

Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Προηγμένα Συστήματα Πληροφορικής»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

| | |
|-----------------------|---|
| Τίτλος Διατριβής | Τεχνικές οργάνωσης δικτύων αισθητήρων με ενεργοποιητές (WSANs) |
| Όνοματεπώνυμο Φοιτητή | Ιωάννης Δημητρόπουλος |
| Πατρώνυμο | Αθανάσιος |
| Αριθμός Μητρώου | ΜΠΣΠ 08018 |
| Επιβλέπων | Χαράλαμπος Κωνσταντόπουλος, Λέκτορας |

Ημερομηνία Παράδοσης 14 - 07 - 2011

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

Όνομα Επώνυμο
Βαθμίδα

Όνομα Επώνυμο
Βαθμίδα

Όνομα Επώνυμο
Βαθμίδα

Χρήστος Δουληγέρης

Δημήτριος Βέργαδος

Χαράλαμπος Κωνσταντόπουλος

Καθηγητής

Λέκτορας

Λέκτορας

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές (Wireless Sensor Actor Networks - WSANs), αποτελούν εξέλιξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSNs). Ο συνδυασμός κόμβων αισθητήρων και κόμβων ενεργοποιητών, καθιστούν τα WSANs ικανά, να ανιχνεύουν διάφορα φυσικά φαινόμενα σε ένα πεδίο παρατήρησης, αλλά και να τα αντιμετωπίζουν. Η ανίχνευση των περιστατικών, πραγματοποιείται από τους αισθητήρες του WSAN, ενώ οι ενεργοποιητές είναι επιφορτισμένοι με την αντιμετώπιση τους. Τα δίκτυα αυτά, βρίσκουν πρακτική εφαρμογή στην καθημερινότητα του ανθρώπου, όπως για παράδειγμα στην ανίχνευση και κατάσβεση πυρκαγιών, και αποσκοπούν στην περαιτέρω βελτίωση της.

Στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή, καταβάλλεται προσπάθεια να παρουσιασθούν οι κυριότερες προκλήσεις που εμφανίζονται στα WSANs, καθώς και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα που υπάρχουν στην βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση τους. Οι προκλήσεις αυτές έχουν να κάνουν με ζητήματα, τοπολογίας των κόμβων του δικτύου, διαχείρισης της κινητικότητας των κόμβων, καθώς και επικοινωνίας και συντονισμού μεταξύ των αισθητήρων και των ενεργοποιητών του WSAN.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: WSAN, τοποθέτηση ενεργοποιητών, κινητικότητα ενεργοποιητών, συντονισμός, συσταδοποίηση.

Abstract

Wireless Sensor Actor Networks (WSANs) are the progress of Wireless Sensor Networks. The combination of sensors and actors, gives WSANs the opportunity to detect different kind of events in the observation field, and to act on them. Sensor nodes are responsible of the detection of the events, while actor nodes act on them. WSANs are used in different application in the everyday life of people, like fire detection and prevention, and aim to make it better.

In this master thesis, we are trying to present the main challenges in WSANs, along with the appropriate algorithms and protocols, which are presented in the bibliography. The challenges that we are investigate, are node topology issues, node mobility management, and communication and coordination between sensors and actors of WSANs.

KEY WORDS: WSAN, actor placement, actor mobility, coordination, clustering.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη..... | v |
| Abstract | vi |
| Ευχαριστίες | 2 |
| Εισαγωγή..... | 5 |
| Κεφάλαιο 1. Βασικές έννοιες | 7 |
| 1.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων | 8 |
| 1.1.1 Συστατικά μέρη WSN..... | 9 |
| 1.1.2 Βασικές κατηγορίες WSNs..... | 12 |
| 1.1.3 Παράγοντες σχεδίασης WSNs | 12 |
| 1.1.4 Πεδία εφαρμογής WSNs..... | 12 |
| 1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με Ενεργοποιητές | 13 |
| 1.2.1 Συστατικά μέρη WSN..... | 13 |
| 1.2.2 Βασικές αρχιτεκτονικές WSNs..... | 16 |
| 1.2.3 Χαρακτηριστικά WSNs | 17 |
| 1.2.4 Πεδία εφαρμογής WSNs..... | 18 |
| Κεφάλαιο 2. Προκλήσεις στα WSNs..... | 20 |
| 2.1 Προκλήσεις στο φυσικό επίπεδο | 21 |
| 2.2 Προκλήσεις στο επίπεδο MAC | 21 |
| 2.3 Προκλήσεις στο επίπεδο δικτύου..... | 22 |
| 2.3.1 Ζητήματα τοπολογίας | 22 |
| 2.3.2 Δρομολόγηση πακέτων..... | 23 |
| 2.3.3 Συντονισμός..... | 23 |
| 2.4 Προκλήσεις στο επίπεδο μεταφοράς..... | 27 |
| Κεφάλαιο 3. Τοποθέτηση Ενεργοποιητών | 30 |
| 3.1 Διάφοροι ορισμοί | 31 |
| 3.1.1 Ορισμός κάλυψης ενεργοποιητών | 31 |
| 3.1.2 Ορισμός αλγορίθμων συσταδοποίησης..... | 31 |
| 3.2 Μηχανισμός 1: COLA | 32 |
| 3.2.1 Αναλυτική παρουσίαση μηχανισμού COLA | 33 |
| 3.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα COLA..... | 38 |
| 3.3 Μηχανισμός 2: C ² AP | 39 |
| 3.3.1 Αναλυτική παρουσίαση μηχανισμού C ² AP | 40 |
| 3.3.2 Παρατηρήσεις – βελτιώσεις επί του μηχανισμού C ² AP | 47 |
| 3.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα C ² AP..... | 48 |
| 3.4 Μηχανισμός 3: Σταθερό ταίριασμα..... | 49 |
| 3.4.1 Αναλυτική παρουσίαση αλγορίθμου DGS..... | 50 |
| 3.4.2 Παρατηρήσεις – βελτιώσεις επί του αλγορίθμου DGS..... | 54 |

