίληψη λειτουργιών του προσομοιωτή CupCarbon	46
4.2 Παράμετροι Συσκευών (Device Parameters).....	48
4.3 Παράμετροι Ραδιοσυχνοτήτων (Radio Parameters)	49
4.4 Παράμετροι Προσομοίωσης (Simulation Parameters).....	49
4.5 Εντολές SenScript και Χρήση	52
4.5.1 Εντολές SenScript για δυναμική αλλαγή μεταβλητών & τιμών	52
4.5.2 Εντολές SenScript & τρόποι δημιουργίας custom functions	54
4.5.3 Εντολές SenScript για την εξαγωγή αρχείων & τιμών	54
4.5.4 Εξαγόμενα αρχεία & αποτελέσματα - CupCarbon	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Τοπολογίες Δικτύων WSN, Τεχνολογίες & Εγκατάσταση	57
5.1 Τοπολογίες Βασισμένες σε συμπλέγματα (Cluster Based Topologies)	57
5.1.1 Σύνοψη Τοπολογιών βασισμένων σε Συμπλέγματα	57
5.1.2 Διάφορα χαρακτηριστικά του WSN που βασίζεται σε συμπλέγματα	59
5.1.3 Δίκτυα Μονής Μεταπήδησης (Single-Hop Networks)	61
5.1.4 Δίκτυα Πολλαπλών Μεταπηδήσεων (Multi-Hop Networks)	62
5.1.5 Στατικό Μοντέλο Εγκατάστασης δικτύου WSN	63
5.1.6 Συνδυαστικό Κινητό Μοντέλο Εγκατάστασης δικτύου WSN με χρήση UAV	64
5.2 Τοπολογία Αστέρα (Star Topology)	65
5.3 Τοπολογία Δέντρου (Tree Topology)	67
5.4 Τοπολογία Πλέγματος (Mesh Topology)	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Δημιουργία Σεναρίων Δικτύου στον προσομοιωτή CupCarbon	70
6.1 Αρχικοποίηση και ανάλυση στοιχείων κατασκευής δικτύων Μονής μεταπήδησης & Πολλαπλής μεταπήδησης με χρήση του προσομοιωτή CupCarbon	70
6.1.1 Δημιουργία δικτύου μονής μεταπήδησης στον προσομοιωτή CupCarbon	71
6.1.2 Δημιουργία δικτύου πολλαπλών μεταπηδήσεων στον προσομοιωτή CupCarbon	72
6.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης μεταξύ Single-hop & Multi-hop networks	72
6.2 Υλοποίηση δικτύου με χρήση κόμβων-πυλών στον προσομοιωτή CupCarbon	75
6.2.1 Κόμβοι-πύλες (Gateway Nodes) - Ορισμός	75
6.2.2 Κόμβοι-πύλες (Gateway Nodes) - Λειτουργίες	76
6.2.3 Υλοποίηση δικτύου με χρήση Gateway Node στον προσομοιωτή CupCarbon	77
6.3 Ορατότητα δικτύου σε κατοικημένη περιοχή στον προσομοιωτή CupCarbon	78
6.3 Υλοποίηση σεναρίων διαδικτύου WSN - UAV για στοχευμένες λειτουργίες και χρήσεις ..	80
6.3.1 Σενάριο και μελέτη στατικού μοντέλου δικτύου WSN για την αποτροπή πυρκαγιάς χρήση του προσομοιωτή CupCarbon	80
6.3.2 Σενάριο και μελέτη κινητού μοντέλου δικτύου WSN για την αποτροπή πυρκαγιάς χρήση του προσομοιωτή CupCarbon	82
6.3.3 Συνδυαστικό μοντέλο UAV-WSN με κινητές μονάδες συλλογής δεδομένων	84
6.4 Μελέτη και ανάλυση της τεχνολογίας των στοιχείων των συνδυαστικών δικτύων WSN – UAV	85
6.4.1 Μοντέλα κατανάλωσης σε στατικά και ιπτάμενα στοιχεία	85
6.5 Μελέτη και σύγκριση αποτελεσμάτων σε εφαρμογές διαφορετικών τοπολογιών σε συνδυαστικά δίκτυα UAV-WSN.	88
6.5.1 Τοποθέτηση και εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων UAV-WSN με τοπολογία Αστέρα	88
6.5.2 Τοποθέτηση και εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων UAV-WSN με τοπολογία Δέντρου	89
6.5.3 Τοποθέτηση και εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων UAV-WSN με τοπολογία Πλέγματος	91
6.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αλλαγή στο Data rate των κεφαλών συστάδων	92

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97
-------------------	----

Εισαγωγή

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, διευρύνονται οι ορίζοντες καθώς και οι ικανότητες του ανθρώπου να προβλέψει αλλά και να αντιμετωπίσει δυσμενή καιρικά φαινόμενα και καταστροφές, τα οποία στο παρελθόν δημιουργούσαν τρομερές δυσκολίες επιβίωσης και διαβίωσης.

Πλέον μπορούμε με ασφάλεια και αμεσότητα να προλάβουμε και να αποτρέψουμε καταστάσεις οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις θα μπορούσαν να αποβούν μοιραίες τόσο για την ανθρώπινη ζωή, όσο και για την περιβαλλοντική ακεραιότητα. Σε όλη την υφήλιο, η εγκατάσταση Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων γίνεται όλο και πιο συχνή, και συναντάται τόσο σε εφαρμογές μικρής κλίμακας (Έξυπνες συσκευές, Έξυπνα σπίτια κ.α.) αλλά και μεγάλων διαστάσεων εγκαταστάσεις (Βιομηχανίες, στρατιωτικές εφαρμογές κ.τ.λ.), όλα με σκοπό τη βελτίωση της ανθρώπινης διαβίωσης, την εξασφάλιση της καθώς και την άνοδο της ποιότητας της.

Στη συγκεκριμένη εργασία θα εξετάσουμε μία από τις πολυάριθμες εφαρμογές της τεχνολογίας των Ασύρματων Δικτύων των Πραγμάτων, η οποία είναι η αντιμετώπιση πυρκαγιάς στις οικίες συνθήκες και το περιβάλλον της χώρας μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Πυρκαγιά - Δημιουργία, ανάλυση και επεξήγηση

1.1 Θεμελιώδη στοιχεία της φωτιάς

Η φωτιά προκαλείται μέσω μιας χημικής αντίδρασης που μπορεί να συμβεί μόνο όταν συνυπάρχουν και συνεργάζονται τρία βασικά στοιχεία: η καύσιμη ύλη, η θερμοκρασία και το οξυγόνο. Αυτά τα τρία συστατικά συνθέτουν αυτό που αποκαλείται συχνά “το τρίγωνο της φωτιάς”, το οποίο απεικονίζεται σαν ένα τρίγωνο στα εκπαιδευτικά εγχειρίδια.

Αν αφαιρεθεί οποιοδήποτε από αυτά τα τρία στοιχεία, η φωτιά δεν μπορεί να διατηρηθεί, όπως ακριβώς ένα τρίγωνο παύει να υφίσταται αν του λείπει μία πλευρά. Αυτή η θεμελιώδης αρχή αποτελεί τη βάση όλων των τεχνικών που εφαρμόζονται για την πρόληψη και την κατάσβεση των πυρκαγιών στα δάση.



Εικόνα 1 - Απεικόνιση του “Τριγώνου της Φωτιάς”.

Η καύσιμη ύλη αποτελεί βασικό στοιχείο της φωτιάς, καθώς μέσα της αποθηκεύεται η θερμότητα και μέσω αυτής συντηρούνται οι φλόγες. Στις περιπτώσεις

δασικών πυρκαγιών, η καύσιμη ύλη περιλαμβάνει τόσο ζωντανή όσο και αποσυντεθειμένη (νεκρή) βιομάζα.

Η παρουσία θερμότητας είναι αναγκαία για την αρχική προθέρμανση της καύσιμης ύλης, ώστε να φτάσει περίπου τους 300 βαθμούς Κελσίου. Σε αυτό το στάδιο, η ύλη αρχίζει να εκλύει πτητικά, εύφλεκτα αέρια [1]. Τα αέρια αυτά αντιδρούν με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας μέσω της χημικής διεργασίας της καύσης, δημιουργώντας κυρίως θερμότητα, διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς.

Η φλόγα είναι το ορατό τμήμα της καύσης αυτών των αερίων και διακρίνεται λόγω της εκπομπής ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία της φλόγας μπορεί να ξεπεράσει τους 1000°C.

1.2 Μετάδοση της θερμότητας σε δασικές πυρκαγιές

Η θερμότητα που παράγεται από τη φλόγα μεταφέρεται στην καύσιμη ύλη που βρίσκεται τριγύρω, αυξάνοντας σταδιακά τη θερμοκρασία της μέχρι να φτάσει στο σημείο ανάφλεξης. Όταν συμβεί αυτό, η φωτιά επεκτείνεται προς νέα κατεύθυνση και η πυρκαγιά εξαπλώνεται. Η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με τρεις κύριους μηχανισμούς:

- **Αγωγή (με επαφή):** μέσω της θερμικής αγωγιμότητας από ένα θερμό σημείο της καύσιμης ύλης σε ένα γειτονικό.
- **Μεταφορικά (επαγωγή):** με τη μετακίνηση θερμών αερίων που δημιουργούνται από την καύση και διαχέονται στο περιβάλλον.
- **Ακτινοβολία:** θερμική ενέργεια που εκπέμπεται από τη φλόγα και διαδίδεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Από τους παραπάνω τρόπους, η άμεση επαφή έχει τον μικρότερο ρόλο στην εξάπλωση της φωτιάς, λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των περισσότερων υλικών βιομάζας.

Αντίθετα, η επαγωγή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ορισμένες περιπτώσεις. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν κανείς κινήσει το χέρι του πάνω από ένα κερί – νιώθει αμέσως τη θερμότητα των ανερχόμενων αερίων. Ωστόσο, η επίδραση της επαγωγής στις δασικές πυρκαγιές διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες [1].

Σε επίπεδα εδάφη χωρίς άνεμο, τα θερμά αέρια ανεβαίνουν κατακόρυφα και σπάνια προθερμαίνουν την καύσιμη ύλη που βρίσκεται μπροστά από τη φλόγα. Όταν όμως υπάρχει υπόγεια ή επιφανειακή καύσιμη ύλη κάτω από τις κόμες των δέντρων, τότε αυτές εκτίθενται έντονα στη θερμότητα των ανερχόμενων αερίων. Επιπλέον, όταν πνέει δυνατός άνεμος, τα θερμά αέρια παρασύρονται προς την κατεύθυνση της φωτιάς, προθερμαίνοντας την καύσιμη ύλη μπροστά από το μέτωπο, ενισχύοντας σημαντικά την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και σε περιοχές με έντονη κλίση, καθώς η θερμότητα μεταφέρεται πιο εύκολα προς τα πάνω.

Η θερμική ακτινοβολία από τη φλόγα είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας στη μετάδοση της θερμότητας και κατέχει πάντα σημαντικό ρόλο στην επέκταση της φωτιάς. Η έντασή της εξαρτάται από την απόσταση: όσο πιο κοντά βρίσκεται η καύσιμη ύλη στη φλόγα, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμική ενέργεια που δέχεται. Συγκεκριμένα, η ακτινοβολία αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης. Για παράδειγμα, αν μια καύσιμη ύλη δέχεται θερμική ακτινοβολία έντασης A στα 20 μέτρα απόσταση, τότε στα 10 μέτρα η ένταση θα είναι τετραπλάσια.

Η συγκεκριμένη αρχή έχει καθοριστική σημασία για την κατανόηση του φαινομένου της απότομης αύξησης της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην καύσιμη ύλη, όταν η φλόγα πλησιάζει. Η μείωση της απόστασης μεταξύ φλόγας και καύσιμης ύλης μπορεί να οφείλεται είτε στην κλίση του εδάφους είτε στη γωνία της φλόγας που επηρεάζεται από την κατεύθυνση και την ένταση του ανέμου.

Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρείται και στην περίπτωση των δασοπυροσβεστών[1], οι οποίοι εκτίθενται σε πολύ μεγαλύτερη θερμότητα όταν η φλόγα τους πλησιάζει. Η κατανόηση αυτού του μηχανισμού είναι κρίσιμη για την πρόβλεψη και τη διαχείριση του κινδύνου σε συνθήκες δασικής πυρκαγιάς.

1.3 Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών

Στο δασικό περιβάλλον, η παρουσία τόσο της καύσιμης ύλης όσο και του οξυγόνου θεωρείται δεδομένη. Εφόσον προστεθεί και μια κατάλληλη πηγή θερμότητας που θα προθερμάνει την ύλη, είναι πολύ πιθανό να εκδηλωθεί πυρκαγιά.

Ωστόσο, η εξέλιξη και η δυναμική κάθε πυρκαγιάς εξαρτώνται πλήρως από μια σειρά παραγόντων που ασκούν σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά της. Κάθε κατηγορία παραγόντων περιλαμβάνει περισσότερα από ένα στοιχεία που επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο τη φωτιά.

Οι παράγοντες αυτοί, η φύση της επιρροής τους στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, καθώς και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες.

1.3.1 Η καύσιμη ύλη

Ολόκληρο το δασικό οικοσύστημα μπορεί να θεωρηθεί καύσιμη ύλη, καθώς όλα του τα στοιχεία — όπως ο ξηροφυλλοτάπητας, τα χόρτα, οι πόες, οι θάμνοι και τα δέντρα — αποτελούνται από υλικά ικανά να αναφλεγούν. Παρ' όλα αυτά, ο τρόπος με τον οποίο αυτά τα υλικά καίγονται και η επιρροή τους στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς ποικίλλει, ανάλογα με την κατανομή τους στον χώρο, την ποσότητά τους, τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους, τη θερμοκρασία τους, καθώς και το ποσοστό υγρασίας που περιέχουν.

Ανάλογα με τη χωρική τους θέση, οι καύσιμες ύλες ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Υποεδάφειες
- Επιεδάφειες
- Έναέρειες

Οι υποεδάφειες καύσιμες ύλες βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και περιλαμβάνουν βαθιά στρώματα χούμου, ρίζες φυτών, καθώς και σάπια ή ημιθαμμένα ξύλινα υπολείμματα όπως κορμοί και κλαδιά. Αν και μπορούν να καούν όταν είναι αποξηραμένα, η καύση τους είναι γενικά αργή λόγω της περιορισμένης πρόσβασης σε οξυγόνο.

Παρότι η συμμετοχή τους στην εξάπλωση της φωτιάς είναι περιορισμένη, έχουν τη δυνατότητα να διατηρήσουν τη φωτιά ενεργή για αρκετές ώρες ή ακόμα και ημέρες μετά την κατάσβεση της ορατής φλόγας. Αυτό τις καθιστά σημαντική πηγή αναζωπυρώσεων, που μπορεί να θέσει εκ νέου σε κίνδυνο μια περιοχή θεωρητικά ασφαλή.

Η επιεδάφια καύσιμη ύλη περιλαμβάνει όλα τα εύφλεκτα υλικά που βρίσκονται είτε πάνω στο έδαφος είτε εφάπτονται άμεσα με αυτό. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν:

- Ο **χούμος**, δηλαδή οργανική ύλη σε προχωρημένο στάδιο αποσύνθεσης (όπως φύλλα, βελόνες και μικρά κλαδιά), η οποία έχει πλέον χάσει τα αναγνωρίσιμα χαρακτηριστικά της.
- Ο **ξηροφυλλοτάπητας**, που αποτελείται από πεσμένα φύλλα, βελόνες, αποξηραμένα χόρτα και κλαδάκια τα οποία δεν έχουν ακόμα αποσυντεθεί σημαντικά.
- Τα **χόρτα** που φύονται στο έδαφος.
- Οι **μικρού μεγέθους θάμνοι**, συνήθως με χαμηλή και πυκνή βλάστηση.
- Τα **νεαρά δενδρύλλια**, τα οποία λόγω του μικρού τους ύψους εντάσσονται στη ζώνη της επιεδάφιας βιομάζας.
- Οι **νεκροί πεσμένοι κορμοί και κλαδιά** που βρίσκονται στο έδαφος, προερχόμενα είτε από φυσικές διεργασίες (όπως θραύση από χιόνι ή άνεμο) είτε ως υπολείμματα από δασοκομικές εργασίες.
- Τα **πρέμνα**, δηλαδή οι βάσεις των κορμών που απομένουν στο έδαφος μετά από υλοτομία, μαζί με τις ρίζες τους.

Η πρώτη φάση ανάφλεξης των δασικών πυρκαγιών εντοπίζεται, κατά κανόνα, στην επιεδάφια καύσιμη ύλη. Σε αυτήν την κατηγορία δεν παρατηρείται έλλειψη οξυγόνου, γεγονός που επιτρέπει τη γρήγορη και έντονη εξάπλωση της φωτιάς. Ως αποτέλεσμα, οι πυρκαγιές που ξεκινούν από την επιφάνεια του δάσους συχνά εμφανίζουν επικίνδυνα χαρακτηριστικά, κυρίως σε ό,τι αφορά την ταχύτητα διάδοσης.

Η εναέρια καύσιμη ύλη περιλαμβάνει κάθε είδος φυτικής μάζας — ζωντανής ή νεκρής — που βρίσκεται ψηλά, μακριά από το έδαφος, συνήθως στο ύψος της κόμης. Σε αυτήν περιλαμβάνονται τα φύλλα, οι βελόνες και τα κλαδιά των δέντρων, τα νεκρά όρθια δέντρα, οι υψηλοί θάμνοι, καθώς και άλλες μορφές βιομάζας όπως αναρριχώμενα φυτά ή βρύα. Όταν αυτή η κατηγορία ύλης αναφλέγεται, προκαλεί σημαντική αύξηση στο μήκος της φλόγας και στη συνολική ένταση της πυρκαγιάς, ενώ παράλληλα ενισχύει την πιθανότητα μετάδοσης της φωτιάς σε μεγάλες αποστάσεις μέσω καυτρών.

Η ποσότητα της καύσιμης ύλης, που συνήθως εκφράζεται σε τόνους ανά στρέμμα ή κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο, αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη θερμική ένταση της φωτιάς. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η διαθέσιμη καύσιμη ύλη, τόσο περισσότερη θερμική ενέργεια μπορεί να παραχθεί. Αντίθετα, η ενέργεια που περιέχεται ανά μονάδα βάρους (π.χ. ανά κιλό) παίζει μικρότερο ρόλο, καθώς οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων δασικών καυσίμων σε αυτό το επίπεδο είναι σχετικά περιορισμένες.

Η ταχύτητα με την οποία απελευθερώνεται η ενέργεια που εμπεριέχεται στην καύσιμη ύλη — και, κατά συνέπεια, η ένταση του μετώπου της πυρκαγιάς — δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ποσότητά της. Για παράδειγμα, είναι πολύ πιθανό μια πυρκαγιά σε περιοχή με χόρτα και καύσιμη ύλη 2 τόνων ανά στρέμμα να εμφανίσει μεγαλύτερο ύψος φλόγας και ταχύτερη εξάπλωση από μια πυρκαγιά σε πευκοδάσος με 4 τόνους πεσμένων πευκοβελόνων ανά στρέμμα.

Αυτό συμβαίνει λόγω δύο κρίσιμων χαρακτηριστικών της καύσιμης ύλης: του μεγέθους των στοιχείων της (π.χ. πάχους) και του βαθμού συμπίεσής της. Τα χόρτα ανήκουν στα λεγόμενα λεπτόκαυτα δασικά καύσιμα. Υπό ευνοϊκές συνθήκες, μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές με πολύ γρήγορη διάδοση και εντυπωσιακό ύψος φλόγας, αν και η φλόγα αυτή έχει μικρό πάχος και σύντομη διάρκεια.

Αντιθέτως, οι πευκοβελόνες, παρότι έχουν παρόμοιο μέγεθος με τα χόρτα, τείνουν να προκαλούν πιο αργά εξελισσόμενες πυρκαγιές και χαμηλότερες φλόγες, ακόμη και όταν βρίσκονται σε ίση ποσότητα καύσιμης ύλης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ξηροφυλλοτάπητας είναι συχνά πυκνά συμπιεσμένος και διαθέτει μικρά ή ελάχιστα διάκενα, που περιορίζουν την κυκλοφορία του αέρα και την ταχύτητα της καύσης.

Η υγρασία που περιέχεται στην καύσιμη ύλη — δηλαδή η ποσότητα νερού (σε γραμμάρια) που αντιστοιχεί σε κάθε γραμμάριο ξερής βιομάζας — αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα για τη συμπεριφορά της φωτιάς. Ο ρόλος της είναι ιδιαίτερα σημαντικός και εύκολα αντιληπτός, καθώς η υγρασία μεταβάλλεται έντονα τόσο κατά τη διάρκεια του έτους όσο και σε ημερήσια βάση.

Όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα της καύσιμης ύλης σε νερό, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας απαιτείται για την προθέρμανσή της μέχρι τους $\sim 300^{\circ}\text{C}$,

θερμοκρασία στην οποία ξεκινά η ανάφλεξη. Αυτό συμβαίνει επειδή, πριν από την ανάφλεξη, πρέπει να εξατμιστεί το νερό που περιέχεται στην ύλη, διαδικασία που ξεκινά στους 100°C και απαιτεί σημαντική κατανάλωση θερμικής ενέργειας. Συνεπώς, η εξάτμιση της υγρασίας καθυστερεί την καύση, επηρεάζοντας και τη συνολική δυναμική της πυρκαγιάς.

Η δασική καύσιμη ύλη διακρίνεται σε ζωντανή και νεκρή. Η ζωντανή βιομάζα εμφανίζει επίπεδα υγρασίας που κυμαίνονται από 50% έως και 300%, πράγμα που σημαίνει ότι σε κάθε γραμμάριο ξερής ύλης αντιστοιχούν 0,5 έως 3 γραμμάρια νερού. Οι μεταβολές αυτής της υγρασίας εξαρτώνται κυρίως από τη φυσιολογική κατάσταση του φυτού, που διαφέρει από είδος σε είδος και αλλάζει ανάλογα με την εποχή — καθώς αυτή επηρεάζει τη φάση ανάπτυξης. Οι συνθήκες ξηρασίας παίζουν επίσης ρόλο, αν και μικρότερο.

Η βασική διαφορά ανάμεσα στη ζωντανή και τη νεκρή καύσιμη ύλη, σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία, είναι ότι η υγρασία της δεύτερης εξαρτάται άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και ακολουθεί τις διακυμάνσεις τους. Παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, αλλά κυρίως η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, επηρεάζουν τη νεκρή καύσιμη ύλη σε καθημερινή βάση, μεταβάλλοντας διαρκώς το ποσοστό υγρασίας της και, κατά συνέπεια, τη συμπεριφορά της κατά την καύση.

Η σχετική υγρασία αποτελεί το ποσοστό της ποσότητας υδρατμών που περιέχει ο αέρας σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή ποσότητα που θα μπορούσε να συγκρατήσει στην ίδια θερμοκρασία και πίεση (δηλαδή αν ο αέρας ήταν κορεσμένος). Εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό επί τοις εκατό. Όταν, για παράδειγμα, παρατηρείται ομίχλη τις πρωινές ώρες, η σχετική υγρασία φτάνει το 100%, προκαλώντας υγροποίηση των υδρατμών.

Καθώς η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται στη διάρκεια της ημέρας, αυξάνεται και η ικανότητα του αέρα να συγκρατεί περισσότερους υδρατμούς (δηλαδή αυξάνεται ο παρονομαστής του "κλάσματος" της σχετικής υγρασίας). Έτσι, η σχετική υγρασία μειώνεται, ακόμα κι αν η απόλυτη ποσότητα υδρατμών παραμένει σταθερή. Αντίστοιχα, όταν η θερμοκρασία πέφτει, η σχετική υγρασία αυξάνεται.

Σε ημερήσια βάση, η θερμοκρασία του αέρα φτάνει στη μέγιστη τιμή της συνήθως τις μεσημβρινές ώρες (1–3 μ.μ.), ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία σημειώνεται τις πρώτες πρωινές ώρες, λίγο πριν την ανατολή του ηλίου. Η σχετική υγρασία ακολουθεί αντίστροφη πορεία, φτάνοντας στη μέγιστη τιμή της το πρωί και στην ελάχιστη το μεσημέρι.

Αυτή η συνεχής και προβλέψιμη μεταβολή καθιστά τη σχετική υγρασία κρίσιμο παράγοντα για την κατανόηση και πρόβλεψη των μεταβολών στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών.

Η υγρασία της νεκρής καύσιμης ύλης κυμαίνεται συνήθως από 2% έως 30% και εξαρτάται κυρίως από τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, ενώ η θερμοκρασία παίζει δευτερεύοντα ρόλο. Η περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνεται σημαντικά όταν η καύσιμη ύλη έρχεται σε άμεση επαφή με ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, όπως βροχή ή χιόνι.

Η ανταπόκριση της καύσιμης ύλης στις μεταβολές του περιβάλλοντος —σχετική υγρασία και θερμοκρασία— δεν είναι άμεση, αλλά εξαρτάται από τις διαστάσεις των υλικών. Τα λεπτά καύσιμα (π.χ. χόρτα, φύλλα, πευκοβελόνες) με διάμετρο μικρότερη από 0,6 εκατοστά, προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές μεταβολές εντός 1–2 ωρών.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ποσότητα της λεπτής νεκρής καύσιμης ύλης και η υγρασία που περιέχει αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τη συμπεριφορά της φωτιάς. Στην πλειονότητα των δασικών πυρκαγιών, η αρχική ανάφλεξη συμβαίνει σε αυτήν την κατηγορία καυσίμων, και μάλιστα τόσο πιο εύκολα όσο ξηρότερα είναι τα υλικά. Μόλις η φωτιά αποκτήσει ένταση, ακολουθεί η ανάφλεξη καυσίμων μέσης διαμέτρου και τελικά των ζωντανών φυτών.

Ένας ακόμη κρίσιμος παράγοντας είναι η θερμοκρασία της καύσιμης ύλης. Όσο υψηλότερη είναι, τόσο λιγότερη ενέργεια απαιτείται για την ανάφλεξή της, με αποτέλεσμα τα ταχύτερα ξεσπάσματα και εξάπλωση της φωτιάς. Η θερμοκρασία των καυσίμων επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του αέρα αλλά και από την έκθεσή τους στην ηλιακή ακτινοβολία. Η επίδραση του ήλιου μπορεί να προκαλέσει διαφορές θερμοκρασίας που ξεπερνούν τους 25°C ανάμεσα σε υλικά εκτεθειμένα στον ήλιο και σε εκείνα που βρίσκονται σε σκιά (π.χ. κάτω από δενδρώδη κόμη ή σύννεφα).

1.3.2 Οι καιρικές συνθήκες

Ο καιρός αποτελεί τον πιο μεταβλητό και απρόβλεπτο παράγοντα που επηρεάζει τη δυναμική των δασικών πυρκαγιών. Η επίδρασή του στη φωτιά είναι καθοριστική, γεγονός που καθιστά την κατανόηση και συνεχή παρακολούθησή του απαραίτητη για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των φαινομένων. Ένας από τους θεμελιώδεις κανόνες που διδάσκεται κάθε δασοπυροσβέστης είναι η συστηματική παρατήρηση και ερμηνεία των καιρικών συνθηκών, καθώς οι μεταβολές στον καιρό μεταφράζονται άμεσα σε μεταβολές στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς.

Οι κύριες μετεωρολογικές παράμετροι που ασκούν επίδραση στην εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνουν:

- την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου
- τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας
- τη θερμοκρασία του αέρα
- τα κατακρημνίσματα (π.χ. βροχή, χιόνι, πάχνη, δροσιά)
- την παρουσία ηλιοφάνειας ή νεφώσεων

- τη σταθερότητα της ατμόσφαιρας

Η επίδραση αυτών των παραγόντων σε τοπικό επίπεδο διαμορφώνεται από:

- τις γενικότερες (συνοπτικές) μετεωρολογικές συνθήκες,
- την τοπογραφία της περιοχής, και
- την επίδραση της ίδιας της φωτιάς στο μικροκλίμα που αναπτύσσεται γύρω της.

Παράγοντες όπως η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία του αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία και τα καιρικά φαινόμενα (βροχή, δροσιά) επηρεάζουν άμεσα τη θερμοκρασία και την υγρασία της καύσιμης ύλης – παράγοντες που, όπως έχει ήδη αναλυθεί, καθορίζουν σημαντικά τη συμπεριφορά της φωτιάς.

Η ένταση του ανέμου είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς. Συνήθως μετριέται σε χιλιόμετρα ανά ώρα με τη χρήση ανεμόμετρου. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει το κατάλληλο όργανο, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να εκτιμηθεί παρατηρώντας την επίδρασή του στο φυσικό περιβάλλον, με τη βοήθεια της κλίμακας Μποφόρ. Όσο αυξάνεται η ένταση του ανέμου, τόσο περισσότερο οι φλόγες γέρνουν προς την κατεύθυνση εξάπλωσης της φωτιάς και πλησιάζουν τα καύσιμα υλικά μπροστά τους. Αυτό ενισχύει την ακτινοβολία θερμότητας και εντείνει τη μεταφορά θερμότητας μέσω επαγωγής, επιταχύνοντας την προθέρμανση των καυσίμων. Το αποτέλεσμα είναι η ραγδαία αύξηση της ταχύτητας εξάπλωσης της φωτιάς. Η συνεχής ανάφλεξη νέας καύσιμης ύλης οδηγεί στη μεγέθυνση των φλογών, ενώ μικρά κενά μεταξύ των καυσίμων δεν εμποδίζουν πλέον τη διάδοση της πυρκαγιάς.

Η επίδραση του ανέμου διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της καύσιμης ύλης. Είναι πιο έντονη στα λεπτά καύσιμα, όπως τα χόρτα, και σε υλικά που δεν είναι συμπιεσμένα. Όταν η καύσιμη ύλη βρίσκεται σε ύψος, όπως στους θάμνους, γίνεται πιο ευαίσθητη στην επίδραση του ανέμου κατά την ανάφλεξη. Συχνά, αν δεν υπάρχουν ακραίες ξηρασίες, η φωτιά σε θαμνώδεις περιοχές χρειάζεται ισχυρό άνεμο για να διαδοθεί. Τις νύχτες, που ο άνεμος συνήθως υποχωρεί και η υγρασία αυξάνεται, η εξάπλωση της φωτιάς σε θάμνους σταματά συχνά χωρίς παρέμβαση. Η μείωση της προθέρμανσης των καυσίμων λόγω χαμηλότερου ανέμου, μαζί με την αυξημένη υγρασία στα ζωντανά και νεκρά φυτά, καθιστούν δύσκολη τη διάδοση της πυρκαγιάς.

Όταν ο άνεμος είναι ισχυρός, ιδιαίτερα σε επικόρυφες πυρκαγιές, μεταφέρει αναμένα κομμάτια καύσιμης ύλης, όπως κουκουνάρια και φύλλα, σε μεγάλες αποστάσεις μπροστά από το μέτωπο της φωτιάς. Αυτά τα κομμάτια, που ονομάζονται «καύτρες», προκαλούν νέες εστίες φωτιάς, συχνά πέρα από δρόμους και αντιπυρικές ζώνες, δυσχεραίνοντας το έργο των δασοπυροσβεστών και αυξάνοντας τον κίνδυνο εγκλωβισμού.

Η διεύθυνση του ανέμου παίζει σημαντικό ρόλο, ειδικά σε συνδυασμό με την τοπογραφία της περιοχής, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω. Σημαντικό είναι επίσης ότι οι αλλαγές στη διεύθυνση του ανέμου μπορούν να μεταβάλουν την πορεία της φωτιάς, δυσκολεύοντας την αντιμετώπισή της και αυξάνοντας τους κινδύνους.

Η σταθερότητα της ατμόσφαιρας είναι ένας παράγοντας που, αν και δεν γίνεται άμεσα αντιληπτός από τους περισσότερους, μπορεί να έχει καθοριστική επίδραση στην εξέλιξη μιας δασικής πυρκαγιάς. Όταν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας μειώνεται αργά με το ύψος, τότε δυσκολεύεται η κάθετη κυκλοφορία του αέρα, περιορίζοντας την πρόσβαση του οξυγόνου στη φωτιά. Σε τέτοιες περιπτώσεις λέμε ότι η ατμόσφαιρα είναι σταθερή, και αυτό μπορεί να επιβραδύνει την εξάπλωση της φωτιάς.