| | |
|---|-----|
| Κεφάλαιο 4. Διαχείριση κινητικότητας ενεργοποιητών | 57 |
| 4.1 Διάφοροι ορισμοί | 58 |
| 4.1.1 Αραιά συνδεδεμένο WSANs | 58 |
| 4.1.2 Κινούμενος ενεργοποιητής | 59 |
| 4.1.3 Αλγόριθμοι διαχείρισης κινητικότητας ενεργοποιητών | 60 |
| 4.2 Παρουσίαση στατικών αλγορίθμων | 61 |
| 4.2.1 Στατικός αλγόριθμος MM1 | 61 |
| 4.2.2 Στατικός αλγόριθμος MM2 | 69 |
| 4.3 Παρουσίαση δυναμικών αλγορίθμων | 75 |
| 4.3.1 Δυναμικός αλγόριθμος MM3 | 75 |
| 4.3.2 Προτεινόμενος δυναμικός αλγόριθμος | 75 |
| 4.4 Κινητικότητα στα WSNs | 78 |
| 4.4.1 Αναλυτική παρουσίαση μηχανισμού SenCar | 79 |
| Κεφάλαιο 5. Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών | 84 |
| 5.1 Διάφοροι ορισμοί | 85 |
| 5.1.1 Ορισμός συντονισμού μεταξύ αισθητήρων | 85 |
| 5.1.2 Ορισμός συντονισμού αισθητήρων – ενεργοποιητών | 85 |
| 5.2 Το πρωτόκολλο DEPR | 86 |
| 5.2.1 Αναλυτική παρουσίαση πρωτοκόλλου DEPR | 87 |
| 5.3 Συντονισμός με χάρτες αισθητήρων | 92 |
| 5.3.1 Δημιουργία χαρτών | 93 |
| 5.3.2 Συνάθροιση δεδομένων | 95 |
| 5.3.3 Μετάδοση κατά επίπεδα | 95 |
| 5.4 Συντονισμός με βάση τις συστάδες αισθητήρων | 96 |
| 5.4.1 Συσταδοποίηση δικτύου | 96 |
| 5.4.2 Επίτευξη συντονισμού | 97 |
| 5.5 Ενέργεια και καθυστέρηση κατά το συντονισμό | 99 |
| 5.5.1 Σύνθεση δικτύου | 99 |
| 5.5.2 Επίτευξη συντονισμού | 99 |
| Κεφάλαιο 6. Συντονισμός μεταξύ ενεργοποιητών | 103 |
| 6.1 Συντονισμός ενεργοποιητών μέσω δημοπρασίας | 104 |
| 6.1.1 Βασικές υποθέσεις - ορισμοί | 104 |
| 6.1.2 Η μέθοδος της δημοπρασίας | 105 |
| 6.2 Συντονισμός στα WSRNs | 106 |
| 6.2.1 Πρωτόκολλο k - SAP | 106 |
| 6.2.2 Πρωτόκολλο SAAP | 107 |
| 6.3 Συντονισμός ενεργοποιητών στο πλαίσιο CCR | 108 |
| 6.3.1 Υπερφορτωμένοι ενεργοποιητές | 108 |

| | |
|---|-----|
| 6.3.2 Ακάλυπτες περιοχές..... | 108 |
| 6.4 Ανάθεση καθηκόντων από τους αισθητήρες..... | 109 |
| 6.4.1 Σύνθεση δικτύου..... | 109 |
| 6.4.2 Μοντελοποίηση προβλήματος..... | 110 |
| 6.4.3 Intra – zone προγραμματισμός..... | 111 |
| 6.4.4 Inter – zone προγραμματισμός..... | 113 |
| Συμπεράσματα..... | 117 |
| Βιβλιογραφία..... | 119 |

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Ευχαριστίες

Μετά από μία πορεία τριών περίπου χρόνων στο Τμήμα Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πειραιώς, ολοκληρώνω το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Προηγμένα Συστήματα Πληροφορικής», με την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Στο σημείο αυτό, νιώθω έντονη την ανάγκη να ευχαριστήσω εκ βάθους, τον Λέκτορα του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πειραιώς, κ. Χαράλαμπο Κωνσταντόπουλο, κύριο επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής. Η βοήθειά του, η καθοδήγησή του, καθώς και οι εύστοχες παρατηρήσεις και διορθώσεις του, συντέλεσαν τα μέγιστα στο να καταφέρω να εκπονήσω την παρούσα εργασία.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και κατανόηση που επιδεικνύουν όλα αυτά τα χρόνια σπουδών μου, τόσο σε προπτυχιακό όσο και σε μεταπτυχιακό επίπεδο. Ιδιαίτερες ευχαριστίες, ανήκουν στην αγαπημένη μου αδερφή Γιούλη, για τη στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

ΓΑΛΕΡΙΟ ΤΕΡΑΤΑ

Στην οικογένειά μου

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή, είναι αφιερωμένη στη μελέτη των **Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων με Ενεργοποιητές (Wireless Sensor Actor / Actuator Networks - WSANs)**. Στα συγκεκριμένα δίκτυα, οι **αισθητήρες (sensors)** είναι επιφορτισμένοι με την παρακολούθηση μίας περιοχής. Ειδικότερα, παρατηρούν και ανιχνεύουν διάφορα περιστατικά που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο. Στη συνέχεια, αποστέλλουν, μέσω ασύρματων ζεύξεων, τις μετρήσεις τους στους **ενεργοποιητές (actors / actuators)** του δικτύου, οι οποίοι είναι επιφορτισμένοι με την δράση επί των καταγεγραμμένων συμβάντων. Τα δίκτυα αυτά, θα μας απασχολήσουν στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Βασικοί στόχοι της διατριβής αποτελούν, η αναλυτική παρουσίαση και η λειτουργία των WSANs, η παράθεση των βασικών προκλήσεων / προβλημάτων που εμφανίζονται στα δίκτυα αυτά, καθώς και η λεπτομερής παρουσίαση των πρωτοκόλλων και των αλγορίθμων που παρατίθενται στην βιβλιογραφία, για την αντιμετώπιση των εν λόγω προκλήσεων, μέσω κατάλληλων στιγμιότυπων εκτέλεσης και παραδειγμάτων. Παράλληλα, σε ορισμένες κατηγορίες προβλημάτων των WSANs, προτείνονται και νέες τεχνικές ή και βελτιώσεις επί των αλγορίθμων της βιβλιογραφίας.

Στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα όσα αναφέραμε παραπάνω. Ειδικότερα, η διατριβή ακολουθεί την παρακάτω δομή κεφαλαίων:

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αρχικά τα **Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks)**. Περιγράφεται η δομή τους, τα συστατικά τους μέρη, οι κατηγορίες τους καθώς και τα πεδία στα οποία εφαρμόζονται. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα ίδια στοιχεία για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές.

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην παράθεση των βασικών προκλήσεων / προβλημάτων που παρουσιάζονται στα WSANs. Η παρουσίαση ακολουθεί μία από κάτω προς τα πάνω προσέγγιση των προκλήσεων στην TCP/IP στοίβα πρωτοκόλλων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις προκλήσεις του επιπέδου δικτύου (Network Layer) της στοίβας, μιας και εκεί εμφανίζονται πολύ σημαντικά ζητήματα των WSANs, όπως ο συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, καθώς και ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύεται το πρόβλημα της κατάλληλης τοποθέτησης των ενεργοποιητών εντός του πεδίου παρατήρησης ενός WSAN. Ειδικότερα, παρουσιάζονται κατάλληλοι μηχανισμοί και αλγόριθμοι, οι οποίοι τοποθετούν τους ενεργοποιητές του δικτύου στο χώρο, με κύριο μέλημά τους την μεγιστοποίηση της κάλυψης (coverage) που παρέχουν οι τελευταίοι εντός του δικτύου. Παρατίθενται στιγμιότυπα εκτέλεσης των αλγορίθμων, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Σε ορισμένες τεχνικές, προτείνονται και ορισμένες βελτιώσεις που θα μπορούσαν πιθανώς να οδηγήσουν σε αύξηση της αποδοτικότητάς τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, μελετάται μία άλλη πτυχή των WSANs, αυτή της διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, σε πολλές εφαρμογές των WSAN, οι αισθητήρες, για λόγους που θα γίνουν κατανοητοί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, δεν έχουν τη δυνατότητα να ενημερώνουν τους ενεργοποιητές για τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο. Αντί αυτού, οι ενεργοποιητές επισκέπτονται τους αισθητήρες «ρωτώντας» τους για τυχόν περιστατικά που ανίχνευσαν. Η κίνηση αυτή των ενεργοποιητών καθώς και η σειρά με την οποία επισκέπτονται τους αισθητήρες, καθορίζεται από συγκεκριμένους αλγόριθμους, οι οποίοι μελετώνται σε αυτό το κεφάλαιο. Επίσης, προτείνεται και ένας καινούργιος αλγόριθμος για τον τρόπο επίσκεψης των ενεργοποιητών στους αισθητήρες του δικτύου.

Το πέμπτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο σε μία από τις βασικότερες προκλήσεις των WSANs. Πρόκειται για το **συντονισμό μεταξύ των αισθητήρων και των ενεργοποιητών** του δικτύου (**sensor – actor coordination**). Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται πρωτόκολλα και αλγόριθμοι, μέσω των οποίων ο αισθητήρες του WSAN επιλέγουν τους ενεργοποιητές στους οποίους θα αποστείλουν τα συμβάντα που εντόπισαν στην περιοχή ευθύνης τους.

Στο έκτο κεφάλαιο, ασχολούμαστε με μία άλλη πτυχή του συντονισμού. Πρόκειται για το **συντονισμό μεταξύ των ενεργοποιητών (actor – actor coordination)** του WSAN. Ειδικότερα, παρουσιάζονται πρωτόκολλα και αλγόριθμοι μέσω των οποίων οι ενεργοποιητές του δικτύου συνεργάζονται για να βγάλουν εις πέρας τα συμβάντα που εμφανίζονται στο δίκτυο.

Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη όλων των αλγορίθμων που παρουσιάζονται στην διατριβή, καθώς και οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνθεση της εργασίας.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Κεφάλαιο 1. Βασικές έννοιες

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μία εισαγωγή στα **Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN)**, καθώς και στην μετέπειτα εξέλιξή τους σε **Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με Ενεργοποιητές (Wireless Sensor Actor / Actuator Networks - WSAN)**.

Ειδικότερα, το πρώτο μέρος του κεφαλαίου αφιερώνεται στην μελέτη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα, θα παραθέσουμε τον ορισμό αυτών των δικτύων, θα μελετήσουμε τα συστατικά τους μέρη, τις βασικές τους κατηγορίες, τους παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίασή τους καθώς και τα πεδία στα οποία βρίσκουν εφαρμογή στη καθημερινή ζωή.

Όπως θα γίνει σαφές στη συνέχεια του κεφαλαίου, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, είναι επωμισμένα με το ρόλο της παρακολούθησης κάποιων φυσικών φαινομένων. Τα δίκτυα αυτά, καταγράφουν κάποια φυσικά φαινόμενα μέσα στο περιβάλλον στο οποίο δραστηριοποιούνται, χωρίς όμως να μπορούν να επέμβουν μέσα σε αυτό. Θα λέγαμε ότι ο ρόλος τους είναι πιο πολύ παθητικός, μιας και περιορίζεται στην καταγραφή φαινομένων και όχι στη δράση επί των φαινομένων που παρατηρούν.

Ο παραπάνω περιορισμός των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, έρχεται να ικανοποιηθεί από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές. Τα δίκτυα αυτά, όπως μαρτυρά και ο τίτλος τους, συνδυάζουν τόσο την παρακολούθηση κάποιων φαινομένων μέσα σε ένα περιβάλλον, όσο και την δράση επί των φαινομένων που καταγράφουν, μέσα από τα συστατικά τους μέρη.

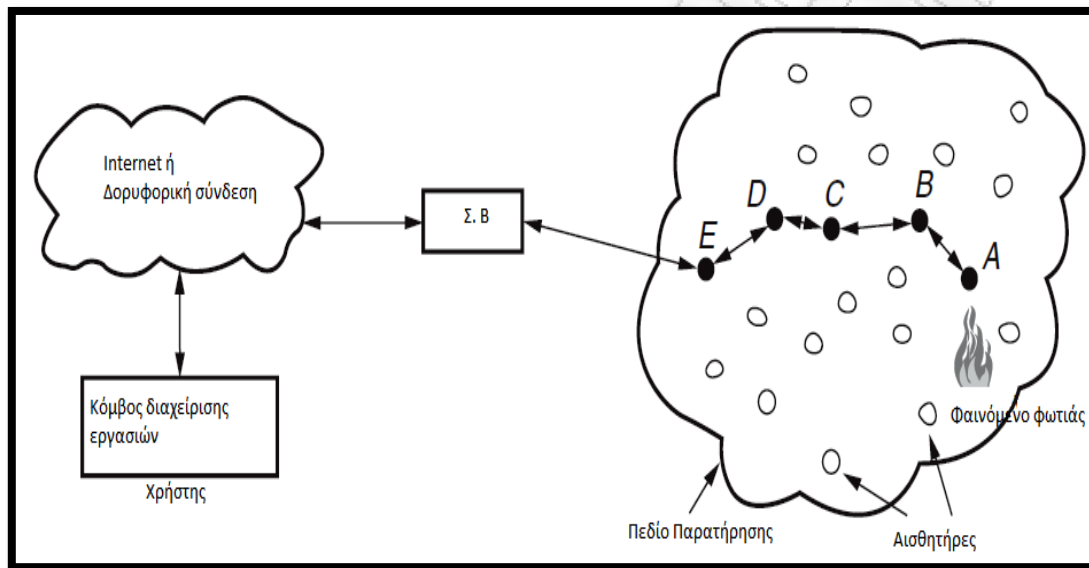
Το δεύτερο μέρος του παρόντος κεφαλαίου, αφιερώνεται εξολοκλήρου στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές. Ειδικότερα, θα δοθεί ο ορισμός αυτών των δικτύων, θα μελετηθούν, τα συστατικά στοιχεία από τα οποία απαρτίζονται, οι βασικές αρχιτεκτονικές τους, τα βασικά χαρακτηριστικά τους καθώς και τα πεδία στα οποία βρίσκουν πρακτική εφαρμογή.

1.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιών, έχει οδηγήσει στην εμφάνιση των **Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN)**, τα οποία χρησιμοποιούνται εν γένει στην παρακολούθηση διαφόρων φαινομένων.

Πιο συγκεκριμένα, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό (της τάξης των εκατοντάδων, χιλιάδων ή και εκατομμυρίων) **κόμβων αισθητήρων (sensor nodes)**, οι οποίοι τοποθετούνται **τυχαία** και σε **πυκνή** διάταξη, είτε μέσα στο φαινόμενο προς παρατήρηση, ή πάρα πολύ κοντά σε αυτό [1]. Οι αισθητήρες, καταγράφουν τα διάφορα φαινόμενα προς παρακολούθηση, και στέλνουν τις μετρήσεις τους σε ένα **σταθμό βάσης (Base Station - BS)** ή αλλιώς **καταβόθρα (sink)** μέσω **ασύρματης επικοινωνίας** [2]. Στη συνέχεια, κάποιος χρήστης με κατάλληλα προνόμια, μπορεί να διαχειριστεί τοπικά ή απομακρυσμένα μέσω internet ή δορυφορικής σύνδεσης, τα δεδομένα που αποθηκεύονται στον συγκεντρωτικό σταθμό βάσης, και να πράξει αναλόγως στο υπό επιτήρηση περιβάλλον.