Αντίθετα, σε ασταθείς καιρικές συνθήκες, όπου ο αέρας κινείται πιο εύκολα κατακόρυφα, η φωτιά ενισχύεται καθώς υπάρχει πλούσια παροχή οξυγόνου, μεγαλύτερη θερμική ενέργεια και έντονη ανάπτυξη καπνού. Ενδείξεις τέτοιας αστάθειας είναι ο καθαρός ουρανός, η υψηλή ορατότητα και η εμφάνιση σύννεφων με κάθετη ανάπτυξη (π.χ. σωρείτες). Αντιθέτως, η παρουσία θολούρας, φωτοχημικού νέφους ή διάχυτου καπνού υποδηλώνει ατμοσφαιρική σταθερότητα, που συνήθως ανακόπτει τη δυναμική της φωτιάς.

1.3.2 Οι τοπογραφικές συνθήκες

Η τοπογραφία παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς. Στοιχεία όπως η κλίση του εδάφους, η κατεύθυνση που "βλέπει" μια πλαγιά (έκθεση), το υψόμετρο και οι γεωμορφές της περιοχής, όπως φαράγγια, διάσελα και κορυφογραμμές, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τη δυναμική της φωτιάς. Αυτή η επίδραση μπορεί να είναι είτε άμεση είτε έμμεση.

Συνήθως, η φωτιά τείνει να κατευθύνεται προς τα ψηλότερα σημεία της πλαγιάς, εκτός εάν πνέει δυνατός άνεμος προς την αντίθετη κατεύθυνση. Όσο πιο απότομη είναι η πλαγιά, τόσο πιο γρήγορα εξαπλώνεται η φωτιά. Ιδιαίτερα σε ελαφριά και εύφλεκτα καύσιμα, όπως ξερά χόρτα, η εξάπλωση μπορεί να γίνει πολύ γρήγορη αν ο άνεμος φυσάει προς την ίδια κατεύθυνση με την κλίση.

Η επίδραση της κλίσης εκδηλώνεται με δύο κυρίως τρόπους. Πρώτον, η φλόγα γέρνει προς την καύσιμη ύλη που βρίσκεται μπροστά, όπως συμβαίνει και σε περίπτωση ισχυρού ανέμου, αυξάνοντας έτσι τη θερμική ακτινοβολία και επιταχύνοντας την ανάφλεξη. Δεύτερον, η θερμότητα που παράγεται ανεβαίνει κατά μήκος της πλαγιάς, δημιουργώντας ανοδικά ρεύματα αέρα που ενισχύουν ακόμη περισσότερο τη διάδοση της φωτιάς.

Επιπλέον, σε περιοχές με μεγάλη κλίση, υπάρχει ο κίνδυνος να κυλήσουν φλεγόμενα υλικά, όπως κλαδιά ή κουκουναρία, προς τα κάτω, προκαλώντας νέες εστίες κοντά στη βάση της πλαγιάς. Αυτές οι νέες εστίες έχουν στη διάθεσή τους άφθονο άκαυτο

υλικό και συνεχίζουν να εξαπλώνονται προς τα πάνω, με την τοπογραφία να διευκολύνει την πορεία της πυρκαγιάς.

Η κατεύθυνση προς την οποία βλέπει μια πλαγιά επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά της φωτιάς, καθώς σχετίζεται με τις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας της καύσιμης ύλης. Γενικά, στις βόρειες πλαγιές, που δέχονται λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία, η καύσιμη ύλη τείνει να διατηρείται πιο υγρή και πιο δροσερή. Αντίθετα, οι νότιες και νοτιοδυτικές πλαγιές είναι πιο θερμές και ξηρές, ιδιαίτερα τις κρίσιμες ώρες της ημέρας. Οι ανατολικές πλαγιές θερμαίνονται κυρίως τις πρωινές ώρες, ενώ οι δυτικές διατηρούν τη θερμότητά τους μέχρι αργά το απόγευμα. Όσο πιο απότομη είναι η πλαγιά, τόσο πιο έντονες είναι αυτές οι επιδράσεις.

Επιπλέον, η ηλιακή θέρμανση της πλαγιάς προκαλεί τοπικούς ανηφορικούς ανέμους, οι οποίοι διευκολύνουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, το έδαφος ψύχεται και δημιουργούνται καθοδικά ρεύματα αέρα προς τη βάση της πλαγιάς, τα οποία επιβραδύνουν την πορεία της φωτιάς και βοηθούν το έργο της κατάσβεσης.

Η έκθεση και το υψόμετρο μιας περιοχής επηρεάζουν επίσης τον τύπο και την πυκνότητα της βλάστησης. Βόρειες πλαγιές συνήθως φιλοξενούν πλουσιότερη βλάστηση, ενώ οι νότιες είναι συχνά πιο φτωχές και υποβαθμισμένες. Το υψόμετρο επηρεάζει άμεσα τη θερμοκρασία του αέρα, με τη θερμοκρασία να μειώνεται κατά περίπου 1°C για κάθε 100 μέτρα ανόδου. Αυτή η μεταβολή επηρεάζει τόσο τη φωτιά όσο και την ανάπτυξη της φυτοκάλυψης, άρα και τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης.

Η γενική τοπογραφία μιας περιοχής μπορεί να επηρεάσει έμμεσα τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, κυρίως μέσα από τη διαμόρφωση του τοπικού ανέμου. Αλλαγές στην κλίση, το υψόμετρο και την έκθεση οδηγούν σε διαφοροποιήσεις στην ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου, προκαλώντας ακόμα και στροβιλισμούς. Για παράδειγμα, όταν ο άνεμος περνά μέσα από ένα στενό και βαθύ φαράγγι, επιταχύνεται σημαντικά. Επιπλέον, σε σημεία πίσω από κορυφογραμμές, μπορεί να εμφανιστούν έντονες αναταράξεις λόγω του σχήματος του εδάφους, επηρεάζοντας τη φωτιά με απρόβλεπτο τρόπο.

Ένα ιδιαίτερα επικίνδυνο γεωμορφολογικό χαρακτηριστικό είναι το κλειστό φαράγγι, δηλαδή εκείνο που καταλήγει σε αδιέξοδο. Αν υπάρχει αρκετή βλάστηση και η φωτιά εισέλθει στη βάση του, μπορεί να ενισχυθεί απότομα. Το φαράγγι λειτουργεί σαν φυσική καμινάδα, δημιουργώντας ισχυρή ανοδική ροή αέρα που οδηγεί τις φλόγες γρήγορα προς την κορυφή. Το φαινόμενο εντείνεται όταν υπάρχει άνεμος στην κορυφογραμμή και αστάθεια στην ατμόσφαιρα.

1.4 Η συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών

Ο όρος "συμπεριφορά δασικής πυρκαγιάς" αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο η φωτιά εκδηλώνεται, εξαπλώνεται και αλληλεπιδρά με το περιβάλλον, καθώς και στα φαινόμενα που συνοδεύουν την πορεία της. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να διαφέρει σημαντικά από περίπτωση σε περίπτωση, καθώς εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες οι οποίοι συχνά συνδέονται μεταξύ τους με σύνθετους μηχανισμούς.

Η κατανόηση του πώς εξελίσσεται και δρα μια πυρκαγιά αποτελεί βασικό στοιχείο για την αποτελεσματική και ασφαλή διαχείρισή της. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό οι πρώτες πυροσβεστικές δυνάμεις που φτάνουν στο σημείο να εκτιμήσουν και να αναφέρουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς [1]. Αυτή η αξιολόγηση παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόφαση για αποστολή ενισχύσεων. Για να γίνει αυτό, απαιτείται καλή γνώση των βασικών εννοιών που περιγράφουν τη φωτιά και την εξάπλωσή της.

1.4.1 Περιγραφή της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών.

Οι δασικές πυρκαγιές κατατάσσονται σε τρεις βασικούς τύπους, ανάλογα με τον τρόπο εξάπλωσής τους:

- **Υπόγειες ή πυρκαγιές εδάφους:** Αυτές είναι σπάνιες στην Ελλάδα και καίνε υλικά που βρίσκονται στο έδαφος ή λίγο κάτω από αυτό, όπως ημιαποσυντεθειμένα φύλλα, βελόνες και τύρφη. Καταναλώνουν πολύ λίγο οξυγόνο, παράγουν ελάχιστο ή καθόλου καπνό και εξαπλώνονται αργά.
- **Πυρκαγιές επιφανείας:** Είναι ο πιο κοινός τύπος πυρκαγιάς στη χώρα μας. Καίνε τη βλάστηση που βρίσκεται κοντά στο έδαφος, είτε είναι νεκρή (π.χ. φύλλα, κλαδιά) είτε ζωντανή (π.χ. χόρτα, θάμνοι, νεαρά δέντρα). Σε κάποιες περιπτώσεις δεν υπάρχουν ψηλά δέντρα, ενώ σε άλλες υπάρχουν, αλλά η φωτιά δεν φτάνει στην κόμη τους. Η σοβαρότητα τέτοιων πυρκαγιών ποικίλλει ανάλογα με το είδος της καύσιμης ύλης και τις καιρικές συνθήκες, από εύκολες έως πολύ δύσκολες στην κατάσβεση. Κοινό χαρακτηριστικό είναι η έντονη φλόγα, λόγω καλής παροχής οξυγόνου.
- **Πυρκαγιές κόμης:** Εμφανίζονται σε ώριμα δάση, όταν η φωτιά φτάνει και καίει τις κόμες των δέντρων. Είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες και δύσκολες στη διαχείριση, με έντονη φλόγα και ταχύ ρυθμό εξάπλωσης. Είναι συχνές στα παράκτια πευκοδάση, όπου πρώτα καίγεται η θαμνώδης βλάστηση στον υπόροφο και στη συνέχεια η φωτιά μεταδίδεται στην κόμη, δημιουργώντας ένα μικτό φαινόμενο. Η μορφή της πυρκαγιάς μπορεί να αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες, π.χ. από επιφανειακή σε κόμη και αντίστροφα.

Ένας ιδιαίτερα επικίνδυνος τύπος πυρκαγιάς κόμης είναι αυτός που εξαπλώνεται ανεξάρτητα από τη φωτιά του εδάφους, περνώντας απευθείας από δέντρο σε δέντρο, όταν

υπάρχει συνεχής κόμη και ισχυρός άνεμος. Αυτό ονομάζεται ανεξάρτητη πυρκαγιά κόμης[1] και μπορεί να εξαπλωθεί πολύ γρήγορα.

Χαρακτηριστικά μιας δασικής πυρκαγιάς:

Μια δασική πυρκαγιά μπορεί να ανήκει σε μία από τις βασικές κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, όμως αυτή η ταξινόμηση από μόνη της δεν αρκεί για να κατανοηθεί πλήρως η συμπεριφορά της. Για να περιγραφεί καλύτερα η εξέλιξή της και να υποστηριχθεί η δασοπυρόσβεση, λαμβάνονται υπόψη ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά:

- **Ταχύτητα εξάπλωσης:** Αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία κινείται το μέτωπο της φωτιάς και μετριέται σε χιλιόμετρα ανά ώρα.
- **Μήκος φλόγας:** Είναι η απόσταση από τη βάση μέχρι την κορυφή της φλόγας, σε μέτρα. Το μέγεθος αυτό συνδέεται με την ένταση της φωτιάς, δηλαδή με την ποσότητα θερμότητας που εκλύεται ανά μέτρο μετώπου κάθε δευτερόλεπτο.
- **Περίμετρος πυρκαγιάς:** Εκφράζει το συνολικό μήκος της περιμέτρου της φωτιάς και παρακολουθείται και ως προς το ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται.

Πέρα από αυτά τα ποσοτικά στοιχεία, υπάρχουν και ποιοτικά χαρακτηριστικά που περιγράφουν τη μορφή και την ένταση της φωτιάς. Ορισμένα παραδείγματα περιλαμβάνουν φαινόμενα όπως η ανάφλεξη μεμονωμένων δέντρων, η εξάπλωση της φωτιάς στις κόμες των δέντρων, η διάδοση μέσω καύτρεις, η εκρηκτική συμπεριφορά της πυρκαγιάς, ή ακόμη και η εμφάνιση ανεμοστρόβιλων μέσα στην πυρκαγιά [1]. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα για την κατανόηση του κινδύνου και τη σωστή διαχείριση της κατάστασης.

1.4.2 Η συμπεριφορά των μεγάλων δασικών πυρκαγιών του 2007 στην Ελλάδα.

Η παρούσα ενότητα αφορά την καταγραφή παρατηρήσεων και μετρήσεων για τη συμπεριφορά της φωτιάς κατά τη διάρκεια ορισμένων από τις σημαντικότερες δασικές πυρκαγιές που εκδηλώθηκαν στην Ελλάδα το καλοκαίρι του 2007 [2]. Οι μετρήσεις αυτές κάλυπταν παραμέτρους που σχετίζονταν με τη φωτιά, τις καιρικές συνθήκες, την τοπογραφία και την καύσιμη ύλη. Τα δεδομένα αποδελτιώθηκαν, εμπλουτίστηκαν με επιπλέον πληροφορίες και εντάχθηκαν σε μια βάση δεδομένων η οποία περιλάμβανε συνολικά 70 διαφορετικές περιπτώσεις.

Για ένα μέρος αυτών (συγκεκριμένα 20 περιπτώσεις), όπου η βλάστηση χαρακτηριζόταν από θαμνώδη μορφή με αείφυλλους πλατύφυλλους θάμνους ύψους 1,5 έως 3 μέτρα, πραγματοποιήθηκε πρόβλεψη της επιφανειακής πυρκαγιάς με τη χρήση του λογισμικού BehavePlus της Δασικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών. Η πρόβλεψη βασίστηκε στο μοντέλο καύσιμης ύλης "Θαμνώνες αείφυλλων πλατύφυλλων II (ύψος 1,5-3 m)", σύμφωνα

με τους Δημητρακόπουλο και συνεργάτες (2001) και τον Dimitrakopoulos (2002), με μικρές τροποποιήσεις [2].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Αισθητήρες

Αισθητήρας είναι μια συσκευή που έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος και να το μετατρέπει σε μετρήσιμο σήμα. Οι πρώτοι αισθητήρες που αναπτύχθηκαν ήταν μηχανικοί, ωστόσο με την πρόοδο της τεχνολογίας και των ηλεκτρονικών συστημάτων δημιουργήθηκαν νέοι τύποι που βασίζονται στη μετατροπή φυσικών μεγεθών, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, σε ηλεκτρικά σήματα. Η επιλογή του ηλεκτρικού σήματος ως μορφή εξόδου θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς μπορεί να μεταφερθεί, να ενισχυθεί, να φιλτραριστεί, να αποθηκευτεί και να παρουσιαστεί με ακρίβεια.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας γύρω από τον ηλεκτρισμό οδήγησε στη δημιουργία αισθητήρων που λειτουργούν με ηλεκτρονικά κυκλώματα και παράγουν είτε αναλογικό είτε ψηφιακό σήμα. Η ανάπτυξη αυτών των συστημάτων ενισχύθηκε σημαντικά από τις απαιτήσεις των θετικών επιστημών και τις ανάγκες που προέκυψαν από την τεχνολογική πρόοδο, με αποτέλεσμα να καλύπτεται πλέον ένα ευρύ φάσμα φυσικών μεγεθών.

Στη σύγχρονη εποχή, οι αισθητήρες συνδυάζονται με μικροϋπολογιστικά συστήματα, δημιουργώντας μικρών διαστάσεων μονάδες που λειτουργούν ως κόμβοι σε ασύρματα δίκτυα. Μέσω αυτών των κόμβων, οι μετρήσεις αποστέλλονται σε μια κεντρική μονάδα, όπου επεξεργάζονται και παρουσιάζονται στον τελικό χρήστη.

Η παρουσία αισθητήρων είναι πλέον καθολική, καθώς χρησιμοποιούνται καθημερινά και είναι ενσωματωμένοι σε πλήθος οικιακών, επαγγελματικών και βιομηχανικών συσκευών.



Εικόνα 2 - Αισθητήρες

2.1 Ιστορική Αναδρομή Αισθητήρων

Οι αισθητήρες υπήρχαν στη φύση ήδη από τα πρώτα στάδια της ζωής, καθώς αισθητήρια όργανα όπως τα μάτια και τα αυτιά μπορούν να θεωρηθούν ως φυσικοί μηχανισμοί ανίχνευσης πληροφοριών από το περιβάλλον. Με την πάροδο του χρόνου, ο άνθρωπος συνειδητοποίησε την ανάγκη ύπαρξης ειδικών οργάνων για τη μέτρηση φυσικών μεγεθών και φαινομένων.

Ήδη από τα τέλη του 16ου αιώνα, αναπτύχθηκαν οι πρώτες σχετικές συσκευές, όπως το θερμόμετρο το 1585 και το βαρόμετρο το 1643. Οι πρώτοι τεχνητοί αισθητήρες βασίζονταν σε μηχανικές αρχές λειτουργίας. Ωστόσο, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, ιδίως στον τομέα των ηλεκτρονικών, αναπτύχθηκαν νέες κατηγορίες αισθητήρων που μετατρέπουν φυσικά μεγέθη σε ηλεκτρικά σήματα, διευκολύνοντας τη συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων [4].

2.2 Αποκλίσεις αισθητήρων

Οι περισσότεροι αισθητήρες παρουσιάζουν ποικίλες πηγές σφαλμάτων, ορισμένες από τις οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν εύκολα, ενώ άλλες απαιτούν πιο σύνθετη προσέγγιση. Ορισμένες από τις πιο συνηθισμένες περιπτώσεις είναι οι εξής:

- **Σφάλμα ευαισθησίας:** Εμφανίζεται όταν η ευαισθησία του αισθητήρα αποκλίνει από την αναμενόμενη θεωρητική τιμή.
- **Σφάλμα κορεσμού:** Προκαλείται από την αδυναμία του αισθητήρα να αποδώσει σωστά τιμές όταν η έξοδος πλησιάζει τα μέγιστα ή ελάχιστα όριά της.
- **Σφάλμα μετατόπισης μηδενός (offset):** Ο αισθητήρας δίνει μη μηδενική έξοδο ακόμη και όταν η είσοδος είναι μηδενική.
- **Μη γραμμικότητα:** Εμφανίζεται όταν η ευαισθησία του αισθητήρα δεν είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της περιοχής μέτρησης.
- **Δυναμικό σφάλμα:** Οφείλεται σε αδυναμία του αισθητήρα να ανταποκριθεί επαρκώς σε ταχείες μεταβολές του εισερχόμενου σήματος.
- **Ολίσθηση (drift):** Πρόκειται για σταδιακή μεταβολή της εξόδου χωρίς αντίστοιχη αλλαγή στην είσοδο.
- **Θόρυβος:** Τυχαίες και απρόβλεπτες αποκλίσεις της εξόδου που δεν σχετίζονται με πραγματική μεταβολή της εισόδου.
- **Υστέρηση (hysteresis):** Σφάλμα που προκαλείται όταν η έξοδος εξαρτάται όχι μόνο από την παρούσα είσοδο, αλλά και από την κατεύθυνση της μεταβολής της.

- **Σφάλμα ψηφιοποίησης:** Εμφανίζεται κατά τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, λόγω περιορισμένης ακρίβειας.
- **Διασταυρούμενη ευαισθησία:** Ο αισθητήρας αντιδρά και σε άλλες φυσικές μεταβλητές πέραν αυτών για τις οποίες έχει σχεδιαστεί, επηρεάζοντας την ακρίβεια των μετρήσεων.

2.3 Γενικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Εύρος	Τα όρια στα οποία η συσκευή λειτουργεί αξιόπιστα.
Ακρίβεια	Η εγγύτητα της τιμής εξόδου προς τη τιμή εισόδου.
Σφάλμα	Η διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή και τη πραγματική τιμή.
Ανοχή	Το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να δημιουργήσει ο αισθητήρας.
Διακριτική ικανότητα	Η μικρότερη αλλαγή τιμής εισόδου που μπορεί να ανιχνεύσει.
Ευαισθησία	Η σχέση της αλλαγής εξόδου προς τη αλλαγή εισόδου, είναι ίση με τη διαφορά των τιμών της εξόδου προς τη διαφορά των αντίστοιχων τιμών εισόδου.
Βαθμονόμηση	Η βαθμολόγηση της κλίμακας σε μονάδες.
Νεκρή ζώνη	Το μέγιστο ποσό αλλαγής της εισόδου που δεν επιφέρει αλλαγή στην έξοδο.
Γραμμικότητα	Ο βαθμός στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου προσεγγίζει ευθεία ως προς την είσοδο του αισθητήρα.

Απόκριση	Ο χρόνος που απαιτείται για να λάβει τη τελική τιμή η έξοδος.
Καθυστέρηση	Η καθυστέρηση της αλλαγής της εξόδου ως προς την είσοδο.
Ευστάθεια	Η μεταβολή της εξόδου σε μεγάλη χρονική περίοδο, χωρίς μεταβολή της εισόδου και των συνθηκών.
Υστέρηση	Η διαφορά στην έξοδο όταν η κατεύθυνση της μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί.
Επαναληψιμότητα	Η παραγωγή του ίδιου αποτελέσματος, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, με την ίδια είσοδο.
Ολίσθηση	Η μεταβολή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα με το χρόνο και το περιβάλλον.
Στατικό σφάλμα	Σταθερό σφάλμα σε όλο το εύρος λειτουργίας, το οποίο μπορεί να αντισταθμιστεί.
Χρόνος λειτουργίας	Ο εκτιμώμενος χρόνος λειτουργίας στα πλαίσια των προδιαγραφών του.

Πίνακας 1 - Γενικά χαρακτηριστικά αισθητήρων [3]

2.4 Εφαρμογές αισθητήρων

Οι αισθητήρες ταξινομούνται ανάλογα με τη μορφή της ενέργειας ή του σήματος διέγερσης που ανιχνεύουν. Αυτή η ταξινόμηση καθορίζει και τις αντίστοιχες εφαρμογές τους. Οι βασικές κατηγορίες είναι οι εξής:

- **Μηχανική ενέργεια:** Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μεγεθών όπως η επιτάχυνση, η ροή, η δύναμη, η ταχύτητα, η θέση, η μάζα και η ροπή.
- **Ηλεκτρική ενέργεια:** Αξιοποιείται για τη μέτρηση ηλεκτρικής τάσης, πόλωσης, αντίστασης, αγωγιμότητας και συχνότητας.

- **Ακουστική ενέργεια:** Εφαρμόζεται για τη μέτρηση χαρακτηριστικών όπως το μήκος κύματος, η φάση, η πόλωση και η ταχύτητα διάδοσης ακουστικών κυμάτων.
- **Βιολογική ενέργεια:** Συνδέεται με τη μέτρηση βιολογικών παραμέτρων όπως η συγκέντρωση βιομάζας, σακχάρων και πρωτεϊνών.
- **Χημική ενέργεια:** Χρησιμοποιείται για την ανάλυση χημικών παραμέτρων, όπως η υγρασία, η σύσταση και η συγκέντρωση αερίων ή ατμών.
- **Μαγνητική ενέργεια:** Εφαρμόζεται στη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, της μαγνητικής ροής και της διαπερατότητας υλικών.
- **Οπτική ενέργεια:** Χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση του φάσματος, της φάσης, της πόλωσης, του μήκους κύματος και της απορρόφησης φωτός.
- **Ακτινοβολία:** Ενδείκνυται για τη μέτρηση παραμέτρων όπως η ενεργειακή ακτινοβολία, τα μικροκύματα και η φωτεινότητα.
- **Θερμική ενέργεια:** Αφορά μετρήσεις θερμοκρασίας, ροής θερμότητας, θερμικής αγωγιμότητας και θερμικής ενέργειας γενικότερα.

2.5 Παραδείγματα και ανάλυση αισθητήριων στοιχείων, χρήσιμων κατά την ανίχνευση και πρόληψη δασικής πυρκαγιάς.

Αισθητήρες σειράς MQ

Οι αισθητήρες της σειράς MQ διαθέτουν έναν ενσωματωμένο μικροσκοπικό θερμαντήρα και έναν ηλεκτροχημικό αισθητήρα, ο οποίος ανιχνεύει διαφορετικά αέρια ή συνδυασμούς αυτών. Παρόλο που είναι δυνατή η βαθμονόμηση των αισθητήρων, η διαδικασία αυτή απαιτεί ακριβή γνώση της συγκέντρωσης του αερίου που μετρείται. Για βιομηχανική χρήση, οι βαθμονομήσεις πραγματοποιούνται σε εξειδικευμένα μετρολογικά εργαστήρια, χρησιμοποιώντας εξοπλισμό υψηλής ακρίβειας και ειδικές δοκιμές.

Το ευαίσθητο υλικό που χρησιμοποιείται σε όλους τους αισθητήρες MQ είναι το διοξείδιο του κασσιτέρου (SnO_2). Εφόσον προέρχονται από την ίδια κατασκευάστρια εταιρεία και έχουν κοινό σχεδιασμό, παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά λειτουργίας.

MQ-4

Ο αισθητήρας MQ-4 παρουσιάζει αύξηση στην αγωγιμότητά του καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση ενός εύφλεκτου αερίου, όπως το μεθάνιο. Αυτή η μεταβολή μπορεί να μετατραπεί σε σήμα εξόδου που αντιστοιχεί στη συγκέντρωση του αερίου, μέσω ενός απλού ηλεκτρονικού κυκλώματος. Ο MQ-4 διαθέτει υψηλή ευαισθησία στο μεθάνιο, αλλά μπορεί επίσης να ανιχνεύσει αλκοόλη και άλλα παρόμοια αέρια [6].



Εικόνα 3 - Αισθητήριο στοιχείο MQ-4

Technical Parameters			Stable.1
Model		MQ-4	
Sensor Type		Semiconductor	
Standard Encapsulation		Bakelite, Metal cap	
Target Gas		Methane	
Detection range		300~10000ppm(CH ₄)	
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V _c	≤24V DC
	Heater Voltage	V _H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R _L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R _H	26Ω±3Ω(room tem.)
	Heater consumption	P _H	≤950mW
	Sensitivity	S	R _s (in air)/R _s (in 5000ppmCH ₄)≥5
	Output Voltage	V _s	2.5V~4.0V (in 5000ppm CH ₄)
	Concentration Slope	α	≤0.6(R _{5000ppm} /R _{1000ppm} CH ₄)
Standard test conditions	Tem. Humidity	20°C±2°C; 55%±5%RH	
	Standard test circuit	V _c :5.0V±0.1V; V _H :5.0V±0.1V	
	Preheat time	Over 48 hours	

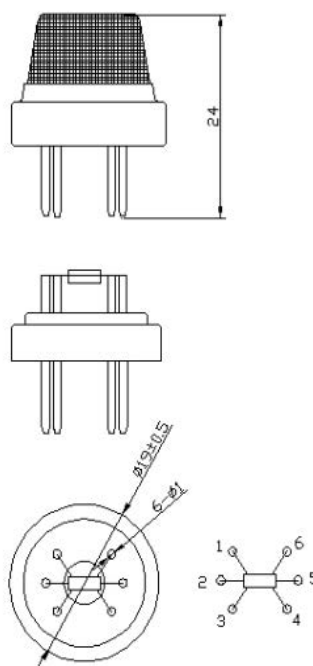


Fig1.Sensor Structure
Unit: mm

Εικόνα 4 - Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα MQ-4 [6]

Δομή και διαμόρφωση του αισθητήρα MQ-4

Ο αισθητήρας MQ-4 αποτελείται από μια σύνθετη κατασκευή, η οποία περιλαμβάνει έναν κεραμικό σωλήνα από micro-Al₂O₃, επάνω στον οποίο βρίσκεται το ευαίσθητο στρώμα από διοξείδιο του κασσίτερου (SnO₂). Το σύστημα ολοκληρώνεται με ένα ηλεκτρόδιο μέτρησης και έναν θερμαντήρα, τα οποία είναι τοποθετημένα μέσα σε ένα περίβλημα από πλαστικό υλικό, καλυμμένο με πλέγμα από ανοξείδωτο χάλυβα για προστασία και διατήρηση των συνθηκών λειτουργίας.

Ο θερμαντήρας παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς εξασφαλίζει τη θερμική ενέργεια που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία του ευαίσθητου υλικού, προκειμένου να ανιχνεύσει αποτελεσματικά την παρουσία συγκεκριμένων αερίων.

Το περίβλημα του MQ-4 διαθέτει έξι ακροδέκτες (pins): οι τέσσερις εξ αυτών χρησιμοποιούνται για την ανάγνωση του σήματος εξόδου, ενώ οι δύο υπόλοιποι εξυπηρετούν την τροφοδοσία του θερμαντικού στοιχείου [6].

Αισθητήρας MQ-8

Ο αισθητήρας MQ-8 είναι σχεδιασμένος για την ανίχνευση αερίου υδρογόνου (H_2), εμφανίζοντας αυξημένη αγωγιμότητα καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του συγκεκριμένου αερίου στον περιβάλλοντα χώρο. Η μεταβολή αυτή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μπορεί να μετατραπεί, μέσω ενός απλού ηλεκτρονικού κυκλώματος, σε αναλογικό σήμα εξόδου το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό της συγκέντρωσης του ανιχνευόμενου αερίου.

Ο MQ-8 χαρακτηρίζεται από υψηλή ευαισθησία στο υδρογόνο και επιδεικνύει καλή απόκριση σε περιβάλλοντα με παρεμβολές από άλλα αέρια, προσφέροντας έτσι αξιόπιστες μετρήσεις [7]. Λόγω του χαμηλού κόστους και της απλής αρχιτεκτονικής του, ο αισθητήρας αυτός είναι ιδανικός για πληθώρα εφαρμογών, όπως συστήματα ασφαλείας, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, φορητές συσκευές ανίχνευσης διαρροών και έξυπνα δίκτυα αισθητήρων.



Εικόνα 5 - Αισθητήριο στοιχείο MQ-8

Technical Parameters

Stable.1

Model			MQ-8
Sensor Type			Semiconductor
Standard Encapsulation			Bakelite, Metal cap
Target Gas			Hydrogen
Detection range			100~1000ppm(H ₂ gas)
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V _c	≤24V DC
	Heater Voltage	V _H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R _L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R _H	29Ω±3Ω(room tem.)
	Heater consumption	P _H	≤900mW
	Sensitivity	S	R _s (in air)/R _s (in 1000ppm H ₂)≥5
	Output Voltage	V _s	2.5V~4.0V (in 1000ppm H ₂)
Standard test conditions	Concentration Slope	α	≤0.6(R _{1000ppm} /R _{400ppm} H ₂)
	Tem. Humidity		20°C±2°C; 55%±5%RH
	Standard test circuit		V _c :5.0V±0.1V; V _H :5.0V±0.1V
	Preheat time		Over 48 hours

NOTE: Output voltage (V_s) is V_s in test environment

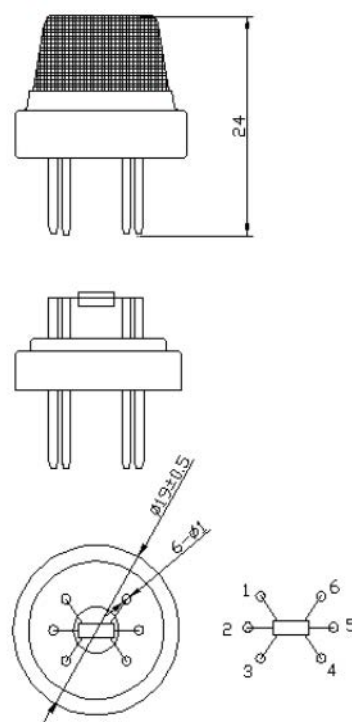


Fig1. Sensor Structure

Εικόνα 6 - Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα MQ-8 [7]

Η αρχιτεκτονική του αισθητήρα MQ-8 βασίζεται σε έναν μικρού μεγέθους κεραμικό σωλήνα (micro AL₂O₃), ο οποίος επικαλύπτεται από ένα ευαίσθητο υλικό διοξειδίου του κασσίτερου (SnO₂). Μαζί με το ηλεκτρόδιο μέτρησης και ένα θερμαντικό στοιχείο, συνθέτουν τον πυρήνα λειτουργίας του αισθητήρα. Το θερμαντικό στοιχείο εξασφαλίζει τις κατάλληλες θερμικές συνθήκες ώστε να ενεργοποιούνται οι αντιδράσεις ανίχνευσης.

Το περίβλημα του MQ-8 διαθέτει έξι ακίδες σύνδεσης: τέσσερις από αυτές προορίζονται για τη λήψη των σημάτων εξόδου, ενώ οι υπόλοιπες δύο εξυπηρετούν την παροχή ρεύματος στον θερμαντήρα.

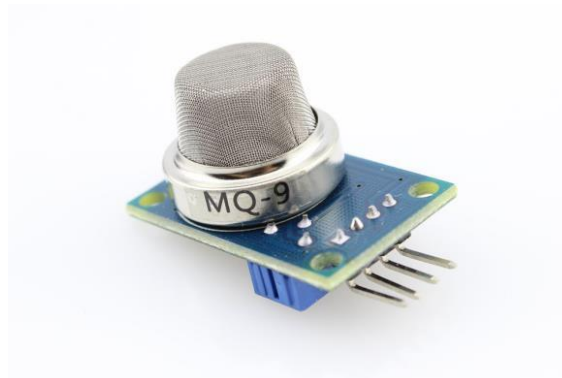
Αισθητήρας MQ-9

Ο αισθητήρας MQ-9 έχει σχεδιαστεί για την ανίχνευση μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και εύφλεκτων αερίων, όπως το μεθάνιο (CH₄) και το προπάνιο (C₃H₈), αξιοποιώντας μια έξυπνη εναλλαγή θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία του [8]. Σε συνθήκες χαμηλής θέρμανσης (περίπου 1,5 V), παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία στο μονοξείδιο του άνθρακα, ενώ όταν η θερμοκρασία ανεβαίνει (περίπου 5 V), γίνεται πιο αποτελεσματικός στην ανίχνευση εύφλεκτων αερίων και παράλληλα απομακρύνει τυχόν κατάλοιπα αερίων που είχαν προσροφηθεί σε προηγούμενα στάδια λειτουργίας.

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ευαίσθητου υλικού (SnO₂) όταν έρχεται σε επαφή με τα υπό ανίχνευση αέρια. Αυτή η

μεταβολή μετατρέπεται σε αναγνώσιμο σήμα εξόδου μέσω ενός απλού ηλεκτρονικού κυκλώματος, επιτρέποντας την εκτίμηση της συγκέντρωσης του αερίου στο περιβάλλον.

Ο MQ-9 αποτελεί μια οικονομική αλλά αξιόπιστη λύση για εφαρμογές ανίχνευσης σε βιομηχανικά ή οικιακά περιβάλλοντα, με δυνατότητα χρήσης σε συστήματα ασφαλείας, αισθητήρες διαρροών ή έξυπνα συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης.



Εικόνα 7 - Αισθητήριο στοιχείο MQ-9

Model No.			MQ-9
Sensor Type			Semiconductor
Standard Encapsulation			Bakelite
Detection Gas			CO and combustible gas
Concentration			10-1000ppm CO 100-10000ppm combustible gas
Circuit	Loop Voltage	V_c	$\leq 10V$ DC
	Heater Voltage	V_H	5.0V $\pm$ 0.2V AC or DC (High) 1.5V $\pm$ 0.1V AC or DC (Low)
	Heater Time	T_L	60 $\pm$ 1S (High) 90 $\pm$ 1S (Low)
	Load Resistance	R_L	Adjustable
Character	Heater Resistance	R_H	31 Ω $\pm$ 3 Ω (Room Tem.)
	Heater consumption	P_H	$\leq 350mW$
	Sensing Resistance	R_s	2K Ω -20K Ω (in 100ppm CO)
	Sensitivity	S	$R_s(\text{in air})/R_s(100ppm CO) \geq 5$
	Slope	α	$\leq 0.6(R_{300ppm}/R_{100ppm CO})$
Condition	Tem. Humidity		20 $^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$; 65% $\pm$ 5%RH
	Standard test circuit		$V_c: 5.0V \pm 0.1V$; V_H (High) : 5.0V $\pm$ 0.1V; V_H (Low) : 1.5V $\pm$ 0.1V
	Preheat time		Over 48 hours

Εικόνα 8 - Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα MQ-9 [8]

Η αρχιτεκτονική του αισθητήρα αποτελείται από κεραμικό σωλήνα micro AL₂O₃, ευαίσθητο στρώμα διοξειδίου κασσίτερου (SnO₂), ηλεκτρόδιο μέτρησης και θερμαντήρα στερεώνονται σε κρούστα από πλαστικό και ανοξείδωτο δίχτυ.

Ο θερμαντήρας παρέχει τις απαραίτητες συνθήκες εργασίας για την εργασία ευαίσθητων εξαρτημάτων. Το περίβλημα MQ-9 έχει 6 ακίδες, 4 από αυτά χρησιμοποιούνται για τη λήψη σημάτων και άλλα 2 χρησιμοποιούνται για την παροχή ρεύματος θέρμανσης.

Αισθητήρας DHT-22

Ο αισθητήρας DHT-22 είναι σχεδιασμένος για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, αξιοποιώντας ψηφιακή τεχνολογία συλλογής σημάτων και προηγμένες μεθόδους ανίχνευσης. Η αρχιτεκτονική του περιλαμβάνει

ενσωματωμένο μικροελεγκτή 8-bit, ο οποίος επιτρέπει την άμεση επεξεργασία και μεταφορά των μετρούμενων δεδομένων.

Κάθε μονάδα DHT-22 υποβάλλεται σε εργοστασιακή βαθμονόμηση σε περιβάλλον υψηλής ακρίβειας, ενώ οι συντελεστές διόρθωσης αποθηκεύονται στη μνήμη τύπου OTP (One-Time Programmable), εξασφαλίζοντας ότι οι μετρήσεις είναι σταθερές και θερμοκρασιακά αντισταθμισμένες κατά τη λειτουργία.

Ο αισθητήρας ξεχωρίζει για τον μικρό του όγκο, τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και τη δυνατότητα αποστολής δεδομένων σε απόσταση έως και 20 μέτρων, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για πλήθος εφαρμογών, από συστήματα παρακολούθησης περιβάλλοντος έως ενσωματωμένες λύσεις αυτοματισμού σε έξυπνα κτίρια [9].



Εικόνα 9 - Αισθητήριο στοιχείο DHT-22

Technical Specification:

Model	DHT22
Power supply	3.3-6V DC
Output signal	digital signal via single-bus
Sensing element	Polymer capacitor
Operating range	humidity 0-100%RH; temperature -40~80Celsius
Accuracy	humidity +2%RH(Max +5%RH); temperature <+0.5Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH; temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +-1%RH; temperature +-0.2Celsius
Humidity hysteresis	+0.3%RH
Long-term Stability	+0.5%RH/year
Sensing period	Average: 2s
Interchangeability	fully interchangeable
Dimensions	small size 14*18*5.5mm; big size 22*28*5mm

Εικόνα 10 - Τεχνικά χαρακτηριστικά DHT-22 [9]

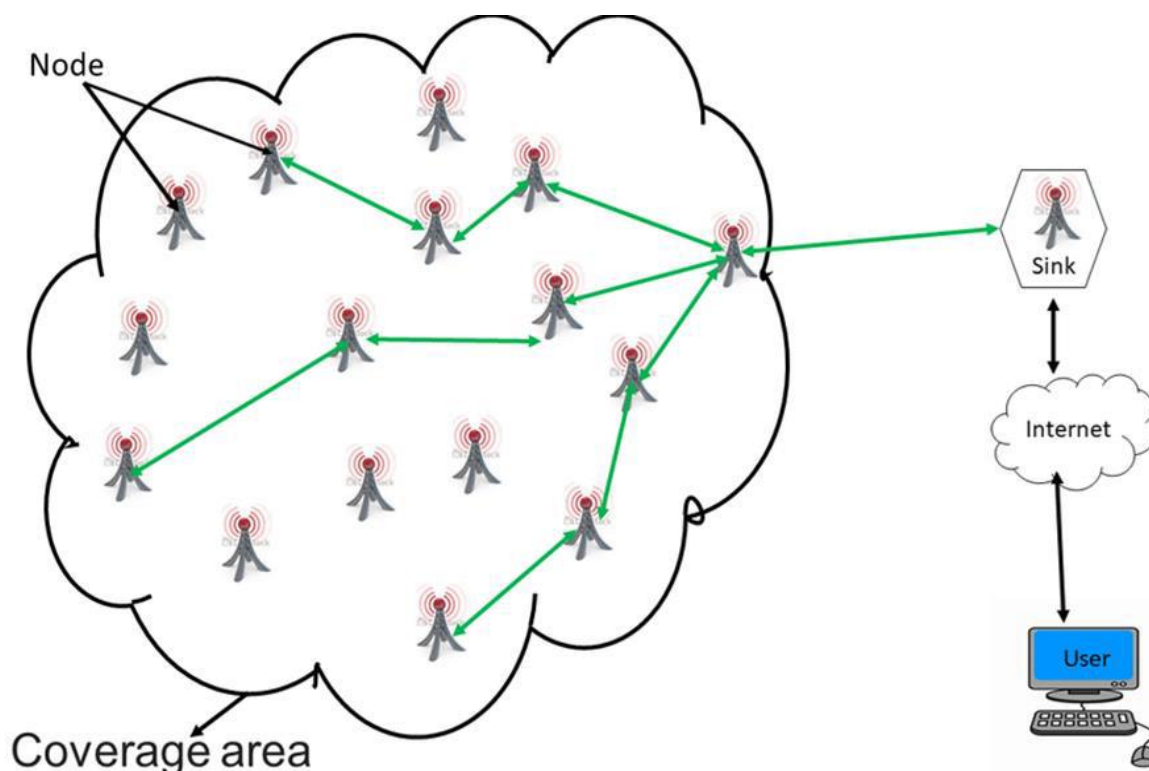
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSN Networks)

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) αποτελείται από έναν αριθμό κόμβων, οι οποίοι είναι ενεργειακά αυτόνομοι και εξοπλισμένοι με αισθητήρες που καταγράφουν φυσικά μεγέθη, όπως θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, κίνηση, ήχο ή εικόνα [10]. Οι κόμβοι αυτοί επεξεργάζονται ή/και μεταδίδουν τις μετρήσεις τους προς έναν σταθμό βάσης, ο οποίος λειτουργεί ως κεντρικός συλλέκτης δεδομένων.

Η επικοινωνία στους κόμβους είναι αμφίδρομη, γεγονός που σημαίνει ότι μπορούν όχι μόνο να αποστέλλουν αλλά και να λαμβάνουν δεδομένα από τον σταθμό βάσης. Ένα WSN μπορεί να αποτελείται από μερικούς έως και χιλιάδες κόμβους, με τον κάθε κόμβο να συνδέεται με έναν ή περισσότερους αισθητήρες.

Το μέγεθος ενός αισθητήρα μπορεί να ποικίλει σημαντικά —από εξαιρετικά μικροσκοπικό (σε μέγεθος κόκκου άμμου) μέχρι μεγαλύτερες διατάξεις (όπως το μέγεθος ενός κουτιού παπουτσιών). Η τιμή τους επίσης διαφέρει, ανάλογα με την πολυπλοκότητα και τη λειτουργικότητά τους.

Αυτά τα δίκτυα έχουν ιδιαίτερη σημασία για την πληροφορική, τις τηλεπικοινωνίες και διάφορους άλλους ερευνητικούς και επιστημονικούς τομείς.



Εικόνα 11 - Αναπαράσταση ενός WSN δικτύου

Ιστορική Αναδρομή και Στρατιωτική Χρήση

Η χρήση αισθητήρων σε δικτυακά περιβάλλοντα έχει τις ρίζες της σε στρατιωτικές εφαρμογές. Κατά την περίοδο του Ψυχρού Πολέμου, αναπτύχθηκε το SOSUS (Sound Surveillance System), ένα δίκτυο ακουστικών αισθητήρων (υδροφώνων) τοποθετημένων σε ωκεάνιες περιοχές του Ατλαντικού και του Ειρηνικού, με σκοπό την ανίχνευση σοβιετικών υποβρυχίων. Αν και το σύστημα λειτουργεί μέχρι σήμερα, έχει αποκτήσει ειρηνικό χαρακτήρα, συμβάλλοντας στην παρακολούθηση θαλάσσιας ζωής, σεισμών και ηφαιστειακής δραστηριότητας.

Στο πλαίσιο της εξέλιξης των επικοινωνιών, το Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET), πρόδρομος του σημερινού διαδικτύου, ιδρύθηκε το 1969 από τη DARPA (US Defense Advanced Research Projects Agency), με στόχο τη διασύνδεση πανεπιστημίων και ερευνητικών ιδρυμάτων για την ανάπτυξη και δοκιμή νέων τεχνολογιών.

Τα Ad-Hoc δίκτυα παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 1968 στη Χαβάη με την ανάπτυξη του ALOHA project, που στόχευε στη διασύνδεση πανεπιστημιακών εγκαταστάσεων. Η τεχνολογία των καταμεμημένων αισθητηριακών δικτύων (DSN) ξεκίνησε επίσημα τη δεκαετία του 1980 από τη DARPA, αποτελώντας το θεμέλιο για τα σημερινά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

3.1 Χαρακτηριστικά ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων τροφοδοτούνται με μπαταρίες, των οποίων η διάρκεια ζωής είναι περιορισμένη. Όταν εξαντληθούν, η λειτουργία του δικτύου παύει να είναι αποτελεσματική ή ακόμη και πλήρως λειτουργική. Συνεπώς, η ενεργειακή απόδοση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα σχεδίασης. Σε αρκετές εφαρμογές χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, όμως η χρησιμότητά τους εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την τοποθεσία εγκατάστασης. Για παράδειγμα, ένα υποθαλάσσιο δίκτυο σε μεγάλο βάθος δεν μπορεί να βασιστεί στην ηλιακή ενέργεια για τη λειτουργία του [10].

Αυτόνομη και προγραμματιζόμενη λειτουργία: Κάθε κόμβος πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί αυτόνομα, γνωρίζοντας ποιες μετρήσεις να εκτελεί, πότε να τις πραγματοποιεί (συχνότητα δειγματοληψίας) και πού να αποστέλλει τα δεδομένα (π.χ., μέσω broadcast). Παράλληλα, το δίκτυο θα πρέπει να υποστηρίζει δυναμικό επαναπρογραμματισμό, ώστε να μπορεί να τροποποιεί τις παραμέτρους λειτουργίας του όταν λαμβάνει νέες οδηγίες από τον σταθμό βάσης.

Προσαρμοστικότητα: Ένα βασικό πλεονέκτημα των WSNs είναι η ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Σε περίπτωση αποτυχίας κάποιων κόμβων, το δίκτυο έχει τη δυνατότητα να ανακατευθύνει την επικοινωνία μέσω εναλλακτικών διαδρομών (paths), διατηρώντας τη συνοχή και τη λειτουργικότητά του.

Απλότητα σχεδιασμού: Λόγω των περιορισμένων υπολογιστικών και ενεργειακών δυνατοτήτων των κόμβων, απαιτείται η ανάπτυξη απλών και αποδοτικών αλγορίθμων, τόσο για την επεξεργασία δεδομένων όσο και για την επικοινωνία. Η απλοποίηση των λειτουργιών συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των επιδόσεων και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Απόδοση και αξιοπιστία: Οι κόμβοι επιδιώκουν τη μείωση των επανεκπομπών πακέτων λόγω λαθών μετάδοσης, ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος. Αυτή η στρατηγική, ωστόσο, ενδέχεται να επηρεάσει αρνητικά την ταχύτητα μεταφοράς των δεδομένων.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά περιγράφουν τις γενικές ιδιότητες των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, ωστόσο η σημασία καθενός εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Για παράδειγμα, σε ορισμένα σενάρια μπορεί να δίνεται προτεραιότητα στην ακρίβεια ή την ταχύτητα έναντι της εξοικονόμησης ενέργειας ή του κόστους υλοποίησης.

3.2 Δομικά στοιχεία Αισθητήριων κόμβων

Η αρχιτεκτονική των κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Ωστόσο, τα βασικά δομικά τους στοιχεία παραμένουν κοινά σε όλες τις περιπτώσεις. Κάθε κόμβος συνήθως περιλαμβάνει τα εξής υποσυστήματα:

- **Μικροελεγκτής (Microcontroller)**

Ο μικροελεγκτής αποτελεί την «καρδιά» του κόμβου, καθώς είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο, τη διαχείριση και την εκτέλεση όλων των λειτουργιών. Μέσω αυτού επιτυγχάνεται η επεξεργασία, η αποστολή και η λήψη δεδομένων. Σε ορισμένες εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιούνται πιο ισχυρές μονάδες, όπως FPGA, DSP ή ASIC, ιδιαίτερα όταν απαιτείται υψηλή υπολογιστική ισχύς. Ωστόσο, αυτές οι επιλογές δεν ενδείκνυνται σε περιπτώσεις που προτεραιότητα έχει η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, το μειωμένο κόστος, η ευκολία προγραμματισμού και η συμβατότητα με συστήματα περιορισμένων πόρων.

- **Μνήμη (Memory)**

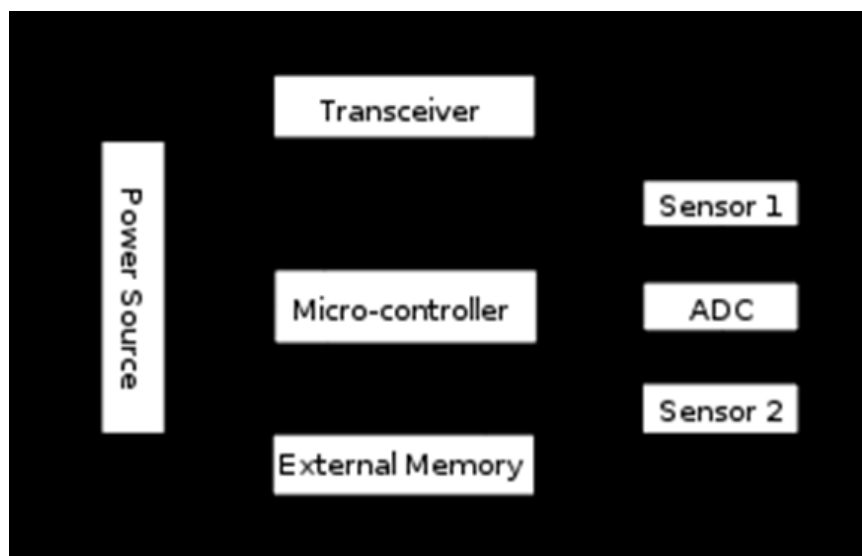
Η αποθήκευση δεδομένων υλοποιείται συνήθως με τη χρήση ενσωματωμένης μνήμης flash στον μικροελεγκτή ή εξωτερικής flash μνήμης, προκειμένου να διατηρείται η κατανάλωση ενέργειας σε χαμηλά επίπεδα. Σε πιο εξελιγμένες υλοποιήσεις μπορεί να γίνεται χρήση εξωτερικών συστημάτων αποθήκευσης, όπως data loggers ή διαδικτυακές βάσεις δεδομένων.

- **Πομπός, Δέκτης και Κεραία (Transceiver)**

Το υποσύστημα επικοινωνίας περιλαμβάνει έναν πομπό, έναν δέκτη και κεραία για τη μετάδοση και λήψη σημάτων, τόσο μεταξύ των κόμβων όσο και με τον σταθμό βάσης. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν ραδιοσυχνότητες (RF), υπέρυθρη ακτινοβολία (IR) και οπτική επικοινωνία (laser). Η επικρατέστερη τεχνολογία είναι η RF, καθώς οι υπόλοιπες παρουσιάζουν περιορισμούς όπως ανάγκη για οπτική επαφή, εξάρτηση από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και περιορισμένη ικανότητα για εκπομπή σήματος (broadcast).

- **Πηγή Ενέργειας (Power Supply)**

Η ενεργειακή αυτονομία των κόμβων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην αξιοπιστία και μακροχρόνια λειτουργία του δικτύου. Οι κόμβοι τροφοδοτούνται συνήθως με μπαταρίες, ενώ σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά πάνελ. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων, καθώς σε εκείνο το στάδιο ο μικροελεγκτής εκτελεί μεγάλο αριθμό εντολών σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 12 - Ενδεικτικό σχήμα λειτουργικών στοιχείων ενός κόμβου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Παρουσίαση του προσομοιωτή WSN - CupCarbon

4.1 Περίληψη λειτουργιών του προσομοιωτή CupCarbon

Το CupCarbon αποτελεί μια προηγμένη πλατφόρμα προσομοίωσης για δίκτυα αισθητήρων σε περιβάλλον Έξυπνων Πόλεων (Smart Cities) και εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) [11]. Υποστηρίζει τη σχεδίαση, την οπτικοποίηση, τον εντοπισμό σφαλμάτων και την επικύρωση κατανεμημένων αλγορίθμων για συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης, ανίχνευσης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης (όπως πυρκαγιές και διαρροές αερίων) και κινητών αντικειμένων [11]. Παράλληλα, χρησιμοποιείται ευρέως για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς.

Μέσω του CupCarbon, οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να κατανοήσουν με οπτικό τρόπο βασικές έννοιες λειτουργίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, καθώς και να πειραματιστούν με ασύρματες τοπολογίες, επικοινωνιακά πρωτόκολλα και σενάρια προσομοίωσης.

Το CupCarbon παρέχει δύο διακριτά περιβάλλοντα προσομοίωσης:

- **Περιβάλλον Σχεδιασμού Σεναρίων:**

Σε αυτό το περιβάλλον, ο χρήστης μπορεί να ορίσει σενάρια κινητικότητας (π.χ. οχήματα, UAV, ρομποτικά έντομα) καθώς και φυσικά συμβάντα, όπως πυρκαγιές ή εκπομπές αερίων. Ο σχεδιασμός γίνεται με τη βοήθεια χαρτογραφικών δεδομένων (OpenStreetMap), που επιτρέπουν την ανάπτυξη κόμβων απευθείας στον χάρτη.

- **Περιβάλλον Προσομοίωσης Συμβάντων:**

Αποτελεί προσομοίωση διακριτών γεγονότων σε επίπεδο εφαρμογής, όπου οι κόμβοι εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες βάσει του σεναρίου που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο στάδιο. Το CupCarbon επικεντρώνεται στο επίπεδο της εφαρμογής και όχι σε πλήρη προσομοίωση όλων των επιπέδων του δικτυακού πρωτοκόλλου, ώστε να διατηρείται απόδοση σε περίπλοκα αστικά περιβάλλοντα.

Κύρια Χαρακτηριστικά

- **SenScript:**

Το CupCarbon περιλαμβάνει ένα ενσωματωμένο περιβάλλον παραγωγής κώδικα, το SenScript, με το οποίο μπορεί να προγραμματιστεί και να διαμορφωθεί η συμπεριφορά κάθε κόμβου ξεχωριστά. Επιπλέον, προσφέρεται υποστήριξη για εξαγωγή κώδικα σε πραγματικές πλατφόρμες, όπως Arduino και XBee, αν και αυτή η λειτουργία βρίσκεται ακόμη υπό εξέλιξη.

- **Ρεαλιστική Προσομοίωση:**

Το σύστημα υποστηρίζει μοντέλα διάδοσης και παρεμβολών που περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως ZigBee, LoRa και Wi-Fi, προσφέροντας δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων σε πραγματικές συνθήκες. Ενσωματώνει επίσης αλγορίθμους δρομολόγησης και ενεργειακής διαχείρισης.

- **Διαχείριση Δικτύων:**

Παρέχεται η δυνατότητα δυναμικής διαμόρφωσης των κόμβων, επιτρέποντας στον χρήστη να δημιουργήσει, να συγχωνεύσει ή να διαχωρίσει υποδίκτυα, βάσει παραμέτρων όπως διευθύνσεις και κανάλια επικοινωνίας.

- **Ενεργειακή Ανάλυση:**

Η πλατφόρμα παρέχει εργαλεία για τον υπολογισμό και την απεικόνιση της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων ως συνάρτηση του χρόνου, προσφέροντας χρήσιμη πληροφόρηση για τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των σχεδιαζόμενων δικτύων πριν την υλοποίησή τους.

Το CupCarbon, χάρη στην εργονομική του διεπαφή, την υποστήριξη για ρεαλιστική προσομοίωση και τη δυνατότητα προγραμματισμού κόμβων σεναριακά και ενεργειακά, αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για ερευνητές, μηχανικούς και φοιτητές στον χώρο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των εφαρμογών έξυπνων πόλεων [11].

4.2 Παράμετροι Συσκευών (Device Parameters)

▼ Device Parameters

Script file		▶
GPS file		▶
Natural Evt. file		▶
Id		▶
Longitude		▶
Latitude		▶
Elevation		▶
Radius		▶
Sensor Radius		▶
Energy max		▶
Sensing Cons.		▶
UART D/Rate		▶
Drift (sigma)		▶
Sensing Unit		
Coverage	0.08000000000000003	▶
Direction	5.5999999999999998	▶

Εικόνα 13 - Παράμετροι συσκευών στο UI του CupCarbon

1. Script file: εκχώρηση του αρχείου κώδικα SenScript.
2. GPS file : εκχώρηση του αρχείου διαδρομής για κινητό στοιχείο.
3. Natural Event File: εκχώρηση αρχείου φυσικού συμβάντος.
4. Id: εκχώρηση αναγνωριστικού.
5. Longitude: εκχώρηση γεωγραφικού μήκους.
6. Latitude: εκχώρηση γεωγραφικού πλάτους.
7. Elevation: ορισμός υψόμετρου αισθητήρα.
8. Radius: εκχώρηση ακτίνας αισθητήρα (διαφορετική από την ακτίνα ραδιοσυχνότητας).
9. Sensor Radius: εκχώρηση ακτίνας για τη μονάδα ανίχνευσης του αισθητήρα.
10. Energy max: ορισμός αρχικής ενέργειας της μπαταρίας.
11. Sensing Cons: κατανάλωση ανίχνευσης σε μονάδες (δεν λαμβάνεται υπόψη σε αυτήν την έκδοση του CupCarbon).
12. UART Data rate: ο ρυθμός δεδομένων UART (universal asynchronous receiver-transmitter) που αντιπροσωπεύει τον απαραίτητο χρόνο για την αποστολή δεδομένων (bytes) στο buffer της μονάδας ραδιοσυχνότητας.
13. Drift (Sigma): ορισμός μετατόπισης ρολογιού.
14. Coverage: ορισμός της επιφάνειας κάλυψης της μονάδας ανίχνευσης (περίπτωση Directional αισθητήρα).
15. Direction: ορισμός της κατεύθυνσης (περιστροφής) μιας αισθητήριας μονάδας (περίπτωση Directional αισθητήρα).

4.3 Παράμετροι Ραδιοσυχνοτήτων (Radio Parameters)

Radio Parameters

Standard: 802.15.4

Radio Name: radio1

Buttons: Add, Remove, Current

Radio Module List

Network Id (NID)

MY, CH, PL, Radius, E_Tx, E_Rx, Sleeping Energy, Listening Energy, Data Rate, Spreading Factor, Code Rate

Consumption Model

Tx, Rx

Εικόνα 13 - Παράμετροι ραδιοσυχνοτήτων στο UI του CupCarbon

1. Standard: Το πρότυπο της μονάδας ραδιοσυχνότητας (ZigBee 802.15.4, Wifi και Lora).
2. Radio name: Το όνομα της μονάδας ραδιοσυχνότητας που θα προστεθεί στον αισθητήρα. Από προεπιλογή, το ZigBee (802.15.4) προστίθεται αυτόματα για κάθε αισθητήρα με το όνομα radio1. Η μονάδα ραδιοσυχνότητας μπορεί να αλλάξει αλλά και να αφαιρεθεί.
3. Add: προσθήκη κι άλλης μονάδας ραδιοσυχνότητας.
4. Remove: διαγραφή επιλεγμένης μονάδας ραδιοσυχνότητας.
5. Current: προσδιορισμός της τρέχουσας μονάδας ραδιοσυχνότητας, που χρησιμοποιείται από τον αισθητήρα. Αυτό το τμήμα χρησιμοποιείται από το SenScript κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η τρέχουσα μονάδα μπορεί να αλλάξει στο SenScript χρησιμοποιώντας την εντολή radio.
6. Radio Module List: η λίστα με τις προστιθέμενες μονάδες ραδιοσυχνότητας.
7. Network ID: το αναγνωριστικό δικτύου της επιλεγμένης μονάδας ραδιοσυχνότητας.
8. MY: το αναγνωριστικό της διεύθυνσης MY της επιλεγμένης μονάδας ραδιοσυχνότητας.
9. CH: κανάλι της επιλεγμένης μονάδας ραδιοσυχνότητας.
10. Radius: το εύρος ακτίνας της επιλεγμένης μονάδας ραδιοσυχνότητας. Στη λειτουργία διάδοσης (κάνοντας κλικ στο εικονίδιο της γραμμής κατάστασης) ενεργοποιείται, ενώ η ακτίνα υπολογίζεται αυτόματα ανάλογα με τη διάδοση του σήματος και το περιβάλλον.
11. E_Tx: η κατανάλωση ενέργειας αποστολής.
12. E_Rx: η κατανάλωση ενέργειας λήψης.
13. Sleeping Energy: κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια του sleeping (μη διαθέσιμη στην τρέχουσα έκδοση).
14. Listening Energy: κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια του listening (μη διαθέσιμη στην τρέχουσα έκδοση).
15. Data Rate: ο ρυθμός δεδομένων αποστολής/λήψης (προεπιλογή: 250kbit/s ή 2.4 GHz)
16. Spreading Factor: μόνο για LoRa
17. Consumption Model: μπορούμε να επιλέξουμε το μοντέλο της κατανάλωσης για αποστολή (Tx) και λήψη (Rx) για κάθε μονάδα ραδιοσυχνότητας.

Ενσωματώνονται δύο μοντέλα, το κλασικό και το μοντέλο του Heinzelman. Είναι δυνατό να γραφτεί ένα προσωπικό μοντέλο ως οποιαδήποτε εξίσωση με τις ακόλουθες προκαθορισμένες μεταβλητές στο CupCarbon Environment 27:

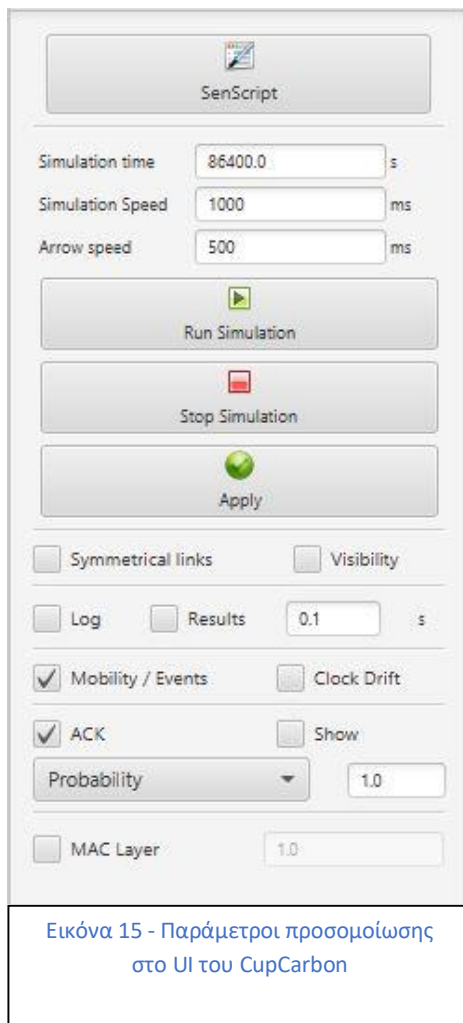
- **n** τον αριθμό των bit που εκπέμπονται/λαμβάνονται
- **r** η εμβέλεια της εκπομπής κατά τη διάρκεια της μετάδοσης
- **p** το ποσοστό της ισχύος της μετάδοσης (ίσο με 0 για 0% και 1 για 100%). Το οποίο είναι σταθερό στο πεδίο **PL** του ίδιου μενού και μπορεί να τροποποιηθεί δυναμικά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας την εντολή SenScript **atpl**.
- **t** η θερμοκρασία του καιρικού φαινομένου/ καιρού
- **etx** την κατανάλωση ενέργειας για κάθε απεσταλμένο bit. Διορθώνεται στο πεδίο **E_Tx** του ίδιου μενού.
- **erx** η κατανάλωση ενέργειας για κάθε λαμβανόμενο bit. Διορθώνεται στο πεδίο **E_Rx** του ίδιου μενού.