Ένα στιγμιότυπο ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 1.1: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων [2].

Πιο συγκεκριμένα, στο παραπάνω δίκτυο, οι αισθητήρες παρατηρούν τη συγκεκριμένη περιοχή. Μόλις αντιληφθούν την ύπαρξη φωτιάς, μεταφέρουν την πληροφορία στο σταθμό βάσης (Σ.Β) μέσω ασύρματων μεταδόσεων (ο αισθητήρας A μεταδίδει την πληροφορία στον B, ο B στον C, ο C στον D, ο D στον E και ο E στον σταθμό βάσης). Στη συνέχεια ο χρήστης, μέσω internet ή δορυφορικής σύνδεσης, παρακολουθεί τον Σ.Β και εκκινεί τις απαραίτητες διαδικασίες για την κατάσβεση της φωτιάς μέσω του κόμβου διαχείρισης εργασιών. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι οι αισθητήρες απλά εντοπίζουν τη φωτιά και δεν έχουν τη δυνατότητα να προβούν σε κατάσβεσή της. Κάτι τέτοιο γίνεται κατόπιν εντολής του χρήστη σε κάποια άλλη οντότητα (για παράδειγμα ο χρήστης δίνει εντολή σε ένα πυροσβεστικό όχημα να μεταβεί στην περιοχή και να σβήσει τη φωτιά).

Παρατηρώντας με λεπτομέρεια την εικόνα 1.1, διαπιστώνει κανείς εύκολα, ότι το ασύρματο δίκτυο των αισθητήρων είναι ένα δίκτυο χωρίς **υποδομή (infrastructureless)**. Με άλλα λόγια, η επικοινωνία των αισθητήρων δε γίνεται μέσω κάποιου **Access Point (AP)**, αλλά αντιθέτως η επικοινωνία είναι **από σημείο σε σημείο (point to point)**. Το είδος αυτό της επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήρων, μας θυμίζει πολύ τα δίκτυα **ad-hoc**, παρόλα αυτά όμως, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων διαφέρει από τα ad-hoc δίκτυα στα παρακάτω σημεία [1]:

- Ο αριθμός των αισθητήρων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι πάρα πολλές φορές μεγαλύτερος σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων σε ένα ad-hoc δίκτυο.
- Οι αισθητήρες τοποθετούνται στο υπό παρακολούθηση περιβάλλον με πολύ μεγάλη πυκνότητα.
- Οι αισθητήρες είναι επιρρεπείς σε βλάβες.
- Η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων είναι πιθανό να αλλάξει μέσα στο χρόνο, μιας και υπάρχουν δίκτυα τόσο με σταθερούς (stable) όσο και με κινούμενους (mobile) αισθητήρες.

- Οι αισθητήρες έχουν περιορισμένα αποθέματα ενέργειας, χαμηλή υπολογιστική ισχύ και μικρή μνήμη.
- Οι αισθητήρες συνήθως δεν διαθέτουν ένα μοναδικό αναγνωριστικό (ID), που να τους ξεχωρίζει μεταξύ τους, όπως αντίθετα συμβαίνει στους κόμβους (υπολογιστές) ενός ad – hoc δικτύου.

1.1.1 Συστατικά μέρη WSN

Όπως είναι φανερό από την εικόνα 1.1, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων το οποίο είναι εγκατεστημένο σε ένα πεδίο παρατήρησης, αποτελείται από τα παρακάτω συστατικά μέρη:

1. Αισθητήρες (Sensor nodes).
2. Σταθμό βάσης - Σ.Β (Base station) ή καταβόθρα (Sink).
3. Τελικός χρήστης (User) ή κόμβος διαχείρισης εργασιών (Task manager node).

Η επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων είναι ασύρματη χρησιμοποιώντας ως μέσο μετάδοσης το κενό. Ο τελικός χρήστης, παρακολουθεί τα δεδομένα που αποθηκεύονται στο Σ.Β είτε τοπικά, είτε απομακρυσμένα μέσω δορυφορικής ή internet σύνδεσης.

Στις ενότητες που ακολουθούν, θα αναλύσουμε συνοπτικά τα παραπάνω συστατικά μέρη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

1.1.1.1 Αισθητήρες

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων, τους τύπους τους, τις κύριες λειτουργίες που επιτελούν στα πλαίσια ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, καθώς και τα συστατικά μέρη από τα οποία αποτελούνται.

Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

Η πρόοδος που έχει επιτευχθεί στον τομέα της μικροηλεκτρονικής και των ασύρματων επικοινωνιών, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των αισθητήρων. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των συσκευών, είναι τα παρακάτω [1], [2]:

- Είναι συσκευές χαμηλού κόστους.
- Λειτουργούν με μικρές ποσότητες διαθέσιμης ενέργειας (low - power).
- Έχουν πολύ μικρό μέγεθος (της τάξης λίγων κυβικών εκατοστών).
- Είναι **αυτόνομες** συσκευές (**autonomous**). Με άλλα λόγια, οι αισθητήρες τοποθετούνται στο πεδίο επιτήρησης, και λειτουργούν χωρίς την επίβλεψη/επιτήρηση κάποιου χρήστη.
- Μπορεί να είναι **στατικοί (static)** ή **κινούμενοι (mobile)** στο πεδίο παρατήρησης.
- Έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας σε μικρές αποστάσεις.

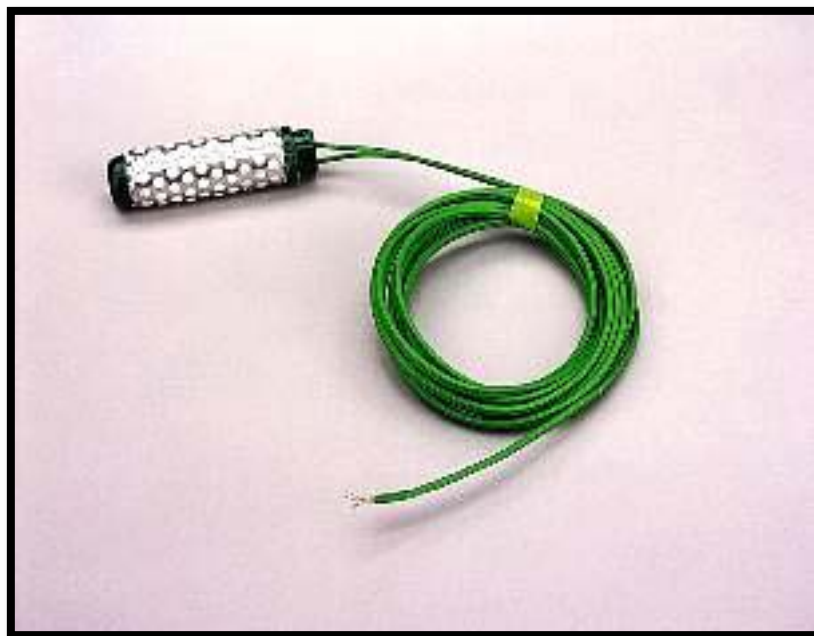
Τύποι αισθητήρων

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, μπορεί να υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων, όπως σεισμικοί (seismic), θερμικοί (thermal), οπτικοί (visual), υπέρυθροι (infrared), ακουστικοί (acoustic), καθώς και αισθητήρες ραντάρ (radar) [1].