Το κλασικό μοντέλο μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$Tx = \frac{n}{8.0} \times etx \times p \quad (1)$$

$$Rx = \frac{n}{8.0} \times erx \quad (2)$$

4.4 Παράμετροι Προσομοίωσης (Simulation Parameters)



1. SenScript: άνοιγμα του SenScript window για τη δημιουργία κώδικα.
2. Simulation time: διάρκεια της προσομοίωσης.
3. Simulation Speed: η ταχύτητα της προσομοίωσης. Ο στόχος είναι η παρακολούθηση και η οπτικοποίηση της προσομοίωσης σε ταχύτητα αντιληπτή από τον άνθρωπο. Είναι χρήσιμη για τον εντοπισμό σφαλμάτων.
4. Arrow speed: ίδια λειτουργία με την παραπάνω, με τη μόνη διαφορά ότι σχετίζεται με την αποστολή/λήψη των μηνυμάτων σε μορφή βέλους, και επιτρέπει την οπτικοποίησή τους.
5. Run simulation: εκκίνηση της προσομοίωσης.
6. Stop Simulation: παύση της προσομοίωσης.
7. Symmetrical links: αυτή η επιλογή αναγκάζει τους συμμετρικούς συνδέσμους μεταξύ κόμβων αισθητήρων να ληφθούν υπ' όψιν στον χάρτη, τυπώνοντας στην περίπτωση ασύμμετρου συνδέσμου το μήνυμα: "αυτός ο σύνδεσμος δεν είναι συμμετρικός".
8. Visibility: επιτρέπει τον εκ νέου υπολογισμό της ορατότητας των κινητών κόμβων-αισθητήρων.
9. Log: δημιουργία του αρχείου καταγραφής της προσομοίωσης. (.csv)
10. Results: εάν ο στόχος της προσομοίωσης είναι η οπτικοποίηση τότε αυτή η επιλογή πρέπει να απενεργοποιηθεί. Διαφορετικά, πρέπει να ενεργοποιηθεί εάν θέλουμε να εμφανιστεί η κατανάλωση ενέργειας, η περίοδος της αποθήκευσης αποτελεσμάτων πρέπει να εισαχθεί σε δευτερόλεπτα στο δεξιό πεδίο.
11. Mobility/Events: αυτό το πλαίσιο πρέπει να ενεργοποιηθεί εάν στην προσομοίωση τα συμβάντα και η κινητικότητα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.
12. Clock Drift: ενεργοποιούμε εάν η μετατόπιση του ρολογιού πρέπει να ληφθεί υπόψη στην προσομοίωση.
13. ACK (type): ενεργοποιούμε εάν πρέπει να ληφθούν υπόψη τα μηνύματα ACK. Στη συνέχεια, προτείνονται 3 αλγόριθμοι για τον υπολογισμό των παρεμβολών. Ο πρώτος βασίζεται στο απλό υπολογισμό της πιθανότητας διέλευσης ή αποτυχίας αποστολής μηνυμάτων. Τα άλλα 2 βασίζονται σε υπολογισμό του Gaussian της άλφα-σταθερής κατανομής.
14. Show: εάν ενεργοποιηθεί, τα μηνύματα ACK θα εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
15. MAC Layer: ενεργοποίηση απλοποιημένης έκδοσης του επιπέδου MAC που βασίζεται σε πιθανολογική συμπεριφορά.

4.5 Εντολές SenScript και Χρήση

4.5.1 Εντολές SenScript για δυναμική αλλαγή μεταβλητών & τιμών

Με τη χρήση διαφόρων εντολών της ενσωματωμένης γλώσσας SenScript του προσομοιωτή CupCarbon μπορούμε να αλλάξουμε με δυναμικό τρόπο τιμές και μεταβλητές μέσα από τον κώδικα, οι οποίες σε άλλη περίπτωση είναι κατά προεπιλογή στατικές. Ακολουθεί μια λίστα με αυτές τις εντολές και σύντομο παράδειγμα των λειτουργιών τους.

atch

atch 12 → Change the channel of the current sensor to 12

atid

atid 1111 → Change the identifier of the sensor to 1111

atpl

atpl 60 → Change the signal power (power level) of the radio of the sensor. In this example, the sensor will use only 60% of its radio range.

atmy

atmy 4 → Change the MY of the sensor to 4.

atnid

atnid 2222 → Change the network address.

atget

atget id x

atget my x → x = id, my or ch of the sensor node

atget ch x

battery

battery x → x = the level of the battery in Joules

battery set x → The level of the battery will be set to x

buffer

buffer x → x = the size of the buffer in bits

drssi

drssi x → x = the rssi value transformed to a Euclidean distance between the current sensor and the last sending sensor node.

kill

kill 0.3 → the current node will be killed (i.e., with empty battery) with a probability of 30%

move

move x y z t → The sensor node will go to the position latitude (x), longitude (y), and elevation (z) with the speed t meters/second.

radio

radio [name of a radio module] - radio radio2 → Select the radio module having the name radio2. This means that any send command that will be used after this instruction will consider the radio2 as the radio module which will send the message. The considered standard is the one of the considered radio module

rotate

rotate x t → Rotate with x (double) units the Directional sensor node. The next instruction of the script will be executed after t milliseconds.

route

route route1 → The sensor node will change its route to route having the name route1 after intersecting with it.

simulation

simulation 50 200 → just for the visualization and it is not considered in the simulation process. It allows you to change the simulation speed during the simulation process.

simulation speed 50 → Simulation Speed

simulation aspeed 200 → Arrow Speed

time

time x → assign to x the current simulation time

4.5.2 Εντολές SenScript & τρόποι δημιουργίας custom functions

Ο προσομοιωτής CupCarbon επιτρέπει τη δημιουργία custom συναρτήσεων, οι οποίες όμως πρέπει να δημιουργηθούν στον πηγαίο κώδικα του προγράμματος [11].

Ακολουθεί παράδειγμα για την εκτέλεση μιας υποτιθέμενης function μέσα στη γραφική διεπαφή του προσομοιωτή καλούμενη από το αρχείο SenScript, αλλά και ο τρόπος δημιουργίας της μέσα στον πηγαίο κώδικα:

function (The function command can be used only with the source code of CupCarbon.)

function x myf 1,2,v → execute the function myf with the arguments 1, 2 and the value of v. The obtained result is returned in x.

To create your own function (example: myf(args)):

1. Add the following script in the method function of the class ScriptFunction (package script_functions):

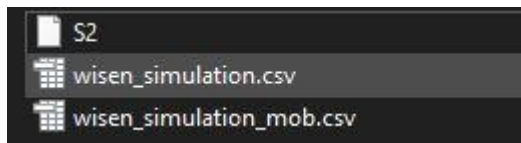
```
if(function.equals("myf")) {  
    return Function_Calc.myf(args);  
}
```

2. Add the method myf the class Functions as follows:

```
public static String myf(String [] args) {  
    String valToReturn = "";  
    // TODO  
    // Your program here  
    return valToReturn;  
}
```

4.5.3 Εντολές SenScript για την εξαγωγή αρχείων & τιμών

Ο προσομοιωτής CupCarbon κατά προεπιλογή εξάγει ένα αρχείο .csv με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στον υποφάκελο results του εκάστοτε project. Υπάρχει και η δυνατότητα εξαγωγής αρχείου με επιθυμητά αποτελέσματα-τιμές ανά αισθητήρα ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας την εντολή **printfile** στο SenScript που του έχουμε αναθέσει.



Εικόνα 16 - Παραγόμενα αρχεία εξαγωγής του CupCarbon

printfile

printfile "hello" → add the string "hello" in a file generated during the simulation in the directory results with the name of the sensor node

cprint

cprint "hello" x → The same function as print where the result (hello and the value of x) is displayed in the console

4.5.4 Εξαγόμενα αρχεία & αποτελέσματα - CupCarbon

Έπειτα από κάθε προσομοίωση, το εργαλείο CupCarbon εξάγει ένα αρχείο .csv το οποίο περιέχει τα εξής:

- **1η στήλη:** Περιέχει το χρόνο προσομοίωσης που επιλέξαμε να αποτυπώνουμε αποτελέσματα (π.χ. επιλέγουμε να εξάγονται αποτελέσματα κάθε 1 sec)
- **2η ως N-ωστή στήλη:** Περιέχει τα αρχικά επίπεδα μπαταρίας ανά αισθητήρα και με το πέρασ του χρόνου αποτυπώνει τη διαφορά σε κάθε γραμμή.

	Standard	Standard	Standard	Standard
1	Time	(Sec)	S1	S10
2	0.0	19160.0	19160.0	19160.0
3	1.0755559999999997	19159.952308799995	19159.9301992	19159.978721600
4	2.0755559999999997	19159.916386399993	19159.8603984	19159.964536000
5	3.0755559999999999	19159.880463999999	19159.814728799996	19159.950350400
6	4.0755559999999998	19159.844541599999	19159.780956799994	19159.950350400
7	5.0755559999999995	19159.808619199986	19159.735287199999	19159.943257600

Εικόνα 17 - Απεικόνιση παραγόμενου αρχείου .csv του CupCarbon

Με τη χρήση της εντολής **printfile** μέσα στο script κάποιου επιλεγμένου στοιχείου στο δίκτυο μας, ο προσομοιωτής μας προσφέρει την ικανότητα εξαγωγής ενός αρχείου, αποθηκευμένο με το όνομα του στοιχείου, το οποίο περιέχει τα δεδομένα που επιλέξαμε να τυπώσουμε. Αυτά τα δεδομένα μπορεί να είναι φερ ειπείν:

- Συντεταγμένες ανά δευτερόλεπτο σε περίπτωση που είναι κινητό το στοιχείο μας.
- τιμές που διάβασε από το περιβάλλον σε τακτά χρονικά διαστήματα.
- Καταμέτρηση επιτυχώς ληφθέντων πακέτων.
- μηνύματα που έλαβε από άλλα στοιχεία και το περιεχόμενό τους.
- κ.α.

S112	28/5/2022 6:33 μμ	File	2 KB
S113	28/5/2022 6:38 μμ	File	3 KB
S114	28/5/2022 6:45 μμ	File	4 KB
wisen_simulation.csv	28/5/2022 6:45 μμ	Λογιστικό φύλλο ...	14 KB

Εικόνα 18 - Απεικόνιση παραγόμενου αρχείου του CupCarbon

```

1 |!TIME: 0.1559053333333337 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
2 |!TIME: 0.2559053333333334 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
3 |!TIME: 0.3559053333333335 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
4 |!TIME: 1.1559053333333333 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
5 |!TIME: 1.2559053333333333 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
6 |!TIME: 2.231939999999999 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
7 |!TIME: 2.331939999999999 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
8 |!TIME: 4.231939999999995 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
9 |!TIME: 5.155905333333328 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
10 |!TIME: 5.255905333333328 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
11 |!TIME: 5.355905333333329 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
12 |!TIME: 7.331939999999989 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
13 |!TIME: 8.155905333333322 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
14 |!TIME: 8.255905333333324 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125
15 |!TIME: 9.231939999999994 LONGITUDE: 0.0 LATITUDE: -2.2473907470703125

```

Εικόνα 17 - Απεικόνιση περιεχομένων παραγόμενου αρχείου του CupCarbon

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Τοπολογίες Δικτύων WSN, Τεχνολογίες & Εγκατάσταση

5.1 Τοπολογίες Βασισμένες σε συμπλέγματα (Cluster Based Topologies)

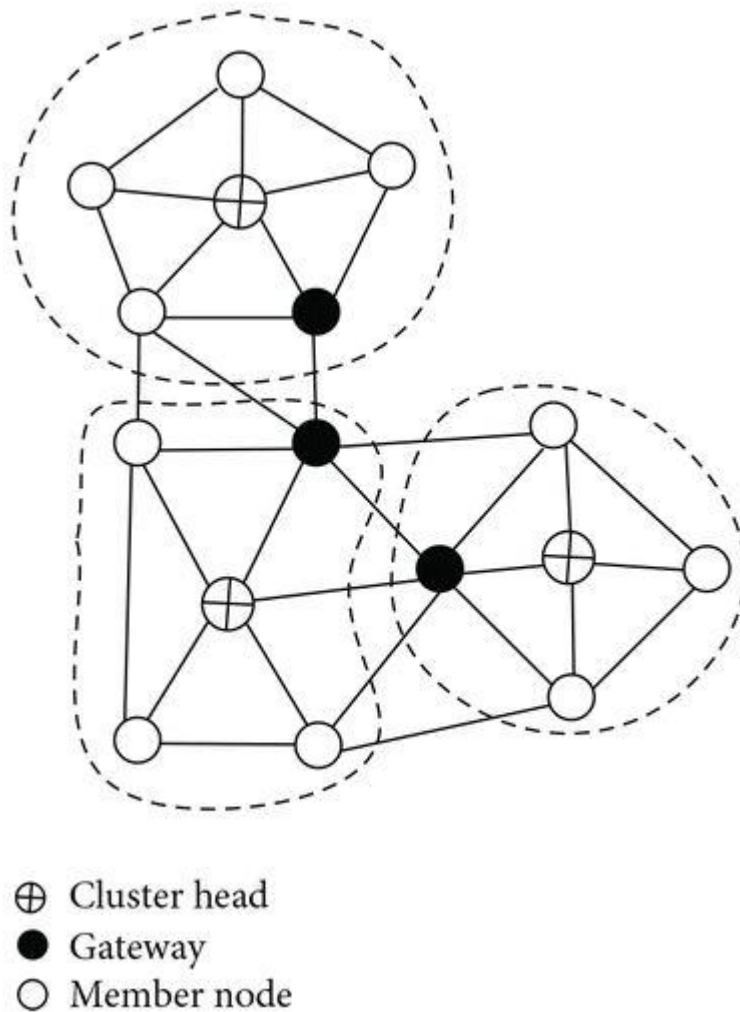
5.1.1 Σύνοψη Τοπολογιών βασισμένων σε Συμπλέγματα

Η απόδοση ενός «επίπεδου» (flat) ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να μειωθεί σημαντικά όταν μεγαλώνει το μέγεθός του. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων, τόσο αυξάνονται και τα δεδομένα ελέγχου (control overhead), τα οποία επιβαρύνουν συνολικά τη λειτουργία του δικτύου. Η αύξηση της επιβάρυνσης αυτής επηρεάζει την αποδοτικότητα και μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα στην επικοινωνία και τη διαχείριση των δεδομένων.

Μια από τις πιο μελετημένες λύσεις για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση είναι η τεχνική της ομαδοποίησης (clustering) [12], με σκοπό να περιοριστεί η κλίμακα ενός μεγάλου δικτύου αισθητήρων και να γίνει η λειτουργία του πιο αποδοτική. Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο δεν λειτουργεί ως ενιαίο επίπεδο, αλλά οργανώνεται σε λογικές ομάδες (συμπλέγματα) ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής ή τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χώρου ανάπτυξης.

Τα WSNs που εφαρμόζουν ομαδοποίηση θεωρούνται πιο ενεργειακά αποδοτικά και μπορούν να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής του συστήματος συνολικά. Η ομαδοποίηση συνιστά μια ιεραρχική προσέγγιση στη δομή του δικτύου, σε αντίθεση με το επίπεδο μοντέλο. Μέσα από αυτή τη δομή, κάθε σύμπλεγμα μπορεί να διαχειρίζεται τοπικά τις λειτουργίες του, μειώνοντας τον φόρτο στο κεντρικό σύστημα ή στο σταθμό βάσης.

Η βιβλιογραφία [12] δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη αποτελεσματικών και προσαρμόσιμων μεθόδων ομαδοποίησης, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε σεναρίου. Συνήθως, σε ένα WSN με αρχιτεκτονική συμπλεγμάτων, το δίκτυο χωρίζεται σε εικονικές υποομάδες με τρόπο που να υποστηρίζεται καλύτερα η συλλογή, η επεξεργασία και η αποστολή των δεδομένων, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 18 - Απεικόνιση WSN με αρχιτεκτονική συμπλεγμάτων [12]

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που οργανώνεται με βάση την τεχνική της ομαδοποίησης (clustering). Σε αυτό, το δίκτυο χωρίζεται λογικά σε επιμέρους ομάδες (συστάδες ή συμπλέγματα), οι οποίες διακρίνονται με διακεκομμένες γραμμές [12].

Μέσα σε μια τέτοια δομή, διακρίνουμε τρεις βασικούς τύπους κόμβων:

- **Κόμβος-επικεφαλής συστάδας (Cluster Head – CH)**

Ο ρόλος του είναι κομβικός καθώς λειτουργεί ως τοπικός διαχειριστής. Συλλέγει δεδομένα από τα μέλη της συστάδας του και τα προωθεί προς τον σταθμό βάσης ή σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο.

- **Κόμβοι-μέλη (Member Nodes – MN)**

Αποτελούν τους απλούς αισθητήρες που πραγματοποιούν μετρήσεις και αποστέλλουν τις πληροφορίες τους στον επικεφαλής της συστάδας στην οποία ανήκουν.

- **Κόμβοι πύλης (Gateway Nodes – GW)**

Εμφανίζονται σε σημεία του δικτύου όπου δύο ή περισσότερες συστάδες συνορεύουν. Οι πύλες αναλαμβάνουν τη σύνδεση μεταξύ διαφορετικών συστάδων, επιτρέποντας την επικοινωνία και τη δρομολόγηση μεταξύ τους.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της παρουσίας πύλης είναι η δημιουργία μιας σταθερής διαδρομής επικοινωνίας μεταξύ των συστάδων. Η διαδρομή αυτή λειτουργεί σαν **ραχοκοκαλιά (backbone)** του συστήματος, διευκολύνοντας την ταχύτερη και πιο σταθερή μεταφορά δεδομένων.

Κάθε Cluster Head διατηρεί έναν **πίνακα δρομολόγησης (routing table)**, στον οποίο καταγράφονται οι διαθέσιμες **πύλες (GW)** των γειτονικών συστάδων. Αυτό επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων δρομολόγησης με άμεσο και αποδοτικό τρόπο, χωρίς καθυστερήσεις. Συνολικά, η ύπαρξη μιας τέτοιας δομής καθιστά το δίκτυο πιο αποδοτικό σε επίπεδο επικοινωνίας και ενεργειακής διαχείρισης.

5.1.2 Διάφορα χαρακτηριστικά του WSN που βασίζεται σε συμπλέγματα

Οφέλη της Ομαδοποίησης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η τεχνική της ομαδοποίησης με χρήση συμπλεγμάτων (cluster-based) προκύπτει ως αποτελεσματική λύση για την αύξηση της αποδοτικότητας σε δίκτυα αισθητήρων, καθώς συμβάλλει στη μείωση της πολυπλοκότητας που συνεπάγεται ένα εκτεταμένο επίπεδο (flat) δίκτυο. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να παρουσιάσει επιδείνωση στην απόδοσή του καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων και, κατ' επέκταση, το κόστος ελέγχου (control overhead). Η ομαδοποίηση λειτουργεί ως αρχιτεκτονική ιεραρχίας, όπου οι κόμβοι διαχωρίζονται σε λογικά σύνολα με βάση τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος ή τις ανάγκες της εφαρμογής. Στη δομή αυτή, συναντώνται τρεις βασικοί τύποι κόμβων: οι κεφαλές συμπλέγματος (Cluster Heads - CH), οι κόμβοι μελών (Member Nodes - MN) και οι κόμβοι πύλης (Gateway Nodes - GW).

Οι κεφαλές συμπλέγματος δρουν ως ενδιάμεσοι συντονιστές, συλλέγοντας δεδομένα από τους κόμβους του συμπλέγματος τους και μεταφέροντάς τα στο σταθμό βάσης. Οι κόμβοι μέλη αποτελούν τα απλά σημεία συλλογής δεδομένων, ενώ οι πύλες διασυνδέουν περισσότερα του ενός συμπλέγματα, σχηματίζοντας ένα δίκτυο ραχοκοκαλιάς (backbone) για αποτελεσματικότερη μεταβίβαση πληροφορίας. Κάθε CH διατηρεί πίνακα δρομολόγησης με τις γειτονικές του πύλες, διευκολύνοντας τη διαδικασία επιλογής διαδρομής σε επίπεδο συστάδας.

Πλεονεκτήματα της Συμπλεγματικής Αρχιτεκτονικής στα WSN

- **Σύντηξη Δεδομένων (Data Fusion):**
Οι κεφαλές συμπλέγματος εκτελούν συγχώνευση των δεδομένων που λαμβάνουν από τους κόμβους μέλη, μειώνοντας τα πλεονάζοντα πακέτα και εξοικονομώντας ενέργεια κατά την επικοινωνία με τον σταθμό βάσης
- **Ισορροπημένη Διαχείριση Φορτίου:**
Με στόχο την αποφυγή υπερφόρτωσης στους CH που βρίσκονται κοντά στον σταθμό βάσης, εφαρμόζεται στρατηγική περιορισμού των κόμβων μελών τους, έτσι ώστε η κατανάλωση ενέργειας να είναι ισορροπη σε όλο το δίκτυο.
- **Εξοικονόμηση Ενέργειας:**
Η υιοθέτηση multihop δρομολόγησης μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων μεταδόσεων, περιορίζοντας σημαντικά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας
- **Αναμετάδοση και Ανάκαμψη Συνδεσιμότητας:**
Οι **κόμβοι αναμετάδοσης** (στατικοί ή κινητοί) επιτρέπουν την αποκατάσταση της επικοινωνίας σε περίπτωση κατάρρευσης σύνδεσης, συμβάλλοντας στη συνεχή διασύνδεση των διαμερισμάτων του δικτύου.
- **Ανθεκτικότητα (Robustness):**
Η συνεχής παρακολούθηση και συντήρηση της αρχιτεκτονικής των συμπλεγμάτων καθιστά το δίκτυο πιο ευέλικτο σε μεταβολές της τοπολογίας, όπως μετακίνηση κόμβων ή αποτυχία υλικού.
- **Αποφυγή Συγκρούσεων:**
Η ανάθεση ειδικών χρονικών παραθύρων επικοινωνίας από τους CH προς τους κόμβους μέλη προλαμβάνει την ταυτόχρονη αποστολή δεδομένων, αποφεύγοντας προβλήματα συμφόρησης.
- **Μείωση Καθυστερήσης:**
Η ύπαρξη καθορισμένων διαδρομών μέσω πινάκων δρομολόγησης και η χρήση κυρίαρχων συνδεδεμένων συνόλων (CDS) μειώνει τον χρόνο μετάδοσης πακέτων.
- **Ασφάλεια Επικοινωνίας:**
Η επικέντρωση της διαδικασίας συγχώνευσης δεδομένων στους CH καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή ελέγχων ταυτότητας, ώστε να αποκλειστούν κακόβουλοι κόμβοι.
- **Ανοχή σε Σφάλματα:**
Η δημιουργία αντίγραφων ασφαλείας για τις κεφαλές και η ικανότητα αυτόνομης αναδιαμόρφωσης του δικτύου σε περιπτώσεις αστοχίας εξασφαλίζουν τη μακροχρόνια λειτουργικότητα του WSN.
- **Διασφάλιση Συνδεσιμότητας:**
Μέσω μηχανισμών επιβεβαίωσης επικοινωνίας, διασφαλίζεται ότι οι κινητοί κόμβοι παραμένουν εντός του δικτύου ή επανεντάσσονται σε αυτό, αποτρέποντας απώλειες δεδομένων .
- **Πρόληψη Αδιεξόδων:**
Η άνιση κατανομή των κόμβων σε κάθε σύμπλεγμα ανάλογα με την

απόστασή τους από τον σταθμό βάσης αποτρέπει την εξάντληση ενέργειας στους κοντινούς κόμβους και αποφεύγει φαινόμενα απομόνωσης .

- **Παράταση Διάρκειας Ζωής του Δικτύου:**

Η επιλεκτική εκλογή CH με βάση την εναπομείνουσα ενέργεια και η ισόρροπη κατανομή φόρτου διατηρούν τη λειτουργικότητα του δικτύου σε βάθος.

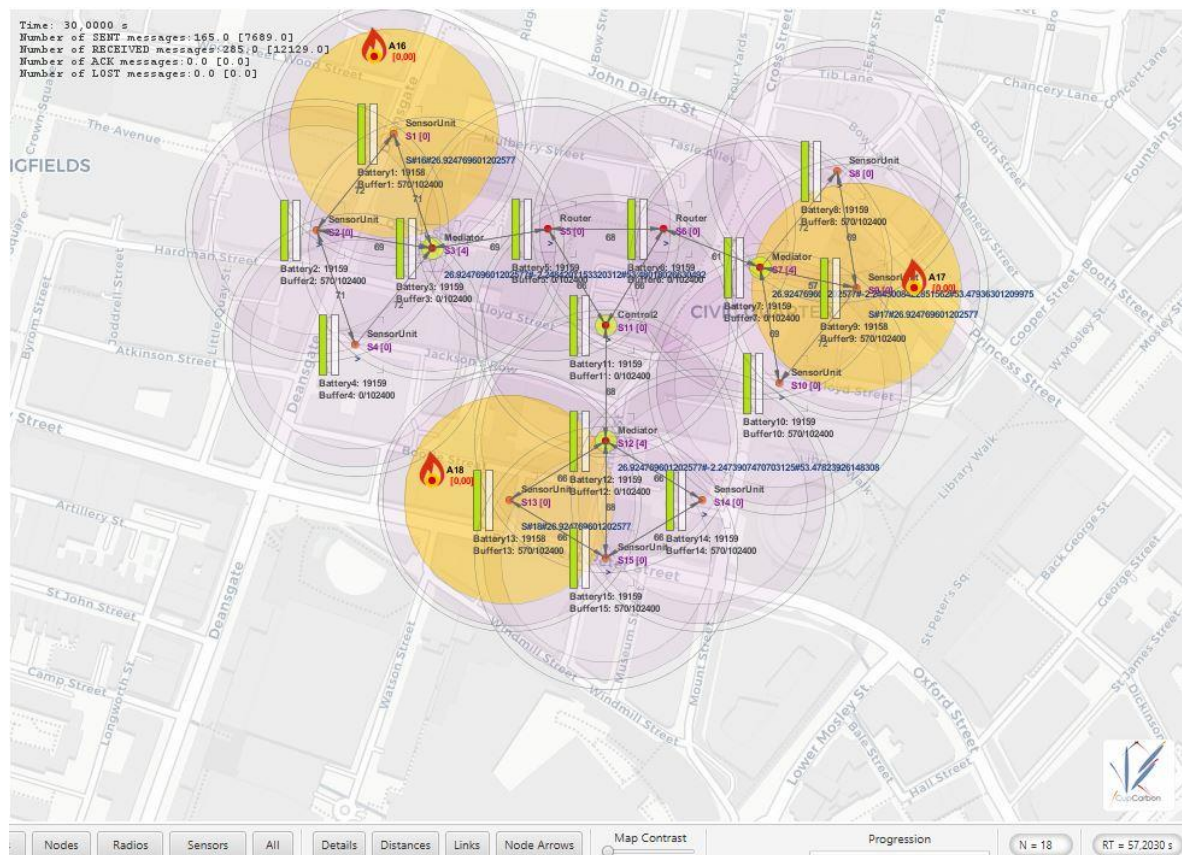
- **Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS):**

Παρότι η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι βασική προτεραιότητα, τα πρωτόκολλα ομαδοποίησης λαμβάνουν υπόψη βασικούς δείκτες QoS [14] όπως καθυστέρηση, αξιοπιστία και εύρος ζώνης σε εφαρμογές με πραγματικό χρόνο.

5.1.3 Δίκτυα Μονής Μεταπήδησης (Single-Hop Networks)

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων χαρακτηρίζεται ως *single-hop* όταν κάθε κόμβος αισθητήρας μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με την κεφαλή του συμπλέγματος (Cluster Head - CH) μέσω μίας και μόνο μεταπήδησης (hop). Σε τέτοια δίκτυα, η διαδικασία συλλογής δεδομένων απλοποιείται, καθώς η CH λαμβάνει τα δεδομένα απευθείας από τους κόμβους μελών χωρίς τη διαμεσολάβηση ενδιάμεσων κόμβων.

Η κεφαλή του συμπλέγματος έχει επίσης την ευθύνη της επεξεργασίας και συγχώνευσης των δεδομένων, πριν τα προωθήσει στον σταθμό βάσης (Base Station ή Sink), συνήθως μέσω επικοινωνίας με άλλες κεφαλές συμπλέγματος. Επιπλέον, σε *single-hop* αρχιτεκτονικές, ο υπολογιστικός απαιτητικός έλεγχος εγκυρότητας και ακεραιότητας των δεδομένων πραγματοποιείται από την ίδια την CH, γεγονός που περιορίζει την ανάγκη για επεξεργαστική ισχύ στους επιμέρους κόμβους αισθητήρων.

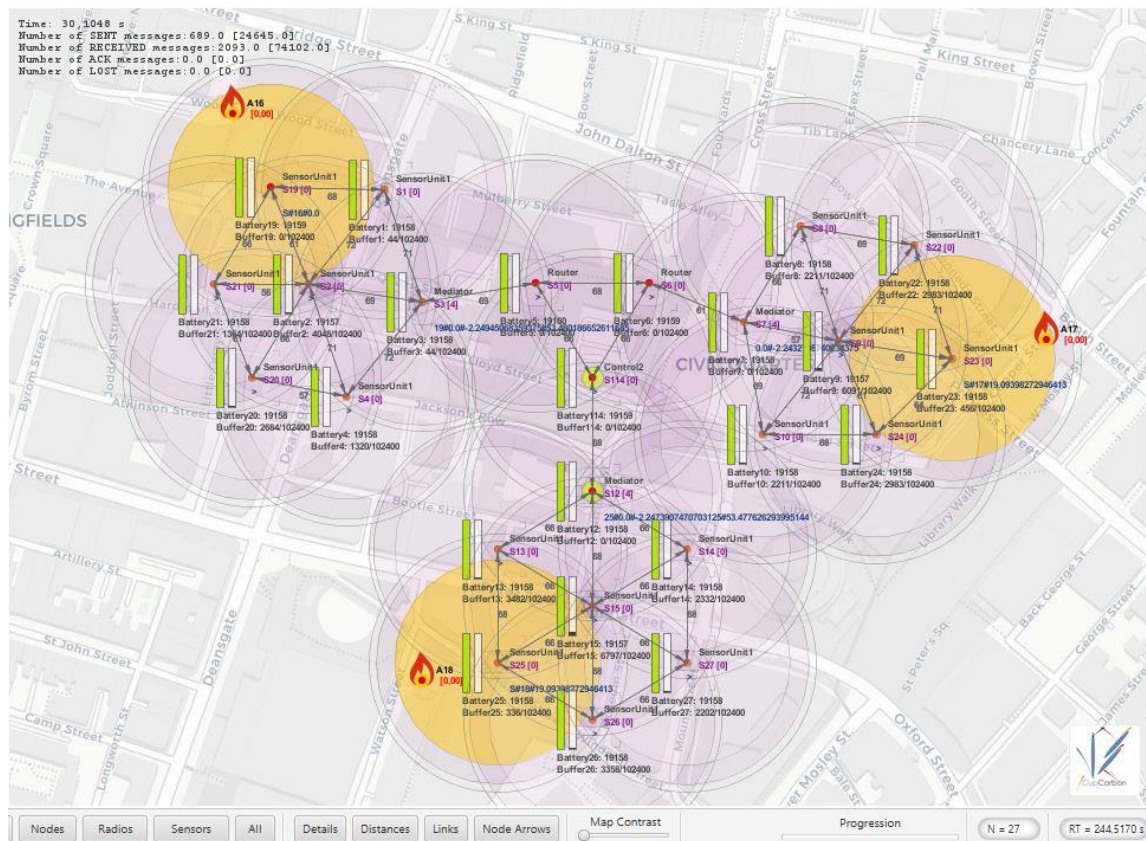


Εικόνα 19 - Δίκτυο single-hop για WSN στον προσομοιωτή CupCarbon

5.1.4 Δίκτυα Πολλαπλών Μεταπηδήσεων (Multi-Hop Networks)

Ένα δίκτυο χαρακτηρίζεται ως πολλαπλής αναπήδησης (multi-hop) όταν η μετάδοση των δεδομένων από τους κόμβους-αισθητήρες προς την κεφαλή του συμπλέγματος (Cluster Head – CH) απαιτεί τη διέλευση από περισσότερους του ενός ενδιάμεσους κόμβους.

Σε τέτοια αρχιτεκτονική, όταν ο ενδιάμεσος κόμβος που λαμβάνει τα δεδομένα δεν είναι CH, τότε η διαδικασία συλλογής και μεταβίβασης δεδομένων καθίσταται ενεργοβόρα και απαιτητική από πλευράς πόρων, γεγονός που επηρεάζει τη συνολική αποδοτικότητα του δικτύου.



Εικόνα 19 - Δίκτυο πολλαπλών αλμάτων για WSN στον προσομοιωτή CupCarbon

5.1.5 Στατικό Μοντέλο Εγκατάστασης δικτύου WSN

Η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN) έχει πλέον καθιερωθεί ως μια εξαιρετικά χρήσιμη λύση σε πληθώρα εφαρμογών, ιδιαίτερα στον τομέα της παρακολούθησης και της περιβαλλοντικής επιτήρησης.

Ωστόσο, σε εφαρμογές όπου απαιτείται συνεχής καταγραφή γεγονότων, οι απαιτήσεις σε ενέργεια για την ασύρματη επικοινωνία ξεπερνούν κατά πολύ εκείνες της ίδιας της ανίχνευσης.

Αυτό το φαινόμενο προκύπτει κυρίως από τη χρήση καταλυτικών ή ημιαγωγικών αισθητήρων, οι οποίοι σχεδιάζονται με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ ενεργειακής κατανάλωσης, απόδοσης και απαιτήσεων ασφαλείας.

Πλεονεκτήματα στατικού μοντέλου WSN:

- Διαπιστωμένη αποτελεσματικότητα στη συλλογή δεδομένων.
- Χαμηλό κόστος εγκατάστασης και εξοπλισμού.
- Εύκολη τοποθέτηση χωρίς απαίτηση χρήσης GPS.
- Απλότητα στον προγραμματισμό και την παραμετροποίηση.
- Δυνατότητα λειτουργίας σε δύσκολες καιρικές συνθήκες.
- Αυξημένη διάρκεια ζωής λόγω σταθερής λειτουργίας.

Μειονεκτήματα στατικού μοντέλου WSN:

- Περιορισμένη κάλυψη εξαιτίας της ακινησίας των κόμβων.
- Πιθανή παρεμπόδιση του πεδίου ανίχνευσης από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια.
- Ευαισθησία σε φαινόμενα καταστροφής του εδάφους (π.χ. πυρκαγιές, κατολισθήσεις).
- Δυσκολία πρόσβασης για εγκατάσταση ή συντήρηση σε απομακρυσμένα ή δύσβατα σημεία.

5.1.6 Συνδυαστικό Κινητό Μονέλο Εγκατάστασης δικτύου WSN με χρήση UAV

Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας και η ευρεία διαθεσιμότητα των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) έχουν οδηγήσει στην ενσωμάτωσή τους σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ενισχύοντας σημαντικά τις δυνατότητες παρακολούθησης σε μεγάλης κλίμακας περιοχές [31]. Παρότι τα UAV-WSN συστήματα υπόσχονται σημαντικά πλεονεκτήματα, εξακολουθούν να υπάρχουν ανοιχτά ζητήματα, όπως η αποτελεσματική ομαδοποίηση των αισθητήρων εδάφους, η βελτιστοποίηση της επικοινωνίας, η εξοικονόμηση ενέργειας και ο στρατηγικός σχεδιασμός πτήσεων UAV για την αποδοτικότερη συλλογή δεδομένων.

Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει τη θέση των κόμβων, την ποιότητα επικοινωνίας, την τοπική ομαδοποίηση και άλλες παραμέτρους, μπορεί να αυξήσει αισθητά την αποδοτικότητα τέτοιων υβριδικών συστημάτων. Με τη δυνατότητα λήψης χωρικών μετρήσεων, ανάλυσης και ανταλλαγής δεδομένων επιτόπου, τα WSN έχουν καθιερωθεί ως μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για ευρείας κλίμακας παρακολούθηση. Ωστόσο, η διεύρυνση της κάλυψης των WSN σε εκτενείς γεωγραφικές περιοχές αναδεικνύει τους περιορισμούς των επιμέρους κόμβων, όπως η ενεργειακή κατανάλωση και η υπερφόρτωση λόγω συνεχούς επικοινωνίας.

Εκτός από την ανάγκη για ενεργειακή αποδοτικότητα και αποδοτική μεταφορά δεδομένων, προβλήματα όπως η διαχείριση εύρους ζώνης και ο χρονικός συγχρονισμός αποτελούν επιπλέον προκλήσεις των UAV-WSN. Η ενσωμάτωση δυναμικών ρυθμίσεων κατανάλωσης ενέργειας, με βάση συνθήκες όπως η ώρα, ο καιρός ή το χρονοδιάγραμμα αποστολών, είναι κρίσιμη για την παράταση της αυτονομίας των συσκευών.

Πλεονεκτήματα του κινητού μοντέλου αισθητήρων (UAV-WSN):

- Εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη και δυνατότητα συλλογής δεδομένων από δυσπρόσιτες περιοχές.
- Αντοχή σε καταστροφικά φαινόμενα του εδάφους (όπως πυρκαγιές ή κατολισθήσεις).

- Δυνατότητα ανεμπόδιστης λήψης μετρήσεων, χωρίς παρεμβολές από φυσικά εμπόδια.
- Μεγάλη ακρίβεια εντοπισμού γεγονότων, λόγω συστημάτων GPS.
- Ευκολία στην πρόσβαση ακόμα και σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές.

Μειονεκτήματα του UAV-WSN:

- Ευαισθησία σε αντίξοες εναέριες καιρικές συνθήκες.
- Υψηλό αρχικό κόστος κτήσης και συντήρησης.
- Περιορισμένη διάρκεια λειτουργίας λόγω ενεργειακών αναγκών.
- Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα προγραμματισμού και ελέγχου.
- Περιορισμοί σε βάρος και χωρητικότητα εξοπλισμού λόγω κατασκευαστικών ορίων UAV.

Σημείωση: Η χρήση UAV υπόκειται επίσης σε νομικούς περιορισμούς, ανάλογα με το είδος και τις προδιαγραφές του οχήματος.

Η χρήση συνεργατικών συστημάτων UAV και WSN αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία σε εφαρμογές παρακολούθησης, επιτήρησης και έρευνας μεγάλων περιοχών ενδιαφέροντος. Τα υβριδικά αυτά σχήματα επιτρέπουν τη σύζευξη πληροφορίας από επίγειους κόμβους, εναέρια οχήματα, δορυφόρους και διαδικτυακές υποδομές, με στόχο τη βελτιστοποίηση της πληροφόρησης και της ανταπόκρισης σε πραγματικό χρόνο.

Η καινοτομία τέτοιων συστημάτων εντοπίζεται κυρίως στη σχεδίαση αρχιτεκτονικών που συνδυάζουν αποδοτικούς αλγόριθμους επιλογής κεφαλών συστάδων και στρατηγικές πτήσης UAV για συλλογή δεδομένων. Η πρακτική εφαρμογή και υλοποίηση τέτοιων λύσεων επιβεβαιώνει τη θεωρητική τους αποτελεσματικότητα, ακόμη και με την ανάπτυξη δεκάδων ή εκατοντάδων κόμβων στο πεδίο.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η εφαρμογή αλγορίθμων συναίνεσης (consensus algorithms), που διευκολύνουν την τοπική συνεργασία και μειώνουν την εξάρτηση από κεντρική μετάδοση, βελτιώνοντας τη χρήση εύρους ζώνης και μειώνοντας καθυστερήσεις. Παράλληλα, η προσαρμογή του προγραμματισμού επικοινωνίας των WSN στους ρυθμούς πτήσης των UAV συμβάλλει καθοριστικά στην αποτελεσματικότητα της λειτουργίας του συστήματος. Καθίσταται σαφές ότι ούτε τα UAV ούτε τα WSN είναι πλήρως αποτελεσματικά από μόνα τους· η συνδυαστική τους χρήση, ωστόσο, δημιουργεί ένα λειτουργικό σύνολο με αυξημένες δυνατότητες, ξεπερνώντας τους περιορισμούς των επιμέρους τεχνολογιών.

5.2 Τοπολογία Αστέρα (Star Topology)

Η **τοπολογία αστέρα (Star Topology)** αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές δικτύωσης, κυρίως χάρη στην απλότητα σχεδιασμού και την αποδοτικότητά της

στην πράξη. Στην τοπολογία αυτή, όλοι οι περιφερειακοί κόμβοι συνδέονται απευθείας με έναν **κεντρικό κόμβο** (συνήθως έναν διακόπτη ή δρομολογητή), ο οποίος λειτουργεί ως σημείο συντονισμού για την ανταλλαγή δεδομένων.

Η συγκεκριμένη διάταξη απαντάται συχνά σε οικιακά και επαγγελματικά δίκτυα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της είναι στα τοπικά δίκτυα τύπου **Ethernet LAN**, όπου όλοι οι υπολογιστές και οι άλλες συσκευές συνδέονται σε έναν κεντρικό **Ethernet switch**, ο οποίος διευκολύνει την επικοινωνία και τη δρομολόγηση πακέτων δεδομένων.

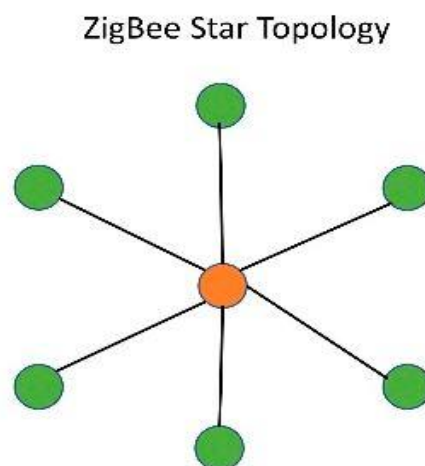
Πλεονεκτήματα της τοπολογίας αστέρα:

- **Ευκολία εγκατάστασης** και παραμετροποίησης.
- **Απλοποιημένη διάγνωση** και εντοπισμός προβλημάτων, καθώς οι δυσλειτουργίες είναι πιο εύκολο να απομονωθούν.
- Η βλάβη σε μία μόνο συσκευή **δεν επηρεάζει τη λειτουργία** των υπολοίπων.
- **Δυνατότητα επέκτασης** ή αφαίρεσης συσκευών χωρίς να διακοπεί η λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου.
- **Κεντρική διαχείριση** του δικτύου μέσω του βασικού κόμβου, που διευκολύνει την εποπτεία και τη ρύθμιση πολιτικών ασφαλείας.

Μειονεκτήματα της τοπολογίας αστέρα:

- Η ύπαρξη ενός **μοναδικού σημείου αστοχίας**: σε περίπτωση που ο κεντρικός κόμβος τεθεί εκτός λειτουργίας, ολόκληρο το δίκτυο αδυνατεί να λειτουργήσει.

Η **συνολική απόδοση** του δικτύου εξαρτάται άμεσα από την απόδοση και τη χωρητικότητα του κεντρικού κόμβου.



Εικόνα 20 - Απεικόνιση τοπολογίας Αστέρα

5.3 Τοπολογία Δέντρου (Tree Topology)

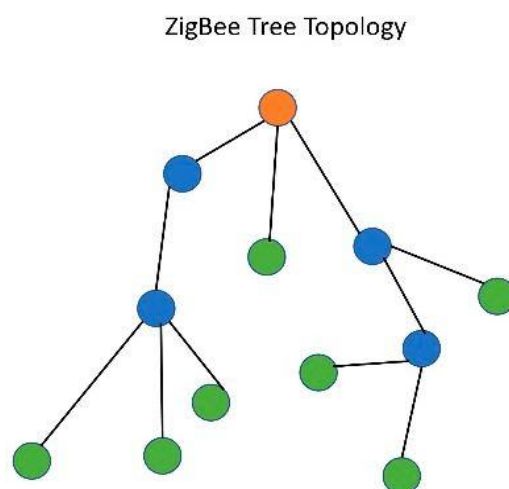
Η **τοπολογία δέντρου** είναι μία εξειδικευμένη δομή που συνδυάζει χαρακτηριστικά άλλων τοπολογιών, οργανώνοντας τα στοιχεία του δικτύου με τρόπο παρόμοιο με τα κλαδιά ενός δέντρου. Στην περίπτωση των **ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN)**, η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται συχνά, αλλά και σε άλλες εφαρμογές, όπως η διαχείριση υπολογιστικών δικτύων σε εταιρικά περιβάλλοντα ή η οργάνωση πληροφοριών σε βάσεις δεδομένων. Η τοπολογία δέντρου βασίζεται στη σύνδεση πολλαπλών τοπολογιών αστέρα με μία τοπολογία διαύλου, δημιουργώντας ένα ενιαίο, ιεραρχικό δίκτυο.

Πλεονεκτήματα της τοπολογίας δέντρου:

- Η τοπολογία αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της τοπολογίας **αστέρα** και **διαύλου (Bus)**. Ειδικότερα, πολλοί κόμβοι οργανώνονται σε τοπολογίες αστέρα και συνδέονται μέσω μίας κεντρικής γραμμής επικοινωνίας (διαύλου), δημιουργώντας μία ιεραρχική διάταξη.
 - Στην **τοπολογία αστέρα**, οι κόμβοι επικοινωνούν με έναν κεντρικό κόμβο.
 - Στην **τοπολογία διαύλου**, όλα τα στοιχεία συνδέονται μέσω μιας κοινής γραμμής επικοινωνίας, διευκολύνοντας την επικοινωνία μεταξύ τους χωρίς την ανάγκη για πολλαπλές συνδέσεις.

Μειονεκτήματα της τοπολογίας δέντρου:

Η **πολλαπλή ύπαρξη σημείων αστοχίας**: Επειδή αυτή η τοπολογία συνδυάζει τις τοπολογίες αστέρα και διαύλου, η διακοπή οποιουδήποτε από τα δύο συστήματα (αστέρα ή διαύλου) μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο σύνολο του δικτύου. Αν το δίκτυο διακοπεί σε κάποιο από τα κρίσιμα σημεία του, μπορεί να επηρεαστεί η επικοινωνία σε μεγάλο μέρος του δικτύου.



Εικόνα 21 - Απεικόνιση τοπολογίας Δέντρου

5.4 Τοπολογία Πλέγματος (Mesh Topology)

Η τοπολογία δικτύου πλέγματος αποτελεί μια δομή κατά την οποία κάθε κόμβος του δικτύου διασυνδέεται άμεσα με έναν ή περισσότερους άλλους κόμβους, δημιουργώντας ένα ευέλικτο και πολυσύνδετο σύστημα επικοινωνίας. Το δίκτυο παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία, καθώς επιτρέπει την απρόσκοπτη μετάδοση δεδομένων ακόμα και σε περίπτωση αποτυχίας επιμέρους συνδέσεων.

Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές όπου η συνεχής διαθεσιμότητα του συστήματος είναι κρίσιμη, όπως για παράδειγμα σε νοσοκομεία, χρηματοπιστωτικά ιδρύματα ή κρίσιμες υποδομές ασφαλείας. Παρόμοιες αρχές έχουν επίσης υιοθετηθεί και σε δίκτυα αισθητήρων, κυρίως σε εκείνα που λειτουργούν σε απομακρυσμένα ή απαιτητικά περιβάλλοντα.

Πλεονεκτήματα:

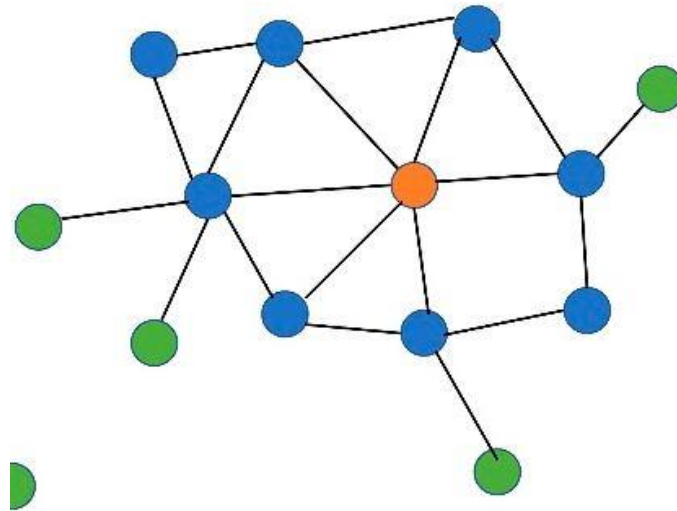
- Υψηλή ανοχή σε σφάλματα χάρη στην ύπαρξη πολλαπλών διαδρομών μεταξύ κόμβων.
- Απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου σε περίπτωση αποτυχίας ενός ή περισσότερων κόμβων.
- Ευελιξία στην προσθήκη νέων κόμβων χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση του συνόλου.
- Αυξημένη αξιοπιστία και διαθεσιμότητα του συστήματος, κατάλληλη για κρίσιμες εφαρμογές.

Μειονεκτήματα:

- Αυξημένο κόστος υλοποίησης λόγω της ανάγκης για πολλαπλές συνδέσεις και εξοπλισμό.
- Πολυπλοκότητα στη σχεδίαση, εγκατάσταση και συντήρηση του δικτύου.
- Υψηλές απαιτήσεις σε υποδομή και πόρους, ειδικά όταν εφαρμόζεται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα.
- Ενδεχόμενη επιβάρυνση σε κατανάλωση ενέργειας, ιδιαίτερα σε ασύρματα δίκτυα με περιορισμούς ισχύος.

Η τοπολογία πλέγματος θεωρείται κατάλληλη για συστήματα όπου η αξιοπιστία της επικοινωνίας και η συνεχής λειτουργία υπερισχύουν έναντι του κόστους και της πολυπλοκότητας.

ZigBee Mesh Topology



Εικόνα 22 - Απεικόνιση τοπολογίας Πλέγματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Δημιουργία Σεναρίων Δικτύου στον προσομοιωτή CupCarbon

6.1 Αρχικοποίηση και ανάλυση στοιχείων κατασκευής δικτύων Μονής μεταπήδησης & Πολλαπλής μεταπήδησης με χρήση του προσομοιωτή CupCarbon

Χρησιμοποιώντας μια τυχαία τοποθεσία στο χάρτη του εργαλείου, θα δημιουργήσουμε ενδεικτικά σενάρια δικτύων με μονή μεταπήδηση και πολλαπλών μεταπηδήσεων της πληροφορίας με σκοπό τον έλεγχο και τη σύγκριση όσον αφορά την απόδοση, την κατανάλωση της ενέργειας και το χρόνο που αναλογεί στη μεταφορά της πληροφορίας από το αισθητήριο στοιχείο μέχρι το σταθμό βάσης.

Τα κύρια στοιχεία που απαρτίζουν το δίκτυο μας είναι τα εξής:

- Αισθητήρια Στοιχεία (Sensors)
- Δρομολογητές (Routers)
- Κεφαλές Συστάδων (Cluster Heads)
- Σταθμός Βάσης (Base Station/Sink)
- Φαινόμενα (Gases)

Το δίκτυο ως προς τη δομή θα συγκροτηθεί με τα αισθητήρια στοιχεία να τοποθετούνται στην υποτιθέμενη περιοχή ελέγχου, με σκοπό την επαγρύπνηση σε περίπτωση μέτρησης περιβαλλοντικών και μη, τιμών κάποιου φαινομένου το μέτρο των οποίων έχουμε ορίσει σαν “σκανδάλη” σήμανσης κινδύνου.

Έπειτα ακολουθούν οι κεφαλές συστάδων οι οποίες επικοινωνούν είτε απευθείας με τα αισθητήρια στοιχεία, είτε μέσω δρομολογητών, με σκοπό τη συλλογή των δεδομένων ή και την επεξεργασία.

Παράλληλα, οι κεφαλές συστάδων επικοινωνούν με το σταθμό βάσης μέσω δρομολογητών, όπου η πληροφορία καταλήγει με σκοπό την επεξεργασία ή την ειδοποίηση του χρήστη.

Τα αισθητήρια στοιχεία κατα προεπιλογή στον προσομοιωτή CupCarbon βασίζονται στους πραγματικούς αισθητήρες TELOS-B καθώς και τα μοντέλα κατανάλωσης της ενέργειας.

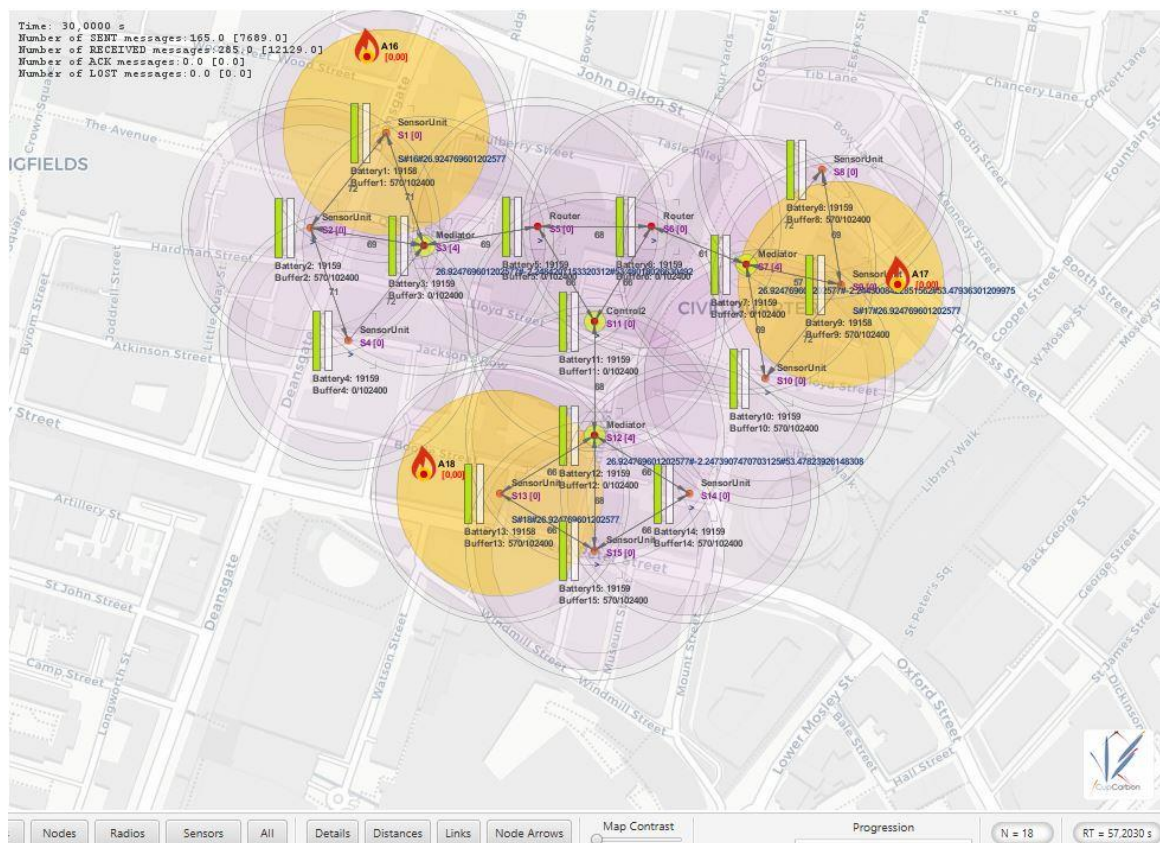
Το κατά προεπιλογή μοντέλο επικοινωνίας μεταξύ των στοιχείων είναι το ZigBee.

Σημείωση: Στο σενάριο όπου εξετάζουμε την περίπτωση μονής μεταπήδησης, χρησιμοποιούμε ένα δίκτυο 15 κόμβων-στοιχείων, ενώ στην περίπτωση της πολλαπλής μεταπήδησης χρησιμοποιούμε ένα δίκτυο 24 κόμβων-στοιχείων.

6.1.1 Δημιουργία δικτύου μονής μεταπήδησης στον προσομοιωτή CupCarbon

Ένα δίκτυο λέγεται ονομάζεται “single-hop” εάν η κεφαλή του συμπλέγματος (Cluster head) απέχει μία μεταπήδηση από τον κόμβο-αισθητήρα.

Σε δίκτυα single-hop, είναι εύκολο για την κεφαλή του συμπλέγματος να συγκεντρώνει τα δεδομένα και να τα κοινοποιεί στον σταθμό βάσης (Base Station/Sink) μόνο μέσω άλλων κεφαλών συμπλέγματος. Με άλλα λόγια, η ακριβή-σε πόρους-επαλήθευση εκτελείται από την ίδια την κεφαλή του συμπλέγματος.

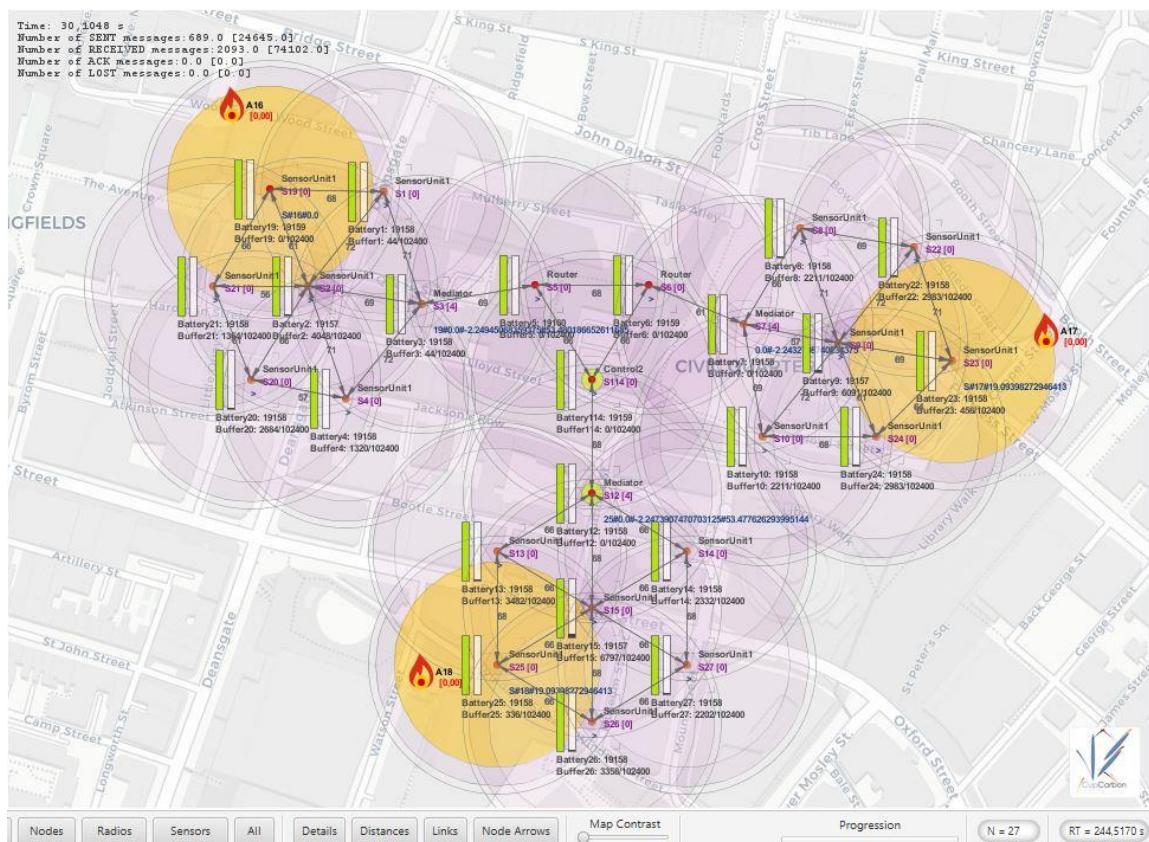


Εικόνα 23 - Δίκτυο single-hop για WSN στον προσομοιωτή CupCarbon.

6.1.2 Δημιουργία δικτύου πολλαπλών μεταπηδήσεων στον προσομοιωτή CupCarbon

Ένα δίκτυο ονομάζεται δίκτυο πολλαπλής αναπήδησης εάν απαιτούνται πολλαπλά άλματα για τη μεταφορά δεδομένων από τους αισθητήρες στην κεφαλή του συμπλέγματος.

Σε αυτά τα δίκτυα, εάν ο επόμενος κόμβος λήψης δεν είναι μια κεφαλή συστάδας, τότε η εργασία λήψης και συγκέντρωσης δεδομένων είναι πολύ ακριβή σε πόρους.



Εικόνα 23 - Δίκτυο πολλαπλών αλμάτων για WSN στον προσομοιωτή CupCarbon.

6.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης μεταξύ Single-hop & Multi-hop networks

Τρέχοντας την προσομοίωση μπορούμε συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με εφαρμογή μονάχα ενός άλματος, με την ίδια σε σενάριο πολλαπλών μεταπηδήσεων.

```

Time: 30,0000 s
Number of SENT messages: 165.0 [7689.0]
Number of RECEIVED messages: 285.0 [12129.0]
Number of ACK messages: 0.0 [0.0]
Number of LOST messages: 0.0 [0.0]

```

Εικόνα 24 - Αποτελέσματα Single-Hop, όπου διακρίνεται ο χρόνος προσομοίωσης, ο αριθμός των πακέτων και το συνολικό μέγεθος σε Bytes.

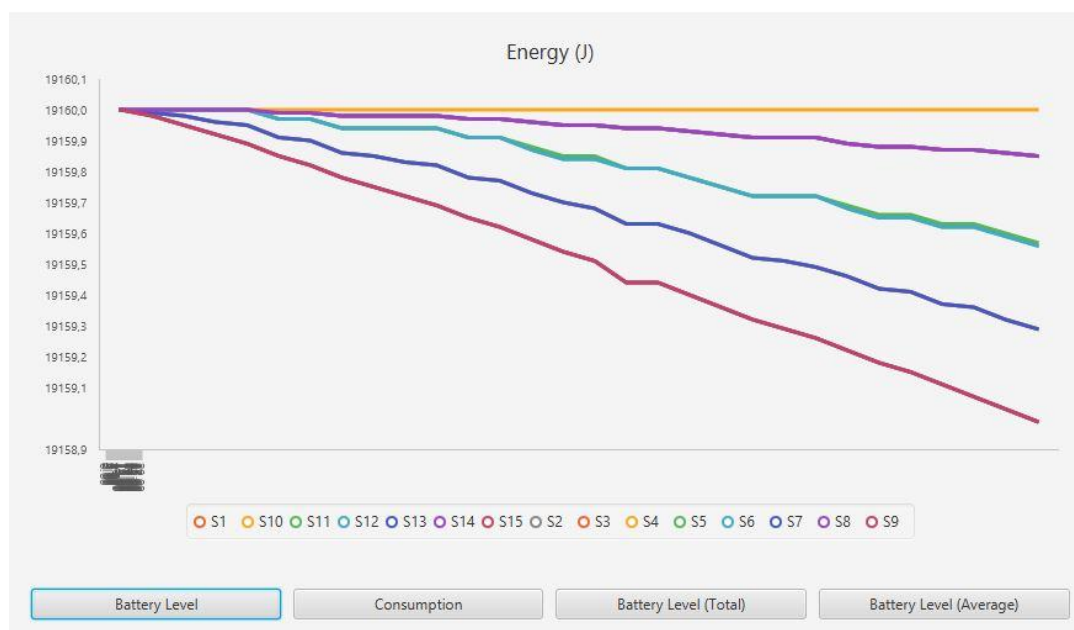
```

Time: 30,1048 s
Number of SENT messages: 689.0 [24645.0]
Number of RECEIVED messages: 2093.0 [74102.0]
Number of ACK messages: 0.0 [0.0]
Number of LOST messages: 0.0 [0.0]

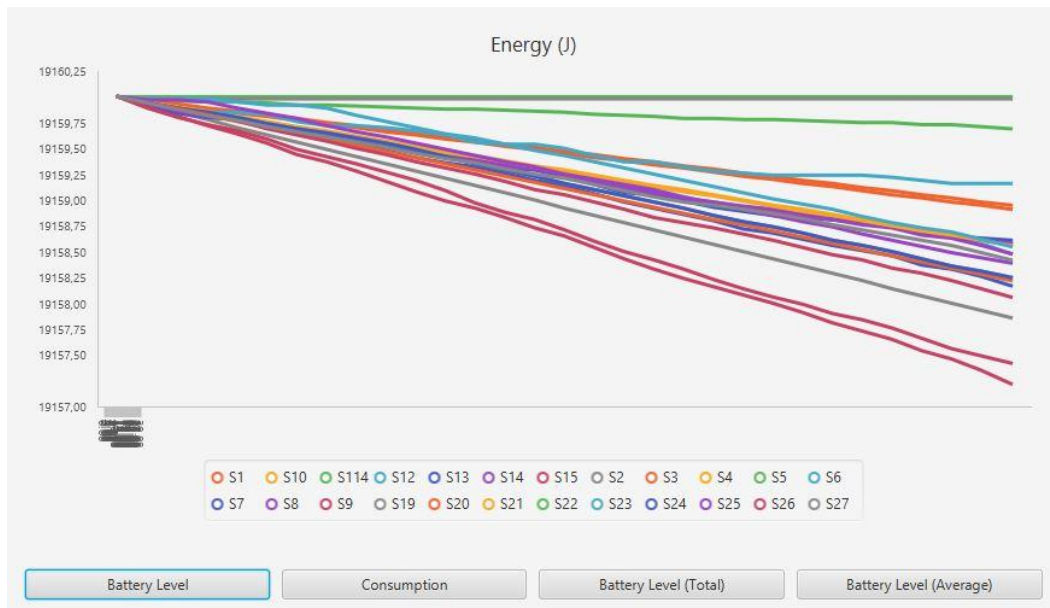
```

Εικόνα 25 - Αποτελέσματα Multi-Hop, όπου διακρίνεται ο χρόνος προσομοίωσης, ο αριθμός των πακέτων και το συνολικό μέγεθος σε Bytes.