Οι παραπάνω τύποι αισθητήρων, μπορούν να παρατηρήσουν και να καταγράψουν μία μεγάλη ποικιλία παραμέτρων μέσα σε ένα περιβάλλον. Οι παράμετροι αυτές, είναι οι παρακάτω [2], [3]:

- Θερμοκρασία.
- Υγρασία.
- Κίνηση οχημάτων.
- Κατάσταση φωτισμού μίας περιοχής.
- Πίεση.
- Επίπεδο θορύβου.
- Ταχύτητα ανέμου.
- Σύνθεση εδάφους.
- Σεισμικές δονήσεις.
- Οι αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι σε διάφορα κινούμενα αντικείμενα, μπορούν να καταγράψουν την ταχύτητα, την κατεύθυνση καθώς και το μέγεθος αυτών των αντικειμένων.

Παρακάτω, ακολουθούν ορισμένες εικόνες με διάφορους τύπους αισθητήρων.



Εικόνα 1.2: Αισθητήρας μέτρησης υγρασίας εδάφους [4].



Εικόνα 1.3: Αισθητήρας καταμέτρησης θερμοκρασίας αέρος, εδάφους και νερού [4].



Εικόνα 1.4: Αισθητήρας καταμέτρησης ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου [4].

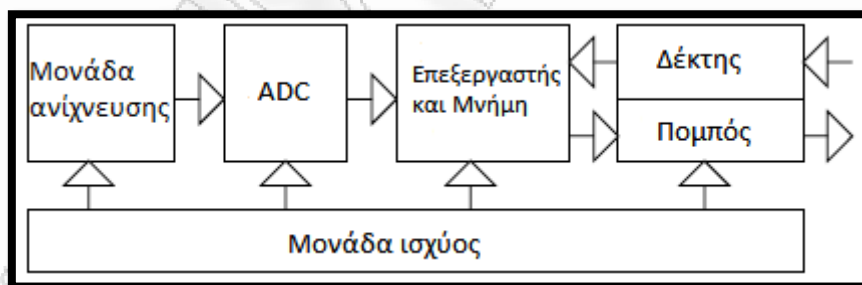
Λειτουργίες αισθητήρων

Οι κύριες λειτουργίες ενός αισθητήρα, ο οποίος είναι τοποθετημένος σε ένα πεδίο παρατήρησης, είναι οι παρακάτω [1]:

1. Αρχικά, ο αισθητήρας είναι επιφορτισμένος με το ρόλο της **ανίχνευσης (sensing)** των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο παρατήρησής του.
2. Επιπλέον, ο αισθητήρας, μπορεί να κάνει μία μικρή και γρήγορη **επεξεργασία (processing)**, τόσο στα δεδομένα που συλλέγει, όσο και στα δεδομένα που λαμβάνει από άλλους αισθητήρες του δικτύου.
3. Τέλος, ο αισθητήρας έχει τη δυνατότητα **μετάδοσης (transmit)** των δεδομένων που συλλέγει, είτε σε άλλους αισθητήρες, είτε στον Σ.Β. Διαθέτει δηλαδή, δυνατότητες **επικοινωνίας (communication capabilities)**.

Συστατικά μέρη αισθητήρων

Τα συστατικά μέρη ενός αισθητήρα, φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.5: Συστατικά μέρη αισθητήρα [5].

Πιο συγκεκριμένα, ένας αισθητήρας, αποτελείται από τη μονάδα ισχύος (μπαταρία), τη μονάδα ανίχνευσης (sensing unit), τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (Analog to Digital Converter-ADC), τον επεξεργαστή, τη μνήμη, τον πομπό και τον δέκτη [5].

Αρχικά, ο αισθητήρας ανιχνεύει τα διάφορα φαινόμενα μέσω της μονάδας ανίχνευσης. Τα δεδομένα αυτά, που βρίσκονται σε αναλογική μορφή, μετατρέπονται σε ψηφιακή μέσω της μονάδας ADC. Στη συνέχεια επεξεργάζονται από τον επεξεργαστή του αισθητήρα και αποθηκεύονται στη μνήμη του. Τέλος, τα δεδομένα στέλνονται προς άλλους αισθητήρες μέσω του πομπού. Ο δέκτης χρησιμοποιείται για τη λήψη μηνυμάτων από άλλους αισθητήρες.

1.1.1.2 Σταθμός βάσης

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες, καταλήγουν σε έναν σταθμό βάσης (base station) ή καταβόθρα (sink). Πρόκειται στην ουσία για έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο συγκεντρώνονται

όλες οι μετρήσεις των αισθητήρων και υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία. Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, μπορεί να συνυπάρχουν παραπάνω από έναν σταθμοί βάσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο σταθμός βάσης είναι στατικός, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις δικτύων στις οποίες είναι κινούμενος.

1.1.1.3 Τελικός χρήστης

Ο τελικός χρήστης ή κόμβος διαχείρισης εργασιών, έχει πρόσβαση στον σταθμό βάσης. Διαχειρίζεται και αναλύει τα αποθηκευμένα δεδομένα, και είναι υπεύθυνος για την αρχικοποίηση ενεργειών/εργασιών στο υπό επιτήρηση περιβάλλον.

1.1.2 Βασικές κατηγορίες WSNS

Ανάλογα με τη διαδρομή που ακολουθούν τα δεδομένα των αισθητήρων με προορισμό τον Σ.Β, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. **Single-Hop** WSNS.
2. **Multihop** WSNS.

Στα single-hop δίκτυα αισθητήρων, οι μετρήσεις των αισθητήρων στέλνονται κατευθείαν, μέσω ασύρματης ζεύξης προς τον Σ.Β [2]. Πιο συγκεκριμένα, ο Σ.Β βρίσκεται εντός της εμβέλειας των αισθητήρων, με αποτέλεσμα οι τελευταίοι να μεταδίδουν τα δεδομένα τους απευθείας σε αυτόν, χωρίς να χρειάζεται η διαμεσολάβηση ενδιάμεσων κόμβων-δρομολογητών (αισθητήρες).

Αντιθέτως, στα multihop δίκτυα αισθητήρων, οι αισθητήρες είναι διασκορπισμένοι σε πυκνή διάταξη εντός του πεδίου παρατήρησης. Οι μετρήσεις των αισθητήρων, δε στέλνονται απευθείας προς τον Σ.Β. Αντιθέτως, στέλνονται προς άλλους αισθητήρες, μέχρις ότου, ο τελικός αισθητήρας που περιέχει στην εμβέλειά του τον Σ.Β, να στείλει τις μετρήσεις στον Σ.Β [2]. Με άλλα λόγια, στα δίκτυα αυτά, οι αισθητήρες παίζουν και το ρόλο των δρομολογητών, μιας και είναι επιφορτισμένοι με τη δρομολόγηση πακέτων άλλων αισθητήρων προς τον Σ.Β. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας, αποτελεί το δίκτυο που απεικονίζεται στην εικόνα 1.1.