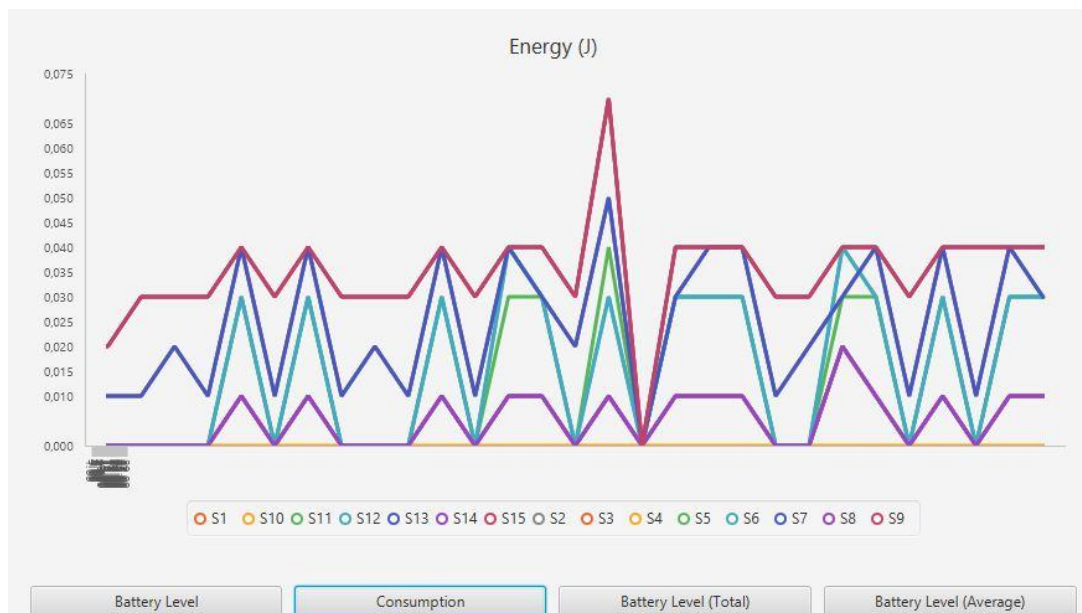
Ο προσομοιωτής Cyrcarbon παρέχει λειτουργίες παραγωγής διαγραμμάτων όπου διαγράφεται η κατανάλωση της ενέργειας (Joule) σε συνάρτηση με το χρόνο, καθώς και τα επίπεδα μπαταρίας.



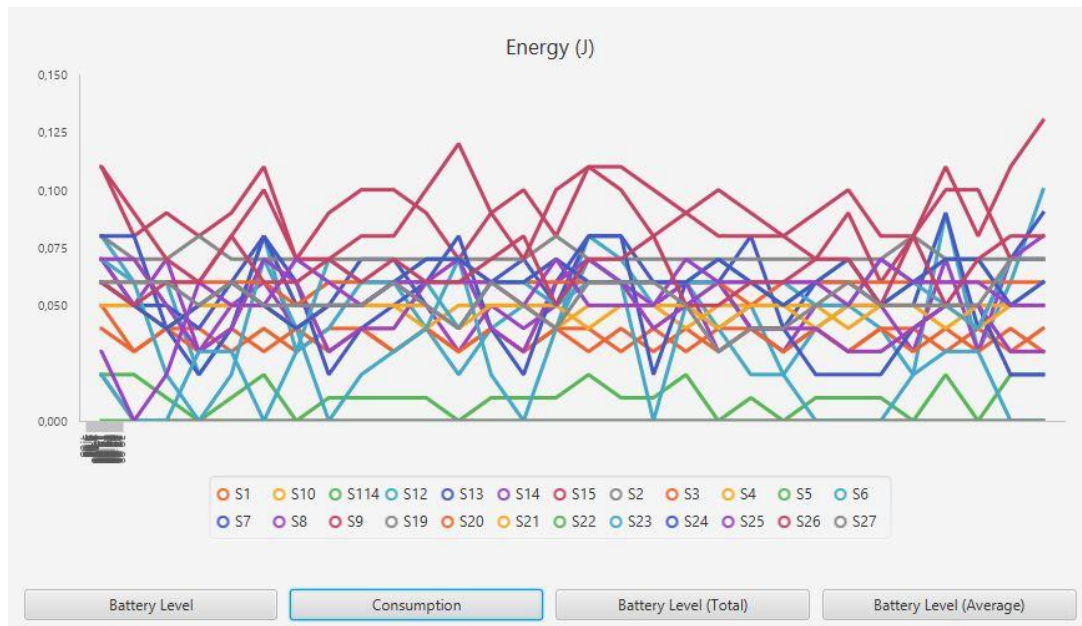
Εικόνα 26 - Γράφημα μεταβολής επιπέδων μπαταρίας των στοιχείων του δικτύου στην περίπτωση Single-Hop.



Εικόνα 27 - Γράφημα μεταβολής επιπέδων μπαταρίας των στοιχείων του δικτύου στην περίπτωση Multi-Hop.



Εικόνα 28 - Γράφημα κατανάλωσης ενέργειας των στοιχείων του δικτύου στην περίπτωση Single-Hop.



Εικόνα 29 - Γράφημα κατανάλωσης ενέργειας των στοιχείων του δικτύου στην περίπτωση Multi-Hop.

Συμπεράσματα: στην περίπτωση της μονής μεταπήδησης ο όγκος των δεδομένων είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με αυτόν της πολλαπλής Μεταπήδησης όπου παρατηρείται σημαντική φόρτωση στους buffers.

Παράλληλα τα επίπεδα κατανάλωσης διαφέρουν αρκετά με την περίπτωση της απλής μεταπήδησης να υπερτερεί σε αποδοτικότητα και διάρκεια ζωής. Παράλληλα, ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταφορά των δεδομένων από τον αισθητήρα στο σταθμό βάσης είναι μικρότερος στην περίπτωση μονού άλματος.

Αντίθετα, χρησιμοποιώντας την περίπτωση πολλαπλών αλμάτων έχουμε σημαντική άνοδο στην επιφάνεια κάλυψης (coverage) του δικτύου αλλά και στη συνδεσιμότητα (connectivity) του.

Επίσης, η αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου και η μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας μπορεί επιτευχθεί χρήση εξειδικευμένων αλγορίθμων δρομολόγησης.

Κατα συνέπεια η χρήση της εκάστοτε περίπτωσης εξαρτάται από τις ανάγκες και τις απαιτήσεις, περιβαλλοντικές και μη, του κάθε σεναρίου που έχουμε σκοπό να υλοποιήσουμε.

6.2 Υλοποίηση δικτύου με χρήση κόμβων-πυλών στον προσομοιωτή CupCarbon

6.2.1 Κόμβοι-πύλες (Gateway Nodes) - Ορισμός

Ο κόμβος πύλης (Gateway Node) αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο της αρχιτεκτονικής των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και χρησιμοποιείται για τη σύνδεση δύο ή περισσότερων δικτύων που βασίζονται σε διαφορετικά πρωτόκολλα μετάδοσης.

Λειτουργεί ως σημείο εισόδου και εξόδου για τα δεδομένα, καθώς όλη η κίνηση που πρόκειται να δρομολογηθεί εκτός ενός τοπικού δικτύου πρέπει να περάσει από αυτόν.

Σε περιβάλλοντα που βασίζονται στο πρωτόκολλο IP, οποιαδήποτε επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών δικτύων διέρχεται τουλάχιστον από μία πύλη. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η επικοινωνία που περιορίζεται σε κόμβους εντός του ίδιου τοπικού υποδικτύου (LAN), όπου η δρομολόγηση μπορεί να γίνεται απευθείας χωρίς τη μεσολάβηση πύλης.

Ο όρος «προεπιλεγμένη πύλη» χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει τη βασική ή κύρια πύλη ενός συστήματος, μέσω της οποίας δρομολογείται η εξωτερική κίνηση.

Πλεονεκτήματα χρήσης κόμβου πύλης:

- Διευκόλυνση της σύνδεσης και επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών τύπων δικτύων.
- Κεντρική διαχείριση της πρόσβασης στο Διαδίκτυο μέσω μίας συσκευής.
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης επιπρόσθετων λειτουργιών, όπως διακομιστής μεσολάβησης (proxy server) και τείχος προστασίας (firewall).
- Αυξημένη ασφάλεια και έλεγχος των δεδομένων που εξέρχονται και εισέρχονται στο δίκτυο.
- Ευκολότερη παρακολούθηση και καταγραφή της κυκλοφορίας δεδομένων σε εταιρικά περιβάλλοντα.

Η παρουσία του gateway node καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις ετερογενών δικτυακών υποδομών, καθώς λειτουργεί ως γέφυρα επικοινωνίας και μετατροπής πρωτοκόλλων, διασφαλίζοντας την απρόσκοπτη και ασφαλή ροή πληροφορίας.

6.2.2 Κόμβοι-πύλες (Gateway Nodes) - Λειτουργίες

Όλα τα δίκτυα διαθέτουν ένα συγκεκριμένο όριο που περιορίζει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών που βρίσκονται εντός του. Όταν προκύπτει η ανάγκη για επικοινωνία με συσκευές, κόμβους ή άλλα δίκτυα εκτός του ορίου αυτού, είναι απαραίτητη η παρουσία και λειτουργία μιας πύλης.

Η πύλη συχνά περιγράφεται ως ένας συνδυασμός δρομολογητή και μόντεμ. Τοποθετείται τυπικά στο άκρο του δικτύου και είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση όλων των δεδομένων που εισέρχονται ή εξέρχονται από αυτό. Κατά τη μετάδοση, όταν ένα δίκτυο επιχειρεί να επικοινωνήσει με ένα άλλο, το πακέτο δεδομένων μεταφέρεται πρώτα στην πύλη. Εκείνη, με τη σειρά της, επιλέγει και ακολουθεί την πλέον αποδοτική διαδρομή προς τον τελικό προορισμό.

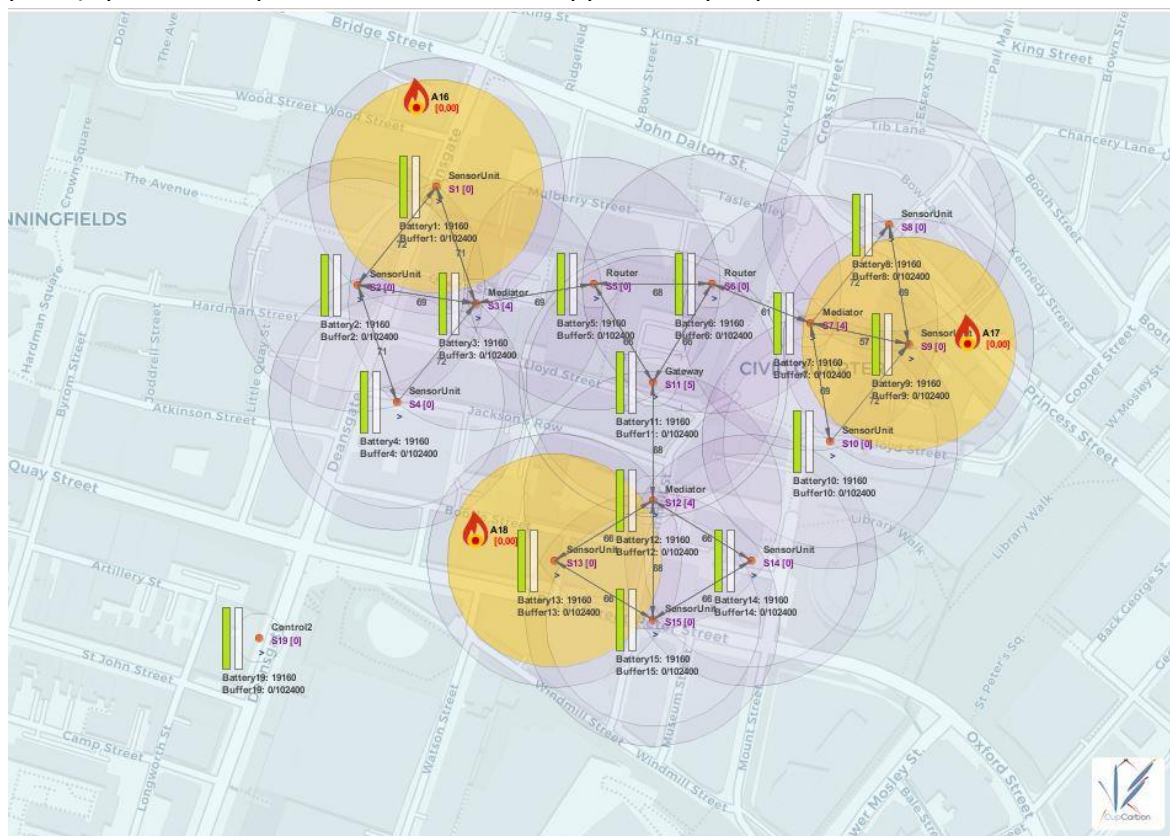
Πέρα από τη λειτουργία της δρομολόγησης, οι πύλες διατηρούν και πληροφορίες σχετικά με τις εσωτερικές διαδρομές του τοπικού δικτύου καθώς και τις διαδρομές προς πιθανά επιπρόσθετα δίκτυα με τα οποία υπάρχει διασύνδεση.

Αποτελούν ουσιαστικά μετατροπείς πρωτοκόλλων, προσφέροντας συμβατότητα μεταξύ διαφορετικών προτύπων επικοινωνίας. Για τον λόγο αυτό, είναι ικανές να λειτουργούν σε οποιοδήποτε επίπεδο του μοντέλου OSI (Open Systems Interconnection), εξυπηρετώντας ευρύτερες ανάγκες ετερογενών συστημάτων δικτύωσης.

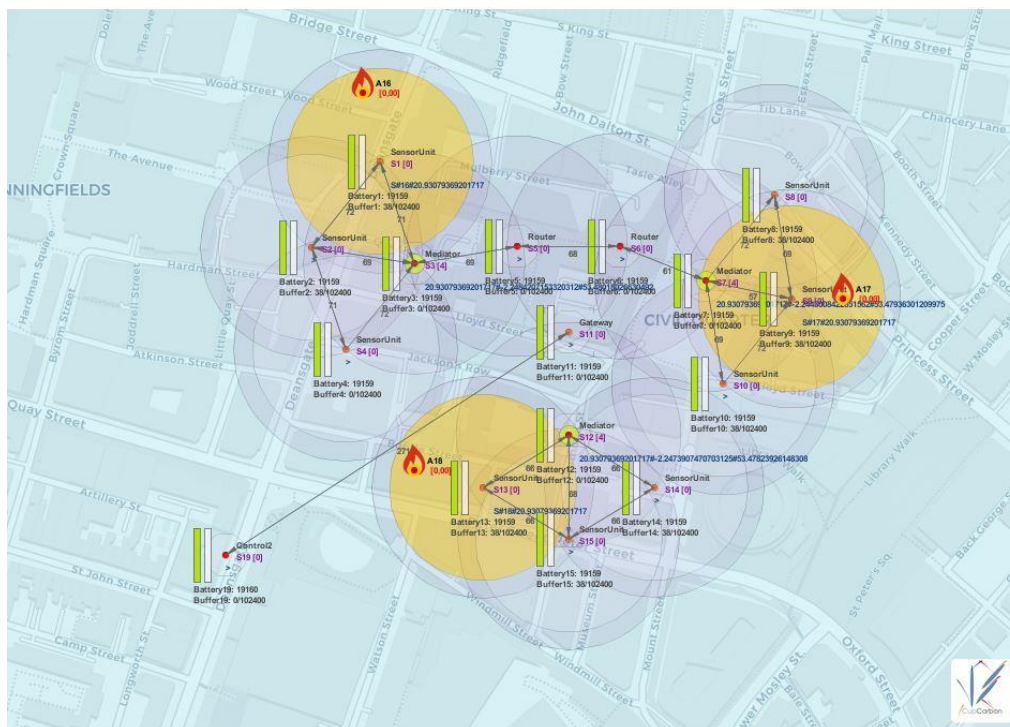
6.2.3 Υλοποίηση δικτύου με χρήση Gateway Node στον προσομοιωτή CupCarbon

Χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή CupCarbon θα δημιουργήσουμε ένα σενάριο ώστε να εξετάσουμε τη λειτουργία ενός Gateway node όταν του αναθέτουμε τη λειτουργία εναλλαγής μεταξύ των πρωτοκόλλων ZigBee & LoRa.

Στο πρώτο σχήμα διακρίνεται η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου (το οποίο επικοινωνεί με ZigBee) καθώς μεταφέρουν τις πληροφορίες στην πύλη, ενώ στο επόμενο σχήμα βλέπουμε την εναλλαγή του πρωτοκόλλου της πύλης σε LoRa ώστε να μεταφέρει τα δεδομένα στο Sink, το οποίο βρίσκεται μακριά από το υπόλοιπο δίκτυο.



Εικόνα 30 - Επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου (το οποίο επικοινωνεί με ZigBee) καθώς μεταφέρουν τις πληροφορίες στην πύλη.



Εικόνα 31 - Εναλλαγή του πρωτοκόλλου της πύλης σε LoRa ώστε να μεταφέρει τα δεδομένα στο Sink, το οποίο βρίσκεται μακριά από το υπόλοιπο δίκτυο.

6.3 Ορατότητα δικτύου σε κατοικημένη περιοχή στον προσομοιωτή CupCarbon

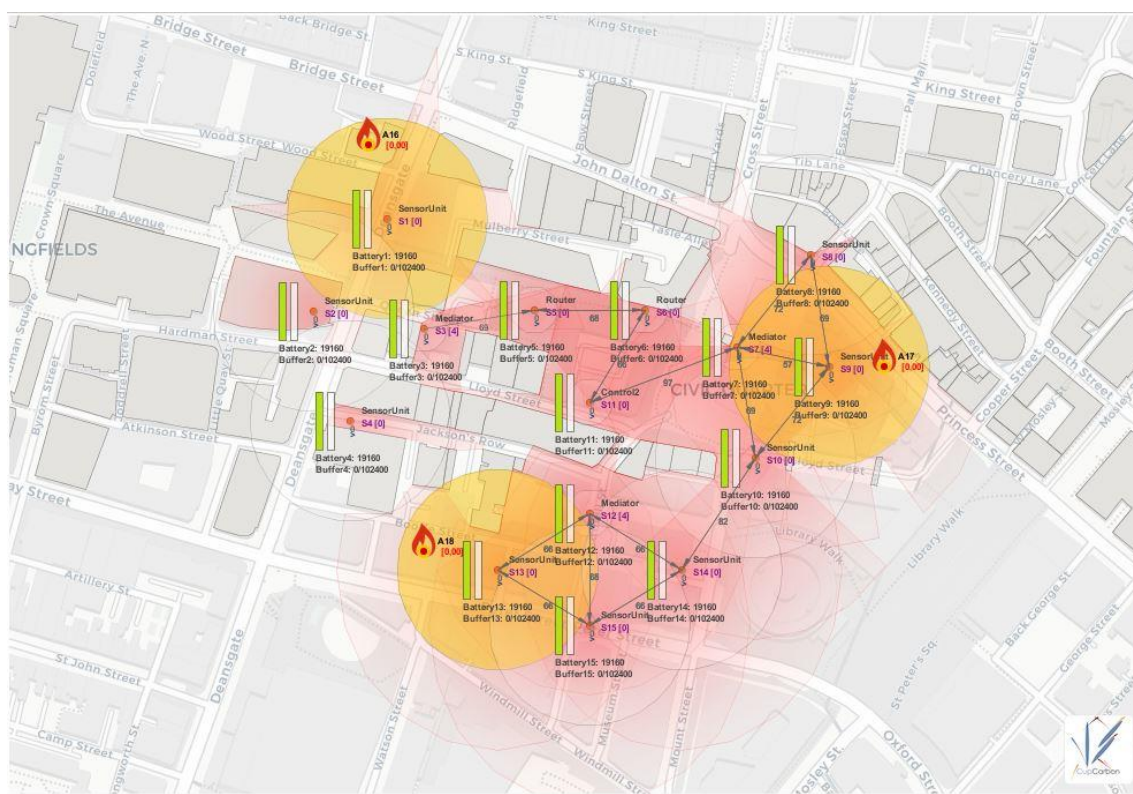
Ο προσομοιωτής CupCarbon μας προσφέρει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την ορατότητα του δικτύου που έχουμε σχεδιάσει λαμβάνοντας υπ' όψιν την τοπολογία των κτισμάτων μιας κατοικημένης περιοχής, με αποτέλεσμα να μπορούμε να αλλάξουμε τη θέση και το σχηματισμό των στοιχείων που απαρτίζουν το δίκτυο μας ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις, αλλά και τους περιορισμούς που συναντάμε.

Κατά συνέπεια, μέσω του προσομοιωτή μπορούμε να προβούμε σε λύσεις και ιδέες για τον καλύτερο δυνατό σχεδιασμό ενός δικτύου πριν την εγκατάσταση του στο πραγματικό περιβάλλον.

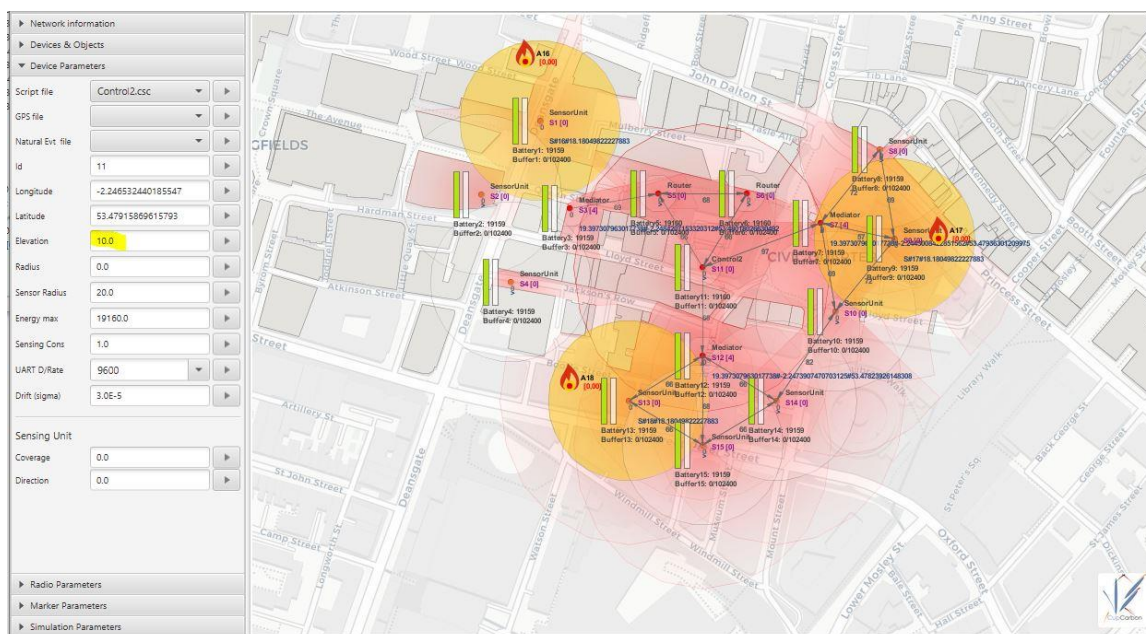
Στην **Εικόνα - 32** παρατηρούμε την ορατότητα που θα είχε το δίκτυο που εξετάσαμε προηγουμένως (συγκεκριμένα: Single-hop cluster based topology) όταν λαμβάνουμε υπόψη τα κτίρια που απαρτίζουν τη συγκεκριμένη περιοχή.

Εξετάζοντας τις παραμέτρους που εμπλέκονται στο συγκεκριμένο σενάριο, αντιλαμβανόμαστε ότι όλοι οι αισθητήρες βρίσκονται στο ίδιο υψόμετρο (ground level), πράγμα που σημαίνει ότι ο νούμερο ένα παράγοντας που παρεμποδίζει την επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων μας δεν είναι άλλος παρά το ύψος της τοποθέτησης τους.

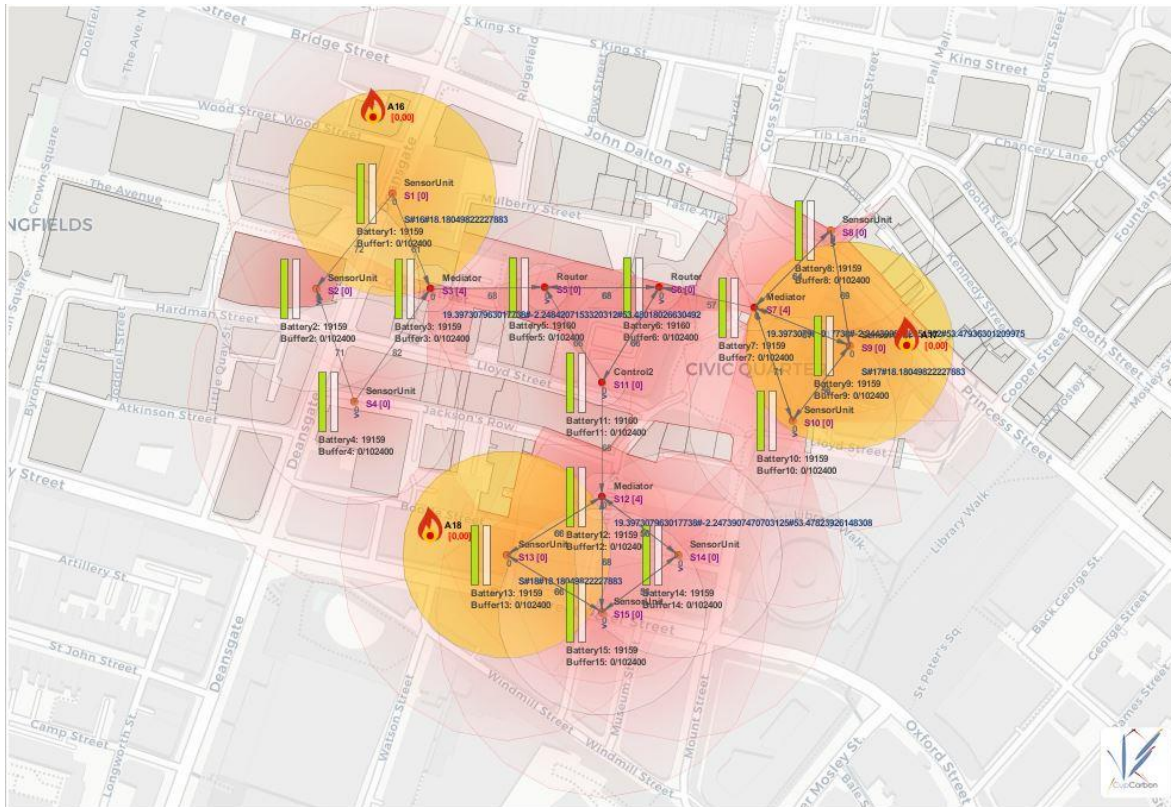
Στην **Εικόνα 33** & **Εικόνα 34** παρατηρούμε ότι αλλάζοντας το υψόμετρο (π.χ: εγκατάσταση αισθητήρων στις ταράτσες/σκεπές των κτιρίων) επιλεγμένων κόμβων του δικτύου καταλήγουμε στην αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ τους.



Εικόνα - 32 Ορατότητα αισθητήρων Δικτύου λαμβάνοντας υπόψιν τα κτήρια



Εικόνα - 33 Ορατότητα αισθητήρων Δικτύου με αλλαγή υψομέτρου εγκατάστασης (1)



Εικόνα - 34 Ορατότητα αισθητήρων Δικτύου με αλλαγή υψομέτρου εγκατάστασης (2)

Συμπεράσματα: Επιλέγοντας το κατάλληλο σημείο εγκατάστασης των συσκευών-στοιχείων του δικτύου μας μπορούμε να απαλλαγούμε από περιορισμούς ορατότητας εξαιτίας φυσικών εμποδίων που υπάρχουν στο περιβάλλον μας.

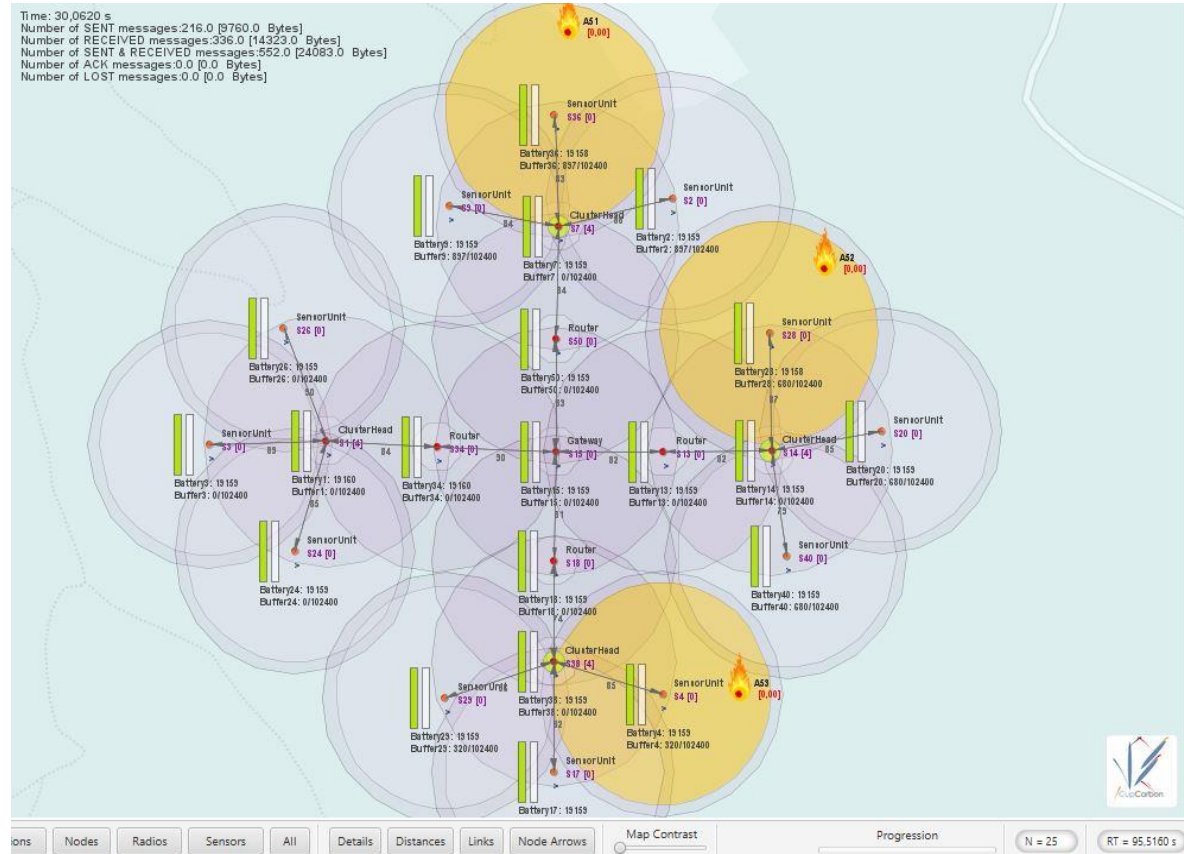
Βέβαια, η αλλαγή υψομέτρου μπορεί να μας προσφέρει λύσεις στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου μας, αλλά ίσως επιφέρει άλλα προβλήματα τα οποία οι περιορισμένες ικανότητες του εργαλείου που χρησιμοποιούμε δεν μπορούν να προβλέψουν (π.χ. οι αισθητήρες θα καλύπτουν την ίδια επιφάνεια με ακρίβεια παρά τις αλλαγές στο υψόμετρο ή θα συλλέγουν λάθος τα δεδομένα).

6.3 Υλοποίηση σεναρίων δικτύου WSN - UAV για στοχευμένες λειτουργίες και χρήσεις

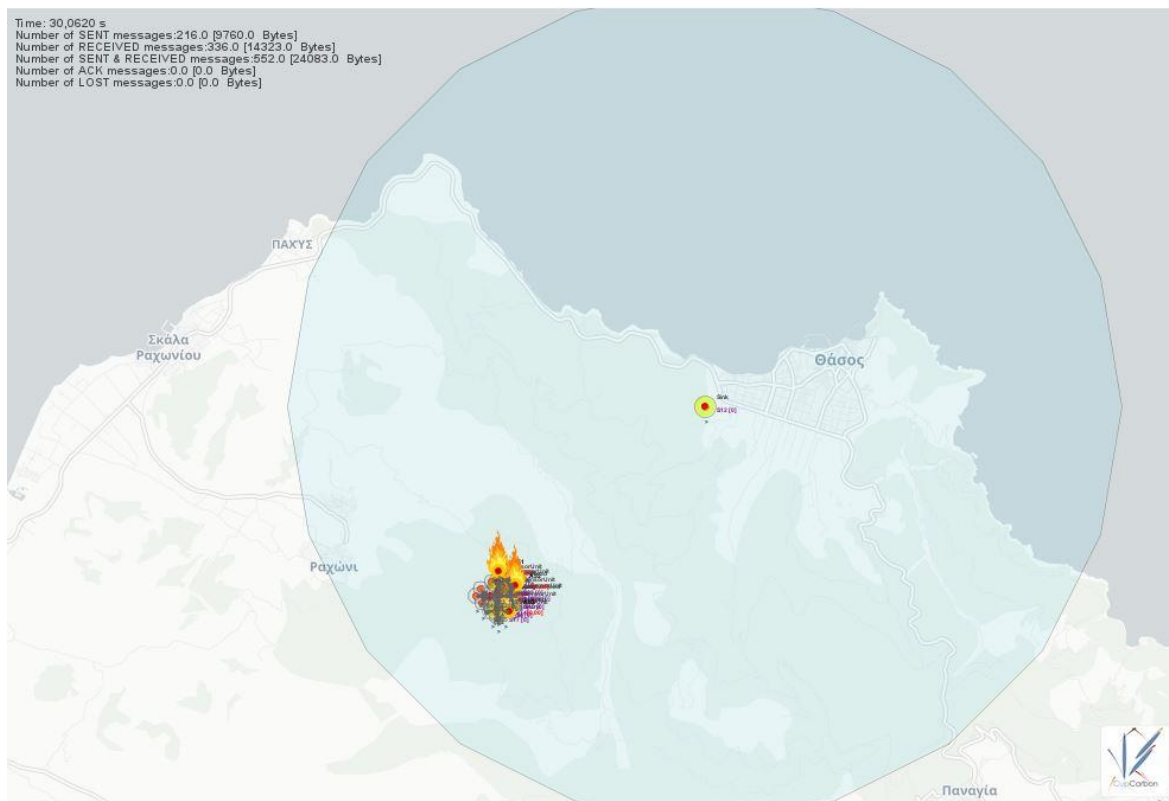
6.3.1 Σενάριο και μελέτη στατικού μοντέλου δικτύου WSN για την αποτροπή πυρκαγιάς χρήση του προσομοιωτή CupCarbon

Χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή CupCarbon δημιουργούμε ένα σενάριο στατικής εγκατάστασης δικτύου αισθητήρων σε περιοχή ευάλωτη από πυρκαγιές στην περιοχή Αγ. Γεωργίου μεταξύ του Ραχωνίου και του λιμένα στο νησί της Θάσου. Στο σενάριο μας έχουμε εισάγει το δίκτυο με τοπολογία βασισμένη σε συστάδες, όπου τα στοιχεία που απαρτίζουν το δίκτυο μας επικοινωνούν με ZigBee.

Τα συλλεγόμενα δεδομένα από τους αισθητήρες στα άκρα του δικτύου μεταφέρονται στις κεφαλές συστάδων για επεξεργασία, κι από εκεί μεταφέρονται μέσω δρομολογητών στην πύλη, η οποία με τη σειρά της εκπέμπει σε LoRa για να επικοινωνήσει με το σταθμό βάσης που βρίσκεται εγκατεστημένος στο λιμένα της Θάσου, αρκετά μακριά από το υπόλοιπο δίκτυο.



Εικόνα 35 - Απεικόνιση δικτυακής εγκατάστασης στατικού μοντέλου WSN και της εμβέλειας του πρωτοκόλλου επικοινωνίας ZigBee.

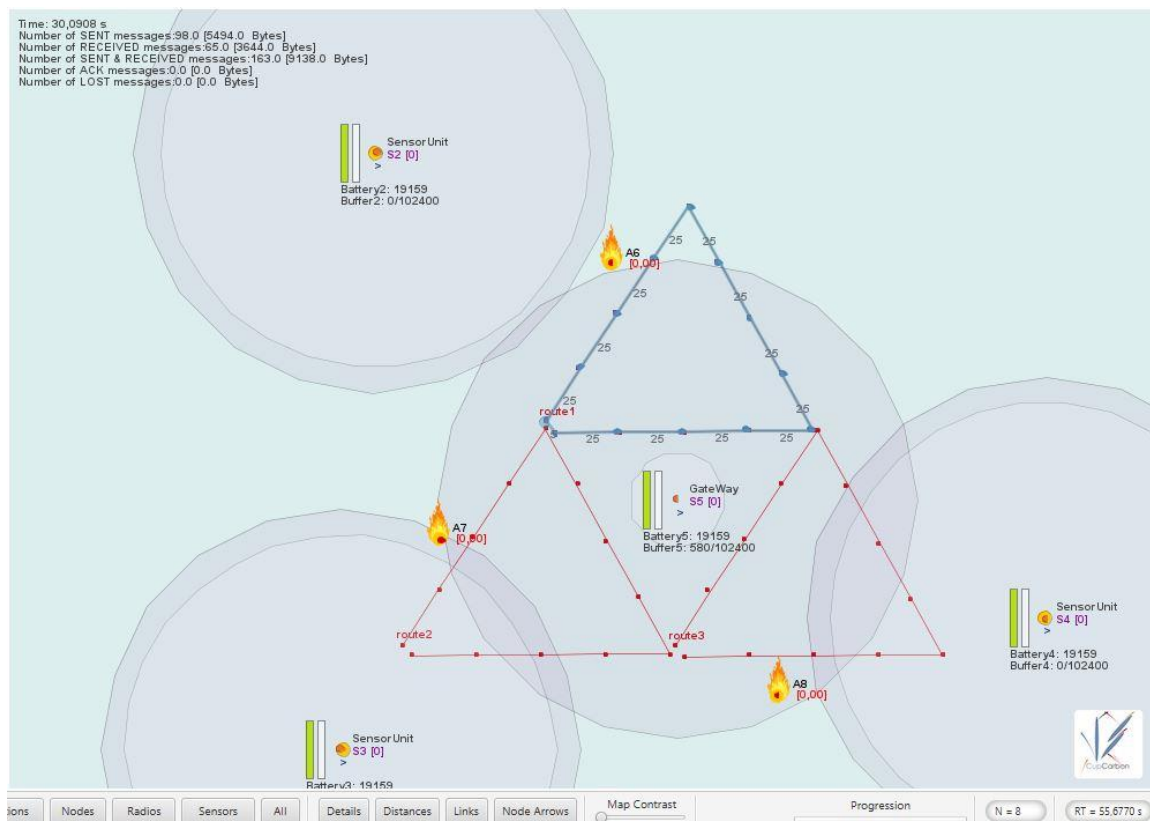


Εικόνα 36 - Απεικόνιση της στατικής δικτυακής εγκατάστασης όπου είναι εμφανή η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του υπόλοιπου δικτύου, καθώς και η εμβέλεια σήματος του πρωτοκόλλου LoRa.

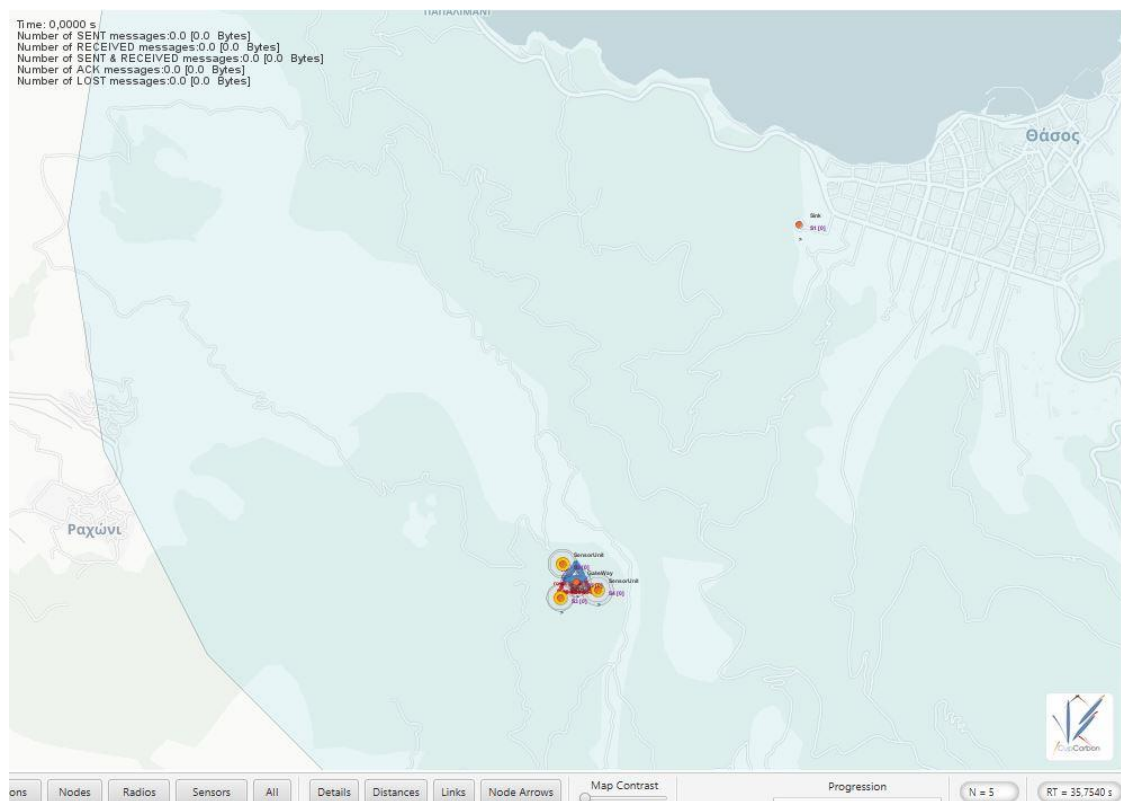
6.3.2 Σενάριο και μελέτη κινητού μοντέλου δικτύου WSN για την αποτροπή πυρκαγιάς χρήση του προσομοιωτή CupCarbon

Χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή CupCarbon δημιουργούμε ένα σενάριο μελέτης παρόμοιο με το παραπάνω, με τη μόνη διαφορά ότι έχουμε εισάγει μη επανδρωμένα drones για τη συλλογή δεδομένων θερμοκρασίας, τα οποία περιτολούν μια συγκεκριμένη περιοχή ακολουθώντας μια εναέρια διαδρομή την οποία τους έχουμε αναθέσει.

Έπειτα, αφού συλλέξουν τα δεδομένα τα αποστέλλουν σε μια πύλη, η οποία επεξεργάζεται και με όμοιο τρόπο με το προηγούμενο παράδειγμα στέλνει τα δεδομένα στο σταθμό βάσης.



Εικόνα 37 - Απεικόνιση δικτύου με χρήση μη επανδρωμένων εναέριων αισθητήριων στοιχείων, με σκοπό την περιτολία συγκεκριμένης διαδρομής.

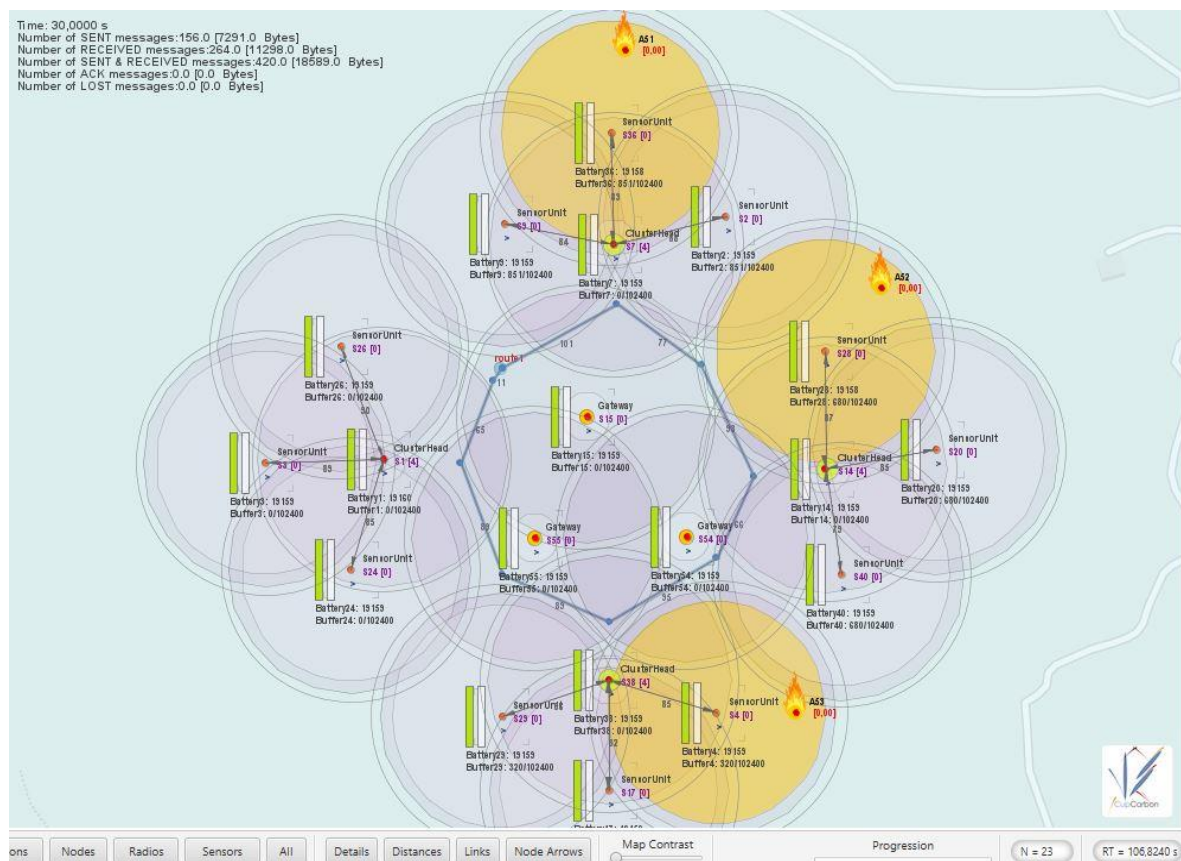


Εικόνα 38 - Απεικόνιση κινητού μοντέλου αισθητήρων και η απόσταση του δικτύου από τον σταθμό βάσης.

6.3.2 Συνδυαστικό μοντέλο UAV-WSN με κινητές μονάδες συλλογής δεδομένων

Στο επόμενο σενάριο μελέτης θα δημιουργήσουμε ένα δίκτυο αισθητήρων τοπολογίας συστάδων στον προσομοιωτή CurCarbon το οποίο απαρτίζεται κατά το ήμισυ από στατικούς αισθητήρες που ανταποκρίνονται σε κεφαλές συστάδων, και κινητές μονάδες συλλογής & αποστολής δεδομένων προς το σταθμό βάσης όπως φαίνεται στην **Εικόνα 39**.

Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε επιλεγμένες περιοχές προσβάσιμες από τον άνθρωπο, αλλά με δυσκολία επικοινωνίας με πύλες που εκπέμπουν στο σταθμό βάσης. Κατά συνέπεια τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα λειτουργούν σα πύλες αποστολής των δεδομένων στο σταθμό βάσης καθώς περιπολούν την περιοχή σε τακτά χρονικά διαστήματα και έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας με τις κεφαλές συστάδων.



Εικόνα 39 - δίκτυο αισθητήρων τοπολογίας συστάδων με κινητές μονάδες συλλογής δεδομένων.

6.4 Μελέτη και ανάλυση της τεχνολογίας των στοιχείων των συνδυαστικών δικτύων WSN - UAV

6.4.1 Μοντέλα κατανάλωσης σε στατικά και ιπτάμενα στοιχεία

Όσον αφορά τα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας, είναι γεγονός ότι γνωρίζοντας τα απαραίτητα δεδομένα που το απαρτίζουν, μπορούμε με ακρίβεια να προβλέψουμε τη διάρκεια ζωής ενός δικτύου πριν το εγκαταστήσουμε.

Συγκεκριμένα, για τους στατικούς αισθητήρες υπάρχουν άπειρες λύσεις στο πρόβλημα της ενέργειας, διότι το γεγονός ότι είναι εγκατεστημένοι σε σταθερή τοποθεσία κάνει εύκολη την παροχή ενέργειας μέσω καλωδίων ή και τη “φόρτιση” τους είτε εγκαθιστώντας solar panels, είτε επαγωγικά, είτε με απλή αλλαγή μπαταριών από τον άνθρωπο.

Για τα drones τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά γιατί εμπλέκονται περισσότεροι παράγοντες τους οποίους πρέπει να λάβουμε υπόψιν και να μελετήσουμε εκτενώς για να εξάγουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Αρχικά το μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης των αισθητήρων του προσομοιωτή CupCarbon είναι κατά προεπιλογή βασισμένο στο μοντέλο των αισθητήρων TELOS B όπου το μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας αποστολής/λήψης δεδομένων καθώς και κάποια από τα απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

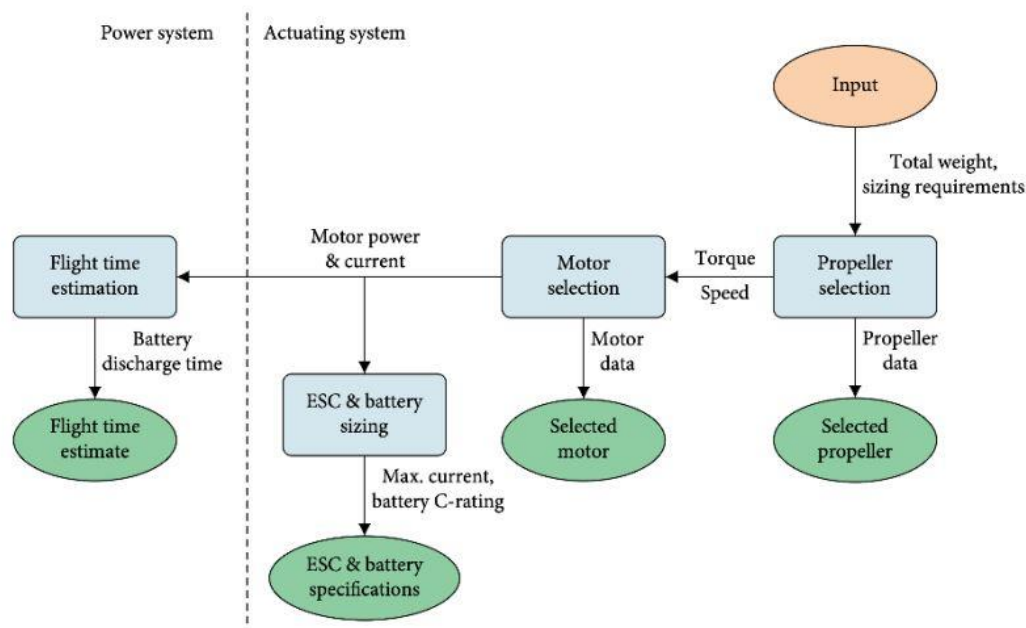
TELOS B (TPR2420CA)	
Battery	2 AA
Size	65 x 31 x 6 mm
Weight	23 gr
Transmitting Energy Consumption	5.92E-5
Receiving Energy Consumption	2.86E-5

Πίνακας 2 - Χαρακτηριστικά μοντέλων TELOS B

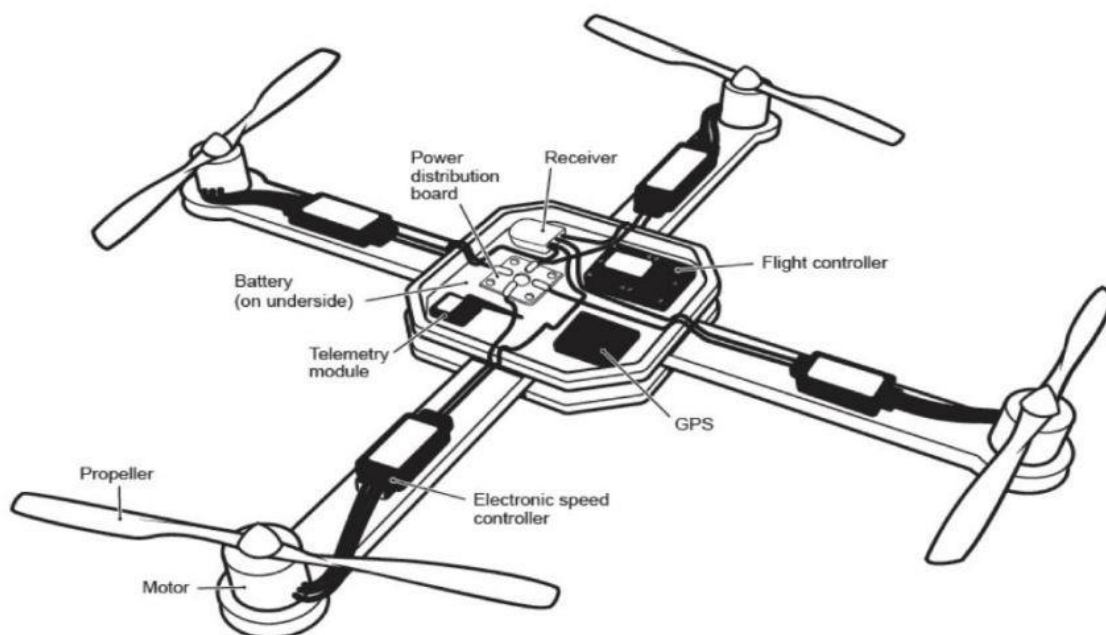
Μελετώντας τους ιπτάμενους αισθητήρες πρέπει να λάβουμε υπόψη τα εξής:

- Ποιες εργασίες θα εκτελούν;
- Πόση απόσταση θα διανύουν;
- Υπό ποιες συνθήκες θα λειτουργούν;
- Ποιά τεχνικά χαρακτηριστικά απαιτούνται (μέγεθος, αριθμός κινητήρων, βάρος, κ.α.);
- Με ποιό τρόπο θα φορτίζονται;

Στην [Εικόνα 40](#) βλέπουμε ένα πλάνο επιλογής εξαρτημάτων για ένα σύστημα πτήσης UAV και στην [Εικόνα 41](#) βλέπουμε την ανατομία ενός UAV.



Εικόνα 40 - Διαδικασία επιλογής εξαρτημάτων για ένα σύστημα πρόωσης UAV.



Εικόνα 41 - Ανατομία ενός rotary-wing UAV

Το βασικό καθήκον ενός κόμβου αισθητήρα στο πεδίο είναι η ανίχνευση πληροφοριών από το περιβάλλον και η προώθησή τους σε άλλα σημεία του δικτύου για περαιτέρω επεξεργασία ή αποθήκευση. Από την άλλη πλευρά, ο κύριος ρόλος ενός μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (UAV) είναι η μεταφορά αισθητήρων ή άλλου τύπου εξοπλισμού για τη διευκόλυνση της συλλογής και μετάδοσης δεδομένων.

Η κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων στο έδαφος μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις βασικές φάσεις: την ανίχνευση, την επικοινωνία και την επεξεργασία των συλλεγόμενων δεδομένων. Στην περίπτωση των UAV, η ενεργειακή κατανάλωση επηρεάζεται κυρίως από τη λειτουργία πτήσης, καθώς η κίνηση και η διατήρηση ύψους απαιτούν σημαντικούς ενεργειακούς πόρους.

Επιπλέον, η ενεργειακή κατανάλωση ποικίλλει αισθητά ανάλογα με το είδος και τις προδιαγραφές του UAV. Όσον αφορά τις μονάδες ανίχνευσης και την επεξεργασία δεδομένων, αυτές συνήθως παραμένουν παρόμοιες με εκείνες που χρησιμοποιούνται στα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN). Στο πλαίσιο της επικοινωνίας, σε ένα UAV-βοηθούμενο WSN (U-WSN), υπάρχουν δύο ξεχωριστά επίπεδα: η επικοινωνία μεταξύ των επίγειων αισθητήρων και η επικοινωνία μεταξύ των επίγειων και των εναέριων κόμβων που βρίσκονται επί των UAV.

Η αποτελεσματική διαχείριση των ενεργειακών πόρων και στα δύο υποσυστήματα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη συνολική απόδοση και διάρκεια ζωής του υβριδικού συστήματος παρακολούθησης.

Η αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης στις επικοινωνίες μεταξύ εναέριων και επίγειων κόμβων βασίζεται σε κρίσιμες παραμέτρους, με σημαντικότερη τον λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal-to-Interference and Noise Ratio – SINR). Ο λόγος αυτός αποτελεί δείκτη της ποιότητας του καναλιού επικοινωνίας και της εφικτής απόδοσης [35].

Αν υποθέσουμε ότι το SINR συμβολίζεται ως **Sinr**, τότε ισχύει:

$$Sinr = \frac{Pr}{(Ps,r+Pn,r)} \quad (3)$$

όπου:

- **Pr**: η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται από τον εξυπηρετούμενο πομπό,
- **Ps,r**: η συνολική παρεμβολή που φτάνει στον δέκτη,
- **Pn,r**: η ισχύς του θορύβου στον δέκτη.

Για να εξασφαλιστεί η απαραίτητη ποιότητα επικοινωνίας, το σύστημα ρυθμίζει κατάλληλα την ισχύ εκπομπής ώστε το **SINR** να παραμένει σε αποδεκτό επίπεδο, που εδώ ορίζεται ως **Sinr_o**.

Η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για τη μετάδοση ενός μηνύματος από έναν κόμβο εδάφους προς μία εναέρια πλατφόρμα κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος **Δt**, δίνεται από το γενικό τύπο:

$$E = (Pt \times \Delta t) \quad (4)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η σχέση παίρνει τη μορφή:

$$E_{si} = (P_{i,a} + P_{n,p}) \times L_{si,k} \times \Delta t \quad (5)$$

όπου η ισχύς εκπομπής P_t προσδιορίζεται με βάση την επιθυμητή τιμή του SINR, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση ισχύ της εναέριας παρεμβολής $P_{I,a}$ και τον θόρυβο της εναέριας πλατφόρμας $P_{n,p}$.

Γενικά, το μοντέλο επικεντρώνεται κυρίως στην κατανάλωση ενέργειας των επίγειων κόμβων αισθητήρων. Η πιθανή περιορισμένη διαθεσιμότητα ενέργειας των UAV δεν λαμβάνεται υπόψη στο συγκεκριμένο υπολογιστικό πλαίσιο. Ως εκ τούτου, δεν λαμβάνεται υπόψη και αυτή η κατανάλωση ενέργειας. Συνεπώς, η συνολική κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται με τον τύπο:

$$E_{all} = \sum_{i=1}^N E_{si} \quad (6)$$

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος μπορεί επομένως να εκτιμηθεί ως το άθροισμα των ατομικών ενεργειακών απαιτήσεων επικοινωνίας, προσαρμοσμένο στο εκάστοτε δίκτυο και σενάριο εφαρμογής.

Συμπεράσματα: Κατά την επιλογή ή σχεδίαση των εναέριων μονάδων του συστήματος (όπως UAVs), θα πρέπει να συνυπολογίζονται πολλές κρίσιμες παράμετροι, όπως οι απαιτήσεις πλοήγησης υπό αντίξοες συνθήκες, η αεροδυναμική σταθερότητα και η απόδοση των επικοινωνιών. Παράλληλα, απαιτείται λεπτομερής μελέτη των καιρικών μοτίβων της εκάστοτε περιοχής καθώς και της τοπικής πανίδας, ιδιαίτερα της παρουσίας πτηνών που ενδέχεται να επηρεάσουν τη λειτουργία των UAV.

6.5 Μελέτη και σύγκριση αποτελεσμάτων σε εφαρμογές διαφορετικών τοπολογιών σε συνδυαστικά δίκτυα UAV-WSN.

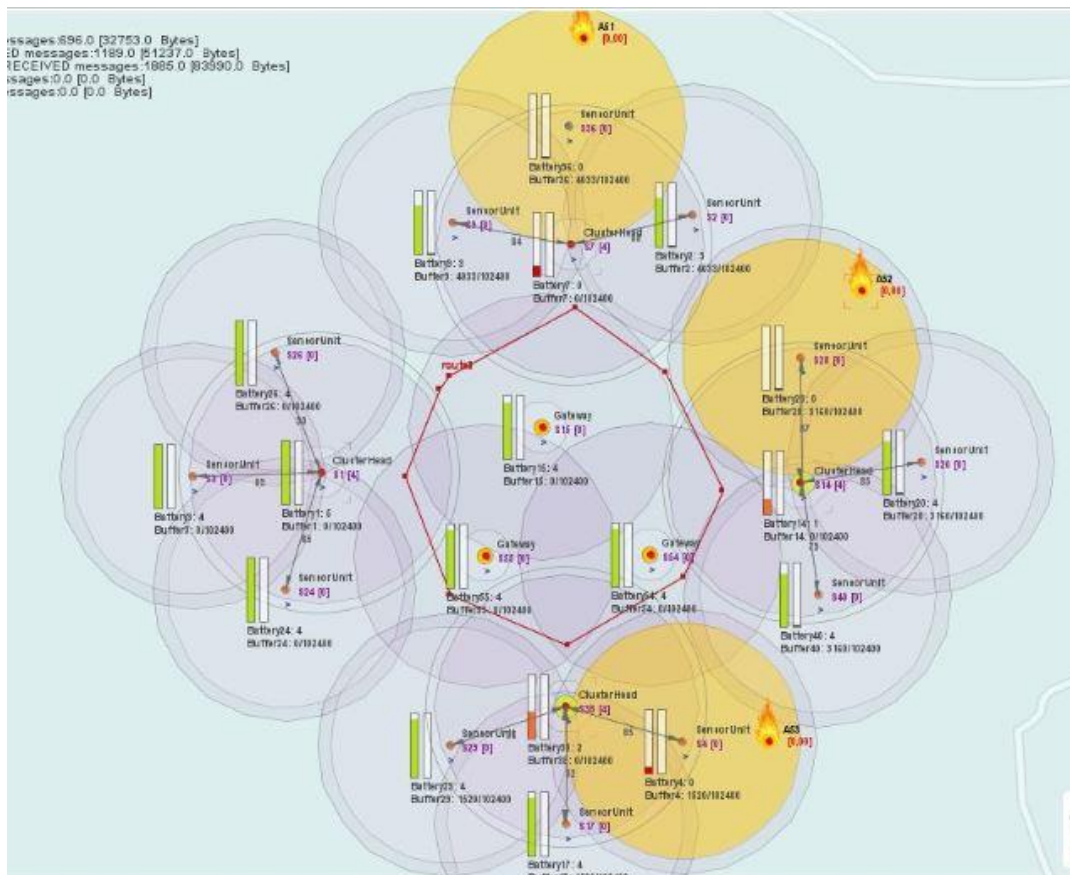
6.5.1 Τοποθέτηση και εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων UAV-WSN με τοπολογία Αστέρα

Προηγουμένως παρατηρήσαμε τη θεωρητική απεικόνιση της τοπολογίας αστέρα για ένα δίκτυο WSN με πρωτόκολλο ZigBee.

Παρακάτω έχουμε την απεικόνιση του δικτύου με χρήση της παραπάνω τοπολογίας, σχηματισμένο στον προσομοιωτή CupCarbon.

Θέλοντας να εξετάσουμε τη διάρκεια ζωής του δικτύου με χρήση της τοπολογίας αστέρα, τρέξαμε την προσομοίωση μέχρι να “πεθάνει” το πρώτο στοιχείο του δικτύου.

Παρατηρήθηκε ότι στη συγκεκριμένη τοπολογία, πρώτα “πεθαίνουν” τα αισθητήρια στοιχεία, κι έπειτα ακολουθούν οι κεφαλές των συστάδων. Η μεταβολή της ενέργειας στις πύλες είναι αμελητέα.