Η πυκνή διάταξη των αισθητήρων στα multihop δίκτυα αισθητήρων, έχει ως αποτέλεσμα, οι γειτονικοί αισθητήρες να βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο οδηγεί σε χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, κατά τη διάρκεια αποστολής ενός πακέτου δεδομένων από ένα αισθητήρα στον άλλον [1]. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα των multihop δικτύων αισθητήρων έναντι των single-hop δικτύων.

1.1.3 Παράγοντες σχεδίασης WSNS

Κατά τη σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω παράγοντες [1]:

- Η ανοχή των αισθητήρων όσον αφορά τα διάφορα σφάλματα (fault tolerance).
- Η επεκτασιμότητα (scalability) του δικτύου.
- Το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί το δίκτυο (πεδίο παρατήρησης).
- Η κατανάλωση ενέργειας από τους αισθητήρες.
- Το μέσο μετάδοσης.

Οι παραπάνω παράγοντες είναι ιδιαίτερα σημαντικοί, διότι λειτουργούν ως οδηγοί (guidelines) κατά τη σχεδίαση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [1].

1.1.4 Πεδία εφαρμογής WSNS

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εφαρμόζονται σε πολλούς τομείς της σύγχρονης ζωής. Μερικοί από αυτούς τους τομείς, είναι οι παρακάτω:

- **Περιβάλλον.** Ειδικότερα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση πυρκαγιών σε δασικές εκτάσεις, στην πρόβλεψη πλημμύρων, στην μέτρηση διαφόρων ουσιών του εδάφους όπως pH, αμμωνία κ.α. για αγροτικές εφαρμογές, την καταμέτρηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο, και γενικότερα στην παρακολούθηση των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν την ατμόσφαιρα και το κλίμα της γης.
- **Υγεία.** Στο τομέα της υγείας, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρακολούθηση διαφόρων δεικτών υγείας όπως καρδιακοί παλμοί, πίεση κ.α. των ασθενών. Οι τιμές αυτές λαμβάνονται από αισθητήρια όργανα που φέρουν πάνω τους οι ασθενείς, και στέλνονται ασύρματα σε ένα κεντρικό υπολογιστή (Σ.Β). Στη συνέχεια, ο

υπεύθυνος γιατρός, μελετά τα συλλεγόμενα δεδομένα, προβλέπει πιθανές μελλοντικές δυσλειτουργίες των ασθενών, καθορίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κατάλληλη φαρμακευτική αγωγή, και γενικότερα έχει στη διάθεσή του ένα λεπτομερές ιατρικό ιστορικό του εκάστοτε ασθενή.

- **Στρατιωτικές επιχειρήσεις.** Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, βρίσκουν πολύ μεγάλη εφαρμογή στο πεδίο των στρατιωτικών επιχειρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση ναρκών και τον εντοπισμό εχθρικών δυνάμεων μέσα σε ένα πεδίο παρατήρησης. Επίσης χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και επιτήρηση στρατιωτικού εξοπλισμού καθώς και στην αποτίμηση ζημιών μετά από πολεμικές επιχειρήσεις.
- **Εμπορικές εφαρμογές.** Τέλος, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, χρησιμοποιούνται σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές, όπως στα έξυπνα σπίτια (για παράδειγμα έλεγχος θερμοκρασίας σπιτιού μέσω WSN) και στην παρακολούθηση χώρων για τον εντοπισμό τυχόν εισβολέων.

1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με Ενεργοποιητές

Όπως αναλύσαμε στην ενότητα 1.1, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στην παρατήρηση και την καταγραφή διαφόρων φαινομένων, μέσα σε ένα πεδίο παρατήρησης. Δεν έχουν όμως τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης μέσα στο περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν. Την αδυναμία αυτή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έρχονται να καλύψουν τα **ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές (Wireless Sensor Actor/Actuator networks - WSANs)**. Ουσιαστικά, τα δίκτυα αυτά αποτελούν την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων [2].

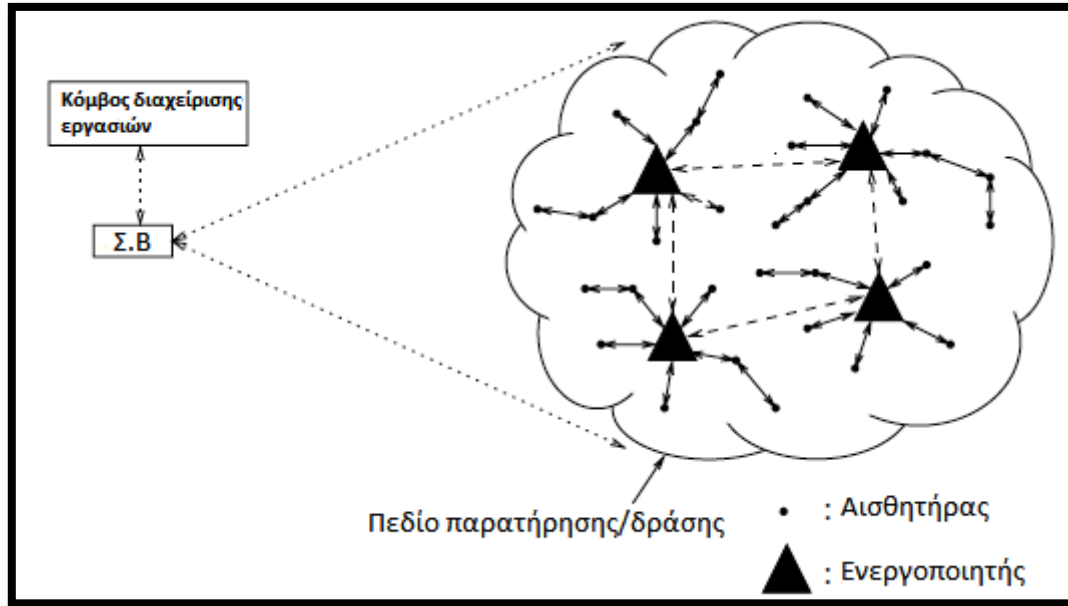
Πιο συγκεκριμένα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές, έχουν τη δυνατότητα [5] να παρατηρούν ένα φυσικό περιβάλλον, να επεξεργάζονται τα συλλεγόμενα δεδομένα, να παίρνουν αποφάσεις βάσει των συλλεγόμενων μετρήσεων και τελικά να προχωρούν σε ενέργειες/δράσεις στο υπό επιτήρηση περιβάλλον. Καταυτόν τον τρόπο λοιπόν, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές επιτελούν διπλό ρόλο. Αρχικά ανιχνεύουν ένα φαινόμενο εντός του πεδίου παρατήρησης, και εν συνεχεία αλληλεπιδρούν με αυτό.

Για να μπορέσουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές να επιτελέσουν τον διπλό τους ρόλο, είναι εφοδιασμένα με ένα επιπλέον συστατικό στοιχείο, εν συγκρίσει με τα απλά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Πρόκειται για τους **ενεργοποιητές (actors ή actuators)**. Ειδικότερα [5], οι αισθητήρες ανιχνεύουν τα διάφορα φαινόμενα, και οι ενεργοποιητές δρουν επί των φαινομένων. Οι ενεργοποιητές επικοινωνούν μεταξύ τους κατά τον ίδιο τρόπο που επικοινωνούν οι κόμβοι σε ένα ad-hoc δίκτυο. Συνεπώς, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ενεργοποιητές, θεωρείται ως η ένωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των ad-hoc δικτύων [5].