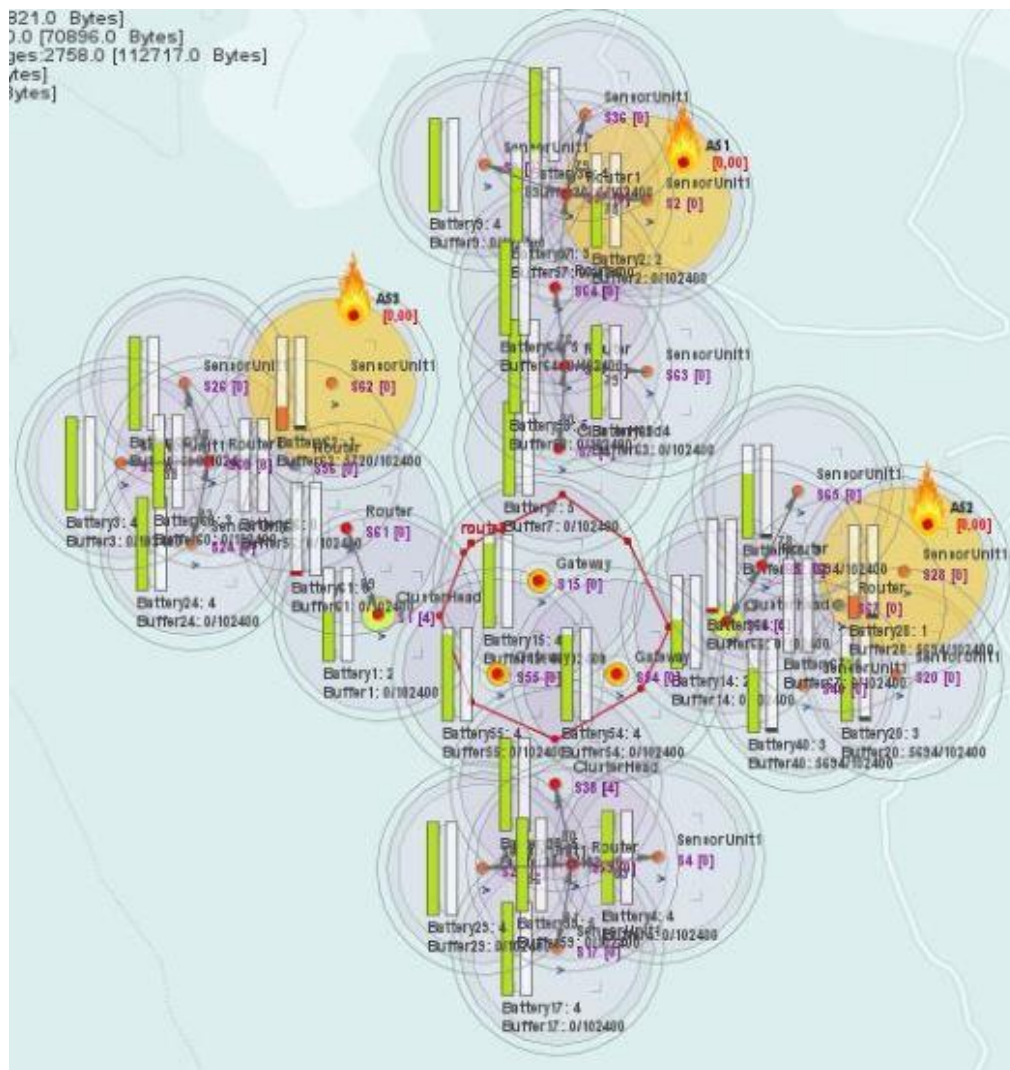
Εικόνα 42 - απεικόνιση της τοπολογίας αστέρα για ένα δίκτυο WSN με πρωτόκολλο ZigBee.

6.5.2 Τοποθέτηση και εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων UAV-WSN με τοπολογία Δέντρου

Έπειτα, θα δημιουργήσουμε ένα δίκτυο αισθητήρων στον προσομοιωτή CupCarbon το οποίο θα σχηματιστεί χρήση της τοπολογίας Δέντρου.

Τα στοιχεία της τοπολογίας δέντρου περιέχουν αισθητήρες, οι οποίοι επικοινωνούν με την κεφαλή της συστάδας που τους αναλογεί μέσω δρομολογητών.

Έτσι αυξάνεται η περιοχή κάλυψης του δικτύου, αλλά και η απόσταση των hops που κάνει ένα πακέτο μέχρι να παραδοθεί.



Εικόνα 43 - δίκτυο αισθητήρων στον προσομοιωτή CupCarbon χρήση της τοπολογίας Δέντρου.

Σε προηγούμενη ενότητα παρατηρήσαμε τη θεωρητική απεικόνιση της τοπολογίας δέντρου για ένα δίκτυο WSN με πρωτόκολλο ZigBee.

Παράλληλα, στην **Εικόνα 43** έχουμε την απεικόνιση του δικτύου με χρήση της παραπάνω τοπολογίας, σχηματισμένο στον προσομοιωτή CupCarbon.

Θέλοντας να εξετάσουμε τη διάρκεια ζωής του δικτύου με χρήση της τοπολογίας Δέντρου, τρέξαμε την προσομοίωση μέχρι να “πεθάνει” το πρώτο στοιχείο του δικτύου.

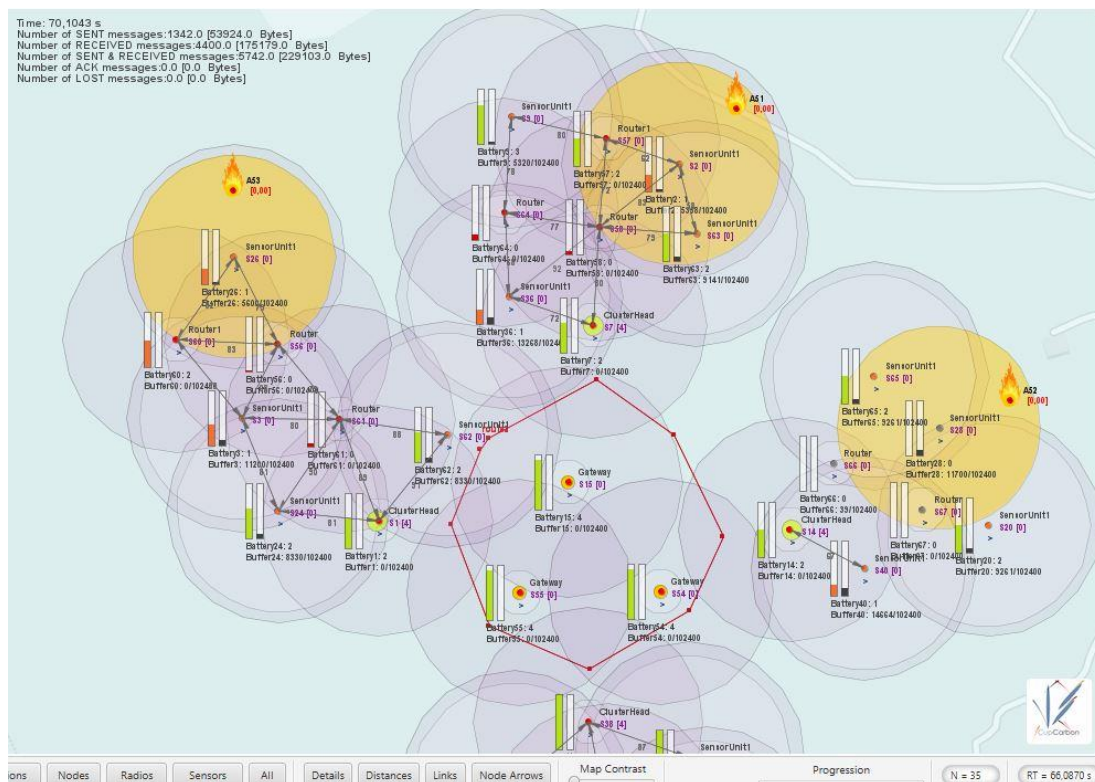
Παρατηρήθηκε ότι στη συγκεκριμένη τοπολογία, πρώτα “πεθαίνουν” οι δρομολογητές, κι έπειτα ακολουθούν οι αισθητήρες. Η μεταβολή της ενέργειας στις κεφαλές συστάδων και στις πύλες είναι αμελητέα.

6.5.3 Τοποθέτηση και εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων UAV-WSN με τοπολογία Πλέγματος

Τέλος, θα δημιουργήσουμε ένα δίκτυο αισθητήρων στον προσομοιωτή CupCarbon το οποίο θα σχηματιστεί χρήση της τοπολογίας Πλέγματος.

Τα στοιχεία της τοπολογίας πλέγματος περιέχουν αισθητήρες, οι οποίοι επικοινωνούν με την κεφαλή της συστάδας που τους αναλογεί μέσω δρομολογητών, οι οποίοι συνήθως περικλείουν την κεφαλή.

Έτσι αυξάνεται η εκτενής πύκνωση της περιοχή κάλυψης του δικτύου, αλλά και ο αριθμός των hops που κάνει ένα πακέτο μέχρι να παραδοθεί.



Εικόνα 44 - δίκτυο αισθητήρων στον προσομοιωτή CupCarbon χρήση της τοπολογίας Πλέγματος.

Σε προηγούμενη Ενότητα παρατηρούμε τη θεωρητική απεικόνιση της τοπολογίας πλέγματος για ένα δίκτυο WSN με πρωτόκολλο ZigBee.

Παράλληλα, στην Εικόνα 44 έχουμε την απεικόνιση του δικτύου με χρήση της παραπάνω τοπολογίας, σχηματισμένο στον προσομοιωτή CupCarbon.

Θέλοντας να εξετάσουμε τη διάρκεια ζωής του δικτύου με χρήση της τοπολογίας πλέγματος, τρέξαμε την προσομοίωση μέχρι να “πεθάνει” το πρώτο στοιχείο του δικτύου.

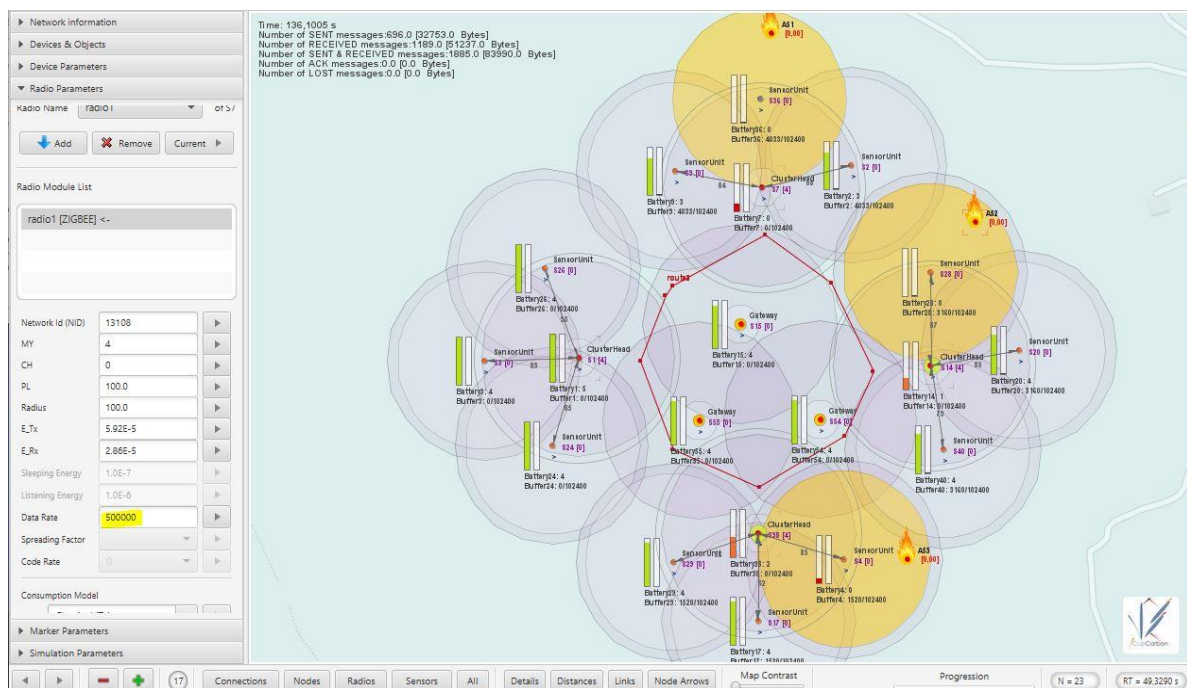
Παρατηρήθηκε ότι στη συγκεκριμένη τοπολογία όπως και στην προηγούμενη, πρώτα “πεθαίνουν” οι δρομολογητές, κι έπειτα ακολουθούν οι αισθητήρες και κατά σειρά οι κεφαλές συστάδων. Η μεταβολή της ενέργειας στις πύλες είναι αμελητέα.

Συμπεράσματα: Έπειτα από τον έλεγχο των προσομοιώσεων για κάθε τοπολογία ξεχωριστά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η τοπολογία αστέρα αρμόζει καλύτερα στο παράδειγμα που στοχεύσαμε να υλοποιήσουμε, καθώς διασφαλίζεται η μακροζωία του δικτύου σε σύγκριση με τις άλλες δύο εγκαταστάσεις.

6.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αλλαγή στο Data rate των κεφαλών συστάδων

Παρακάτω θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αρχικού σεναρίου με τοπολογία αστέρα, και τις διαφορές που θα συναντήσουμε ανεβάζοντας το data rate στις κεφαλές συστάδων.

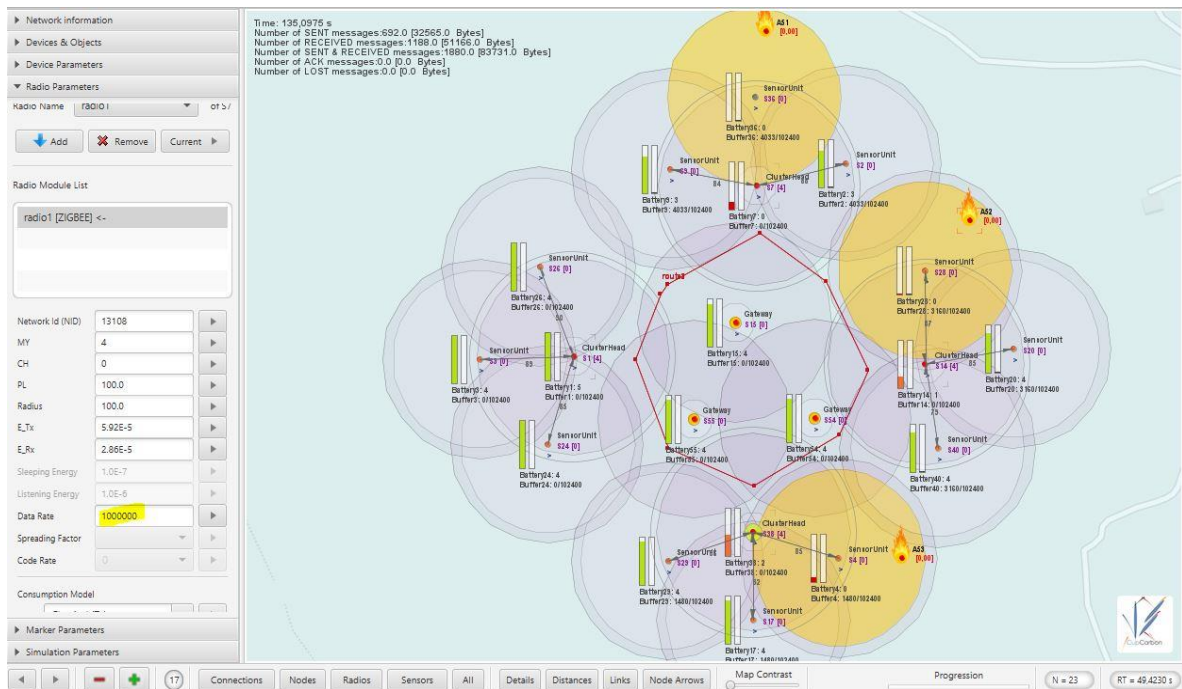
Αρχικά θα τρέξουμε την προσομοίωση ώσπου να “πεθάνει” το πρώτο στοιχείο του δικτύου και θα συγκρίνουμε τον αριθμό δεδομένων και το χρόνο για data rate = **500kbps**. Έπειτα με data rate = **1Mbps** και τέλος με **2Mbps**.



Εικόνα 45 - Σχήμα όπου φαίνεται η αλλαγή του Data Rate των κεφαλών στα 500 kbps μέσω της καρτέλας “Radio Parameters” της διεπαφής χρήστη του προσομοιωτή CupCarbon

Time: 136,1005 s
 Number of SENT messages:696.0 [32753.0 Bytes]
 Number of RECEIVED messages:1189.0 [51237.0 Bytes]
 Number of SENT & RECEIVED messages:1885.0 [83990.0 Bytes]
 Number of ACK messages:0.0 [0.0 Bytes]
 Number of LOST messages:0.0 [0.0 Bytes]

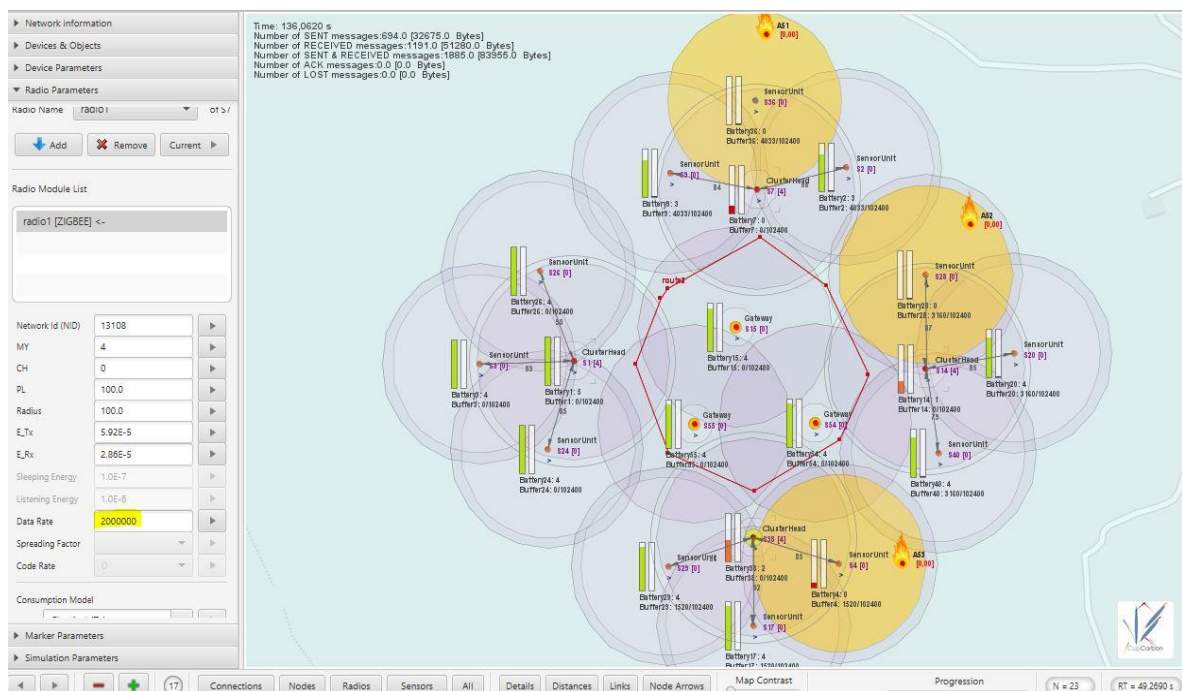
Εικόνα 46 - Αποτελέσματα προσομοίωσης



Εικόνα 47 - Σχήμα όπου φαίνεται η αλλαγή του Data Rate των κεφαλών στο 1 Mbps μέσω της καρτέλας “Radio Parameters” της διεπαφής χρήστη του προσομοιωτή CupCarbon

Time: 135.0975 s
 Number of SENT messages:692.0 [32565.0 Bytes]
 Number of RECEIVED messages:1188.0 [51166.0 Bytes]
 Number of SENT & RECEIVED messages:1880.0 [83731.0 Bytes]
 Number of ACK messages:0.0 [0.0 Bytes]
 Number of LOST messages:0.0 [0.0 Bytes]

Εικόνα 48 - Αποτελέσματα προσομοίωσης



Εικόνα 49 - Σχήμα όπου φαίνεται η αλλαγή του Data Rate των κεφαλών στα 2 Mbps μέσω της καρτέλας “Radio Parameters” της διεπαφής χρήστη του προσομοιωτή CupCarbon

```

Time: 136,0620 s
Number of SENT messages:694.0 [32675.0 Bytes]
Number of RECEIVED messages:1191.0 [51280.0 Bytes]
Number of SENT & RECEIVED messages:1885.0 [83955.0 Bytes]
Number of ACK messages:0.0 [0.0 Bytes]
Number of LOST messages:0.0 [0.0 Bytes]

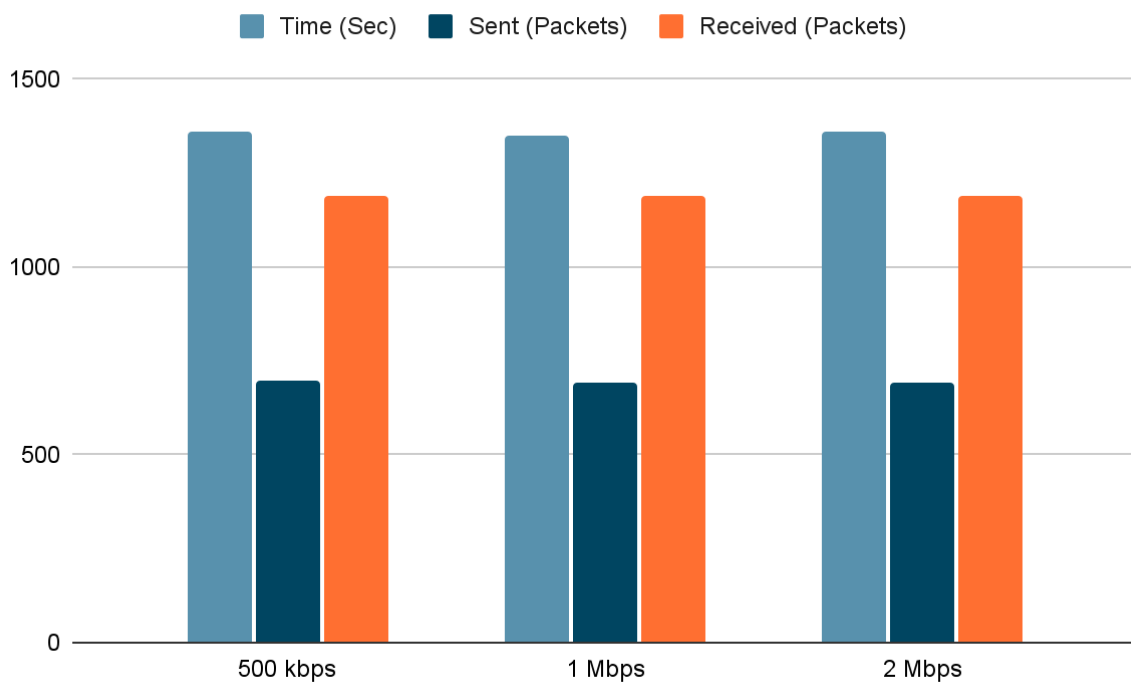
```

Εικόνα 50 - Αποτελέσματα προσομοίωσης

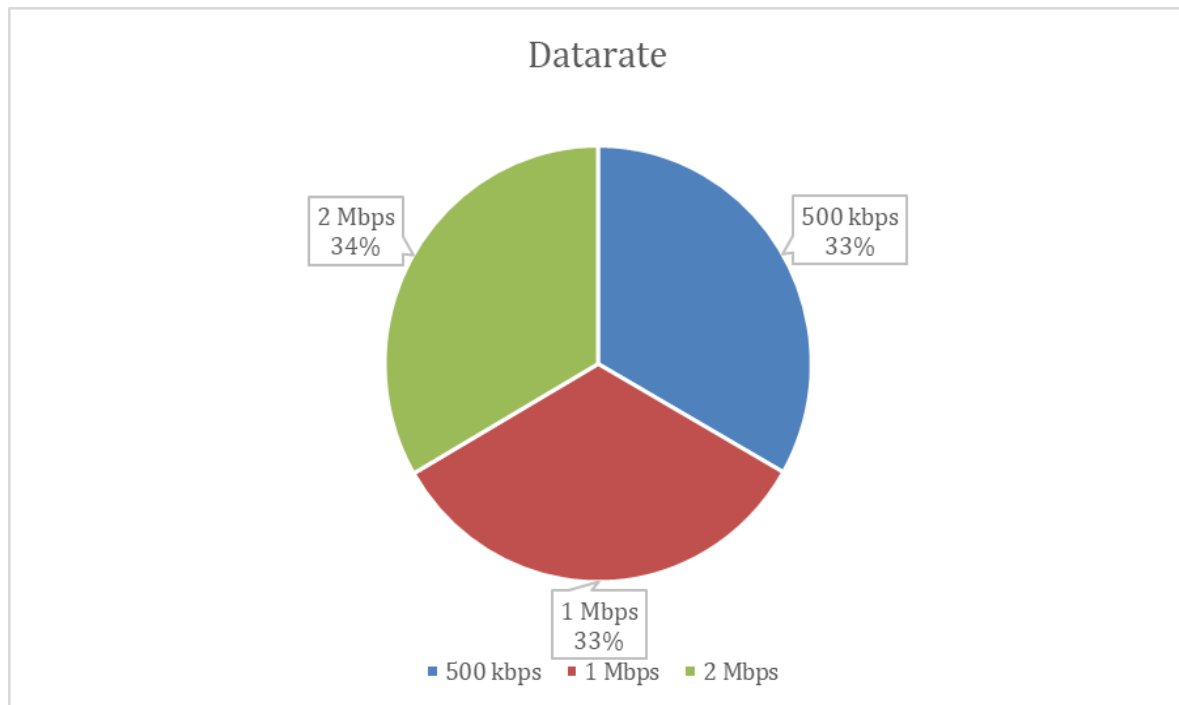
Έπειτα προβαίνουμε στη συγκέντρωση και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που αναρτήθηκαν παραπάνω με βάση την αλλαγή στο Datarate των κεφαλών συστάδων, στον παρακάτω πίνακα:

Data Rate	500 kbps	1 Mbps	2 Mbps
Time (Sec)	136.1005	135.0975	136.0620
Sent (Packets)	696.0	692.0	694.0
Received (Packets)	1189.0	1188.0	1191.0
Sent (Bytes)	32753.0	32565.0	32675.0
Received (Bytes)	51237.0	51166.0	51280.0

Πίνακας 3 - συγκέντρωση και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που αναρτήθηκαν παραπάνω με βάση την αλλαγή στο Datarate των κεφαλών συστάδων



Εικόνα 51 - Αποτελέσματα σε γράφημα



Εικόνα 52 - Αποτελέσματα κατά ποσοστιαία προσέγγιση

Αναλύοντας τα δεδομένα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα μας προσφέρει μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τη μεταβολή του ρυθμού μεταγωγής των δεδομένων μέχρι να “πεθάνει” πρώτο κάποιο στοιχείο, και αυτό οφείλεται στην έκταση της εγκατάστασης μας, για το αγροτεμάχιο το οποίο μελετήσαμε.

Αναλυτικά οι αποκλίσεις έχουν ως εξής:

- 500 kbps | 1 Mbps - 0.267166%
- 1 Mbps | 2 Mbps - 0.0416803%
- 2 Mbps | 500 kbps - 0.308846%

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. www.fria.gr
2. Αθανασίου Μ., Ξανθόπουλος Γ. Συμπεριφορά Δασικών Πυρκαγιών στην Ελλάδα: Χαρακτηριστικά και Πρόγνωση- Τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας του Τ.Ε.Ι Σερρών 2008.
3. <https://allsensors.com/en/>
4. <https://www.analog.com/en/index.html>
5. <https://eclass.emt.ihu.gr/modules/document/file.php>
6. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4.pdf>
7. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-8%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>
8. https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-9_Hanwei.pdf
9. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
10. Stefan Dulman, S. Chatterjea, Paul Havinga. Introduction to Wireless Sensor Networks - Institute of Electrical and Electronics Engineers January 2005
11. https://cupcarbon.com/cupcarbon_ug.html
12. Asim Zeb, A. K. M. Muzahidul Islam, Mahdi Zareei, Ishtiaq Al Mamoon, Nafees Mansoor, Sabariah Baharun, Yoshiaki Katayama, Shozo Komaki - Clustering Analysis in Wireless Sensor Networks: The Ambit of Performance Metrics and Schemes Taxonomy - International Journal of Distributed Sensor Networks May 2016
13. Ozdemir, S., Xiao, Y. Secure data aggregation in wireless sensor networks: a comprehensive overview – Computer Networks Volume 53, Issue 12, 13, Pages 2022-2037 August 2009
14. Rajagopalan, R., Varshney, P. K. Data aggregation techniques in sensor networks: a survey – IEEE Communications Surveys and Tutorials, VOLUME 8, NO. 4 January 2006
15. He, J., Ji, S., Pan, Y., Li, Y. Greedy construction of load-balanced virtual backbones in wireless sensor networks - 6th International Conference COCOA, LNTCS, volume 7402 May 2012
16. Maraiya, K., Kant, K., Gupta, N. Wireless sensor network: a review on data aggregation - International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 2, Issue 4, ISSN 2229-5518 April 2011
17. Lee, S., Younis, M., Lee, M. Connectivity restoration in a partitioned wireless sensor network with assured fault tolerance - Ad Hoc Networks 24(9):1–19 January 2015
18. Lee, S. H., Lee, S., Song, H., Lee, H. S. Gradual cluster head election for high network connectivity in large-scale sensor networks - Proceedings of the 13th International Conference on Advanced Communication Technology: Smart Service Innovation through Mobile Interactivity February 2011
19. Yu, M., Mokhtar, H., Merabti, M. A survey of network management architecture in wireless sensor network - Proceedings of the 6th Annual PostGraduate Symposium on The Convergence of Telecommunications January 2006
20. Younis, M., Senturk, I. F., Akkaya, K., Lee, S., Senel, F. Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: a survey on

Computer Networks - The Art of Wireless Sensor Networks (pp.273-311) December 2014

21. Freris, N. M., Kowshik, H., Kumar, P. R. Fundamentals of large sensor networks: connectivity, capacity, clocks, and computation - Proceedings of the IEEE 98(11):1828 – 1846 December 2010
22. Liu, A.-F., Zhang, P.-H., Chen, Z.-G. Theoretical analysis of the lifetime and energy hole in cluster based wireless sensor networks - Journal of Parallel and Distributed Computing 71(10):1327-1355 October 2011
23. Chen, G., Li, C., Ye, M., Wu, J. An unequal cluster-based routing protocol in wireless sensor networks - Wireless Networks 15(2):193-207 February 2009
24. Aziz, A. A., Sekercioglu, Y. A., Fitzpatrick, P., Ivanovich, M. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks – IEEE Communications Surveys & Tutorials 15(1):121-144 January 2013
25. Liao, Y., Qi, H., Li, W. Load-balanced clustering algorithm with distributed self-organization for wireless sensor networks - IEEE Sensors Journal 13(5):1498-150 May 2013
26. Sahin, D., Gungor, V. C., Kocak, T., Tuna, G. Quality-of-service differentiation in single-path and multi-path routing for wireless sensor network-based smart grid applications - Ad Hoc Networks 22(2) November 2014
27. Tapia, D. I., Alonso, R. S., García, Ó., de la Prieta, F., Pérez-Lancho, B. Cloud-IO: cloud computing platform for the fast deployment of services over wireless sensor networks - Advances in Intelligent Systems and Computing 172:493-504 January 2013
28. Xiaoyang Zhanga, Can Duana, Lin Liua, Xingde Lib, Huikai Xie - Sensors and Actuators A Physical 233(5):239-245 September 2015
29. Cao H.R., Yang Z., Yue X.J., Liu Y.X. An optimization method to improve the performance of unmanned aerial vehicle wireless sensor networks -International Journal of Distributed Sensor Networks April 2017
30. Puccinelli D., Haenggi M. Wireless sensor networks: Applications and challenges of ubiquitous sensing - IEEE Circuits Syst. Mag. February 2005
31. Popescu D., Dragana C., Stoican F., Ichim L., Stamatescu G. A collaborative UAV-WSN network for monitoring large areas - Sensors 18(12):4202 November 2018
32. Javier Andréu, Jaime Viúdez, Juan A. Holgado A survey of Wireless Sensor Network technologies – Conference: II Simposio en Desarrollo de Software June 2008
33. Lambrou, T.P. Panayiotou, C.G., A Survey on Routing Techniques Supporting Mobility in Sensor Networks, 5th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (WSN) December 2009
34. Akyildiz, I.F.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E. Wireless sensor networks: A survey - Computer Networks Volume 38, Issue 4, 15, Pages 393-422 March 2002
35. Ma, X.; Liu, T.; Liu, S.; Kacimi, R.; Dhaou, R. Priority-Based Data Collection for UAV-Aided Mobile Sensor Network. Sensors 20(11) May 2020
36. Al-Hourani, A.; Kandeepan, S.; Hossain, E. Relay-assisted device to device communication: A stochastic analysis of energy saving - IEEE Transactions on Mobile Computing 15(12) 3129–3141. January 2016