Στις ενότητες που ακολουθούν, θα παρουσιάσουμε με λεπτομέρεια τα συστατικά μέρη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με ενεργοποιητές, τις βασικές αρχιτεκτονικές τους, τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους καθώς και τα πεδία εφαρμογής τους.

1.2.1 Συστατικά μέρη WSAN

Ένα τυπικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ενεργοποιητές, παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.6: Τυπικό WSN [5].

Πιο συγκεκριμένα, το παραπάνω δίκτυο αποτελείται από μία ομάδα κόμβων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων μέσα στο πεδίο παρατήρησης, καθώς και από τους ενεργοποιητές (actors) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να δρουν πάνω στα διάφορα φαινόμενα. Η επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων και των ενεργοποιητών γίνεται μέσω **ασύρματων ζευξέων**. Στα περισσότερα WSNs, οι αισθητήρες είναι συνήθως στατικοί, ενώ οι ενεργοποιητές έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν θέσεις (mobile).

Όπως είναι φανερό από την εικόνα 1.6, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, μπορεί να υπάρχει και ένας κόμβος που παίζει το ρόλο του σταθμού βάσης (Σ.Β) καθώς και ένας κόμβος διαχείρισης εργασιών. Ο Σ.Β [5] ελέγχει την όλη λειτουργία του δικτύου και επικοινωνεί τόσο με τον κόμβο διαχείρισης εργασιών όσο και με τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές, έχουν τη δυνατότητα να διοργανώνονται στο χώρο από μόνα τους (**self-organized**) και να λειτουργούν **αυτόνομα (autonomous)** χωρίς να χρειάζονται την ύπαρξη Σ.Β και κάποιου τελικού χρήστη που θα έχει το ρόλο του διαχειριστή εργασιών [2]. Συνεπώς, η ύπαρξη Σ.Β και κόμβου διαχείρισης εργασιών, είναι πολλές φορές προαιρετική στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές.

Στην επόμενη υποενότητα που ακολουθεί, θα αναλύσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια μόνο τους ενεργοποιητές, μιας και τα υπόλοιπα συστατικά μέρη των WSNs είναι κοινά με αυτά των WSNs και έχουν παρουσιαστεί στην ενότητα 1.1.1.

1.2.1.1 Ενεργοποιητές

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των ενεργοποιητών, τις κύριες λειτουργίες που επιτελούν μέσα στο δίκτυο καθώς και τα συστατικά μέρη από τα οποία αποτελούνται.

Βασικά χαρακτηριστικά ενεργοποιητών

Τα βασικά χαρακτηριστικά των ενεργοποιητών, είναι τα παρακάτω:

- Πρόκειται για συσκευές με δυνατότερη επεξεργαστική ισχύ σε σχέση με τους αισθητήρες [5].
- Μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα σε μεγαλύτερες αποστάσεις (high transmission power) σε σχέση με τους αισθητήρες [5].
- Διαθέτουν μεγαλύτερα αποθέματα ενέργειας σε σχέση με τους αισθητήρες. Χρησιμοποιούν δηλαδή, μπαταρίες μεγαλύτερης διάρκειας [5].
- Είναι συνήθως **κινούμενοι (mobile actors)** μέσα στο πεδίο παρατήρησης του WSN.

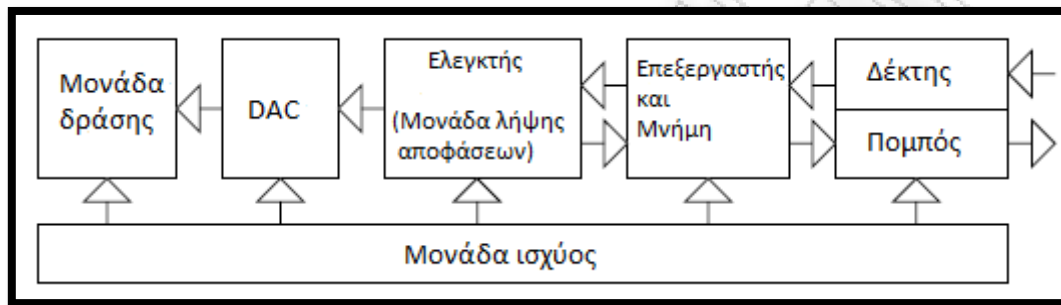
Λειτουργίες ενεργοποιητών

Οι βασικές λειτουργίες ενός ενεργοποιητή στα πλαίσια ενός WSN, συνοψίζονται στα παρακάτω:

1. Αρχικά, ο ενεργοποιητής μπορεί να **επικοινωνεί** τόσο με τους αισθητήρες, για να λαμβάνει τα παρατηρημένα φαινόμενα, όσο και με τους υπόλοιπους ενεργοποιητές του δικτύου, για να αποφασίζουν από κοινού το πώς ακριβώς θα πράξουν για να περαιώσουν τα διάφορα συμβάντα στο δίκτυο.
2. Η πλέον βασική αρμοδιότητα του ενεργοποιητή, είναι η **λήψη αποφάσεων** σχετικά με τα παρατηρημένα φαινόμενα και φυσικά η εκτέλεση αυτών των αποφάσεων μέσω συγκεκριμένων **δράσεων**. Όπως ακριβώς μαρτυρά και ο όρος, ένας ενεργοποιητής προορίζεται να **ενεργεί** πάνω στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο.

Συστατικά μέρη ενεργοποιητών

Για να είναι σε θέση ο ενεργοποιητής να εκτελεί τις παραπάνω λειτουργίες, αποτελείται από συγκεκριμένα συστατικά μέρη. Τα μέρη αυτά παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.7: Συστατικά μέρη ενεργοποιητή [5].

Πιο συγκεκριμένα, ένας ενεργοποιητής αποτελείται από την μονάδα ισχύος (μπαταρία), το πομπό και δέκτη για την επικοινωνία με άλλους ενεργοποιητές και αισθητήρες, τον επεξεργαστή και τη μνήμη για την επεξεργασία και αποθήκευση μηνυμάτων, τη μονάδα λήψης αποφάσεων-ελεγκτής (Decision Unit-Controller), τον μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (Digital to Analog Converter-DAC) καθώς και τη μονάδα δράσης (Actuation Unit).

Αρχικά ο ενεργοποιητής λαμβάνει τα δεδομένα από τους αισθητήρες μέσω του δέκτη του. Στη συνέχεια, η μονάδα λήψης αποφάσεων-ελεγκτής, λαμβάνει στην είσοδό του τα δεδομένα των αισθητήρων και παράγει στην έξοδό του **εντολές δράσεις (action commands)**. Αυτές οι εντολές δράσεις μετατρέπονται σε αναλογικά σήματα μέσω του DAC. Τέλος, τα αναλογικά σήματα, μεταφράζονται σε **πράξεις** μέσω της μονάδας δράσης. Έτσι, ο ενεργοποιητής, ενεργεί στο υπό επιτήρηση περιβάλλον [5].

Υβριδικοί ενεργοποιητές

Εκτός από τους ενεργοποιητές που παρουσιάσαμε παραπάνω, υπάρχουν κάποιες υβριδικές συσκευές που επιτελούν το ρόλο τόσο των αισθητήρων όσο και των ενεργοποιητών. Συνήθως τέτοιες συσκευές είναι τα ρομπότ (robot) [5]. Αυτές οι συσκευές, έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν με δικά τους αισθητήρια όργανα τα διάφορα φαινόμενα, αλλά και να δρουν επί των φαινομένων. Ακολουθεί μία εικόνα ενός ρομπότ, κατάλληλο για στρατιωτικές επιχειρήσεις.

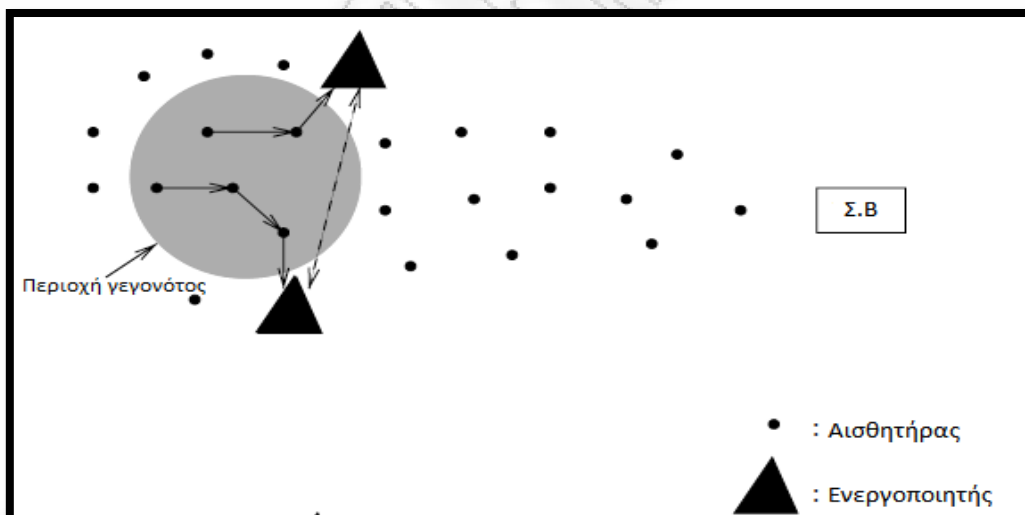


Εικόνα 1.8: Ρομπότ στρατιωτικών επιχειρήσεων [5].

1.2.2 Βασικές αρχιτεκτονικές WSANs

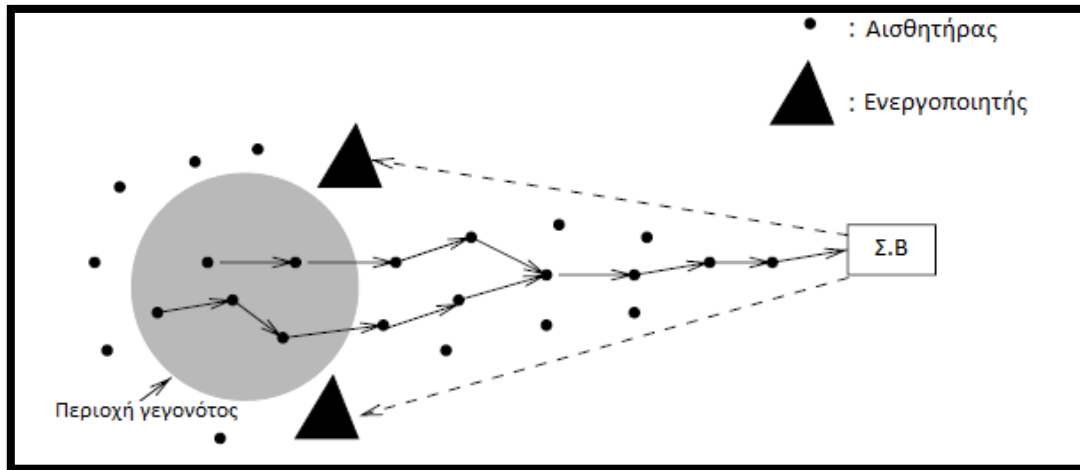
Ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι κεντρικού σταθμού βάσης, υπάρχουν τρεις βασικές αρχιτεκτονικές ασύρματων δικτύων αισθητήρων με ενεργοποιητές.

Η πρώτη αρχιτεκτονική ονομάζεται **αυτοματοποιημένη αρχιτεκτονική (Automated Architecture)** [5]. Σε αυτή τη περίπτωση, οι αισθητήρες που εντοπίζουν κάποιο φαινόμενο στην περιοχή τους, ενημερώνουν απευθείας τους ενεργοποιητές, οι οποίοι με τη σειρά τους δρουν επί των φαινομένων. Ουσιαστικά, ο Σ.Β δεν έχει καμία συμμετοχή στην όλη διαδικασία. Η αρχιτεκτονική αυτή, παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



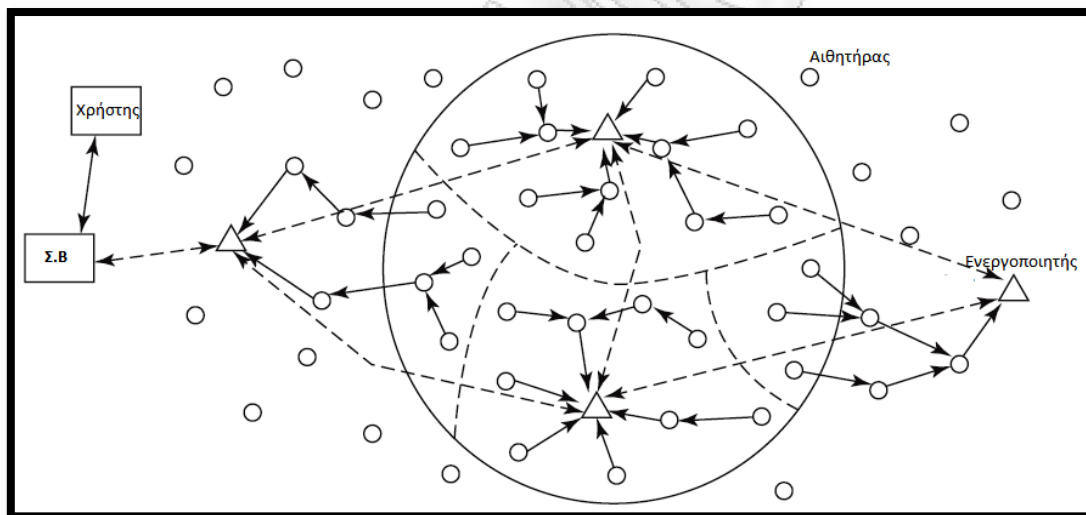
Εικόνα 1.9: Αυτοματοποιημένη αρχιτεκτονική [5].

Η δεύτερη αρχιτεκτονική ονομάζεται **ημί-αυτοματοποιημένη αρχιτεκτονική (Semi-Automated Architecture)** [5]. Σε αυτή τη περίπτωση, οι αισθητήρες μεταδίδουν τις μετρήσεις τους προς τον κεντρικό Σ.Β, και αυτός με τη σειρά του δίνει εντολές στους ενεργοποιητές να δράσουν αναλόγως. Η αρχιτεκτονική αυτή, παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.10: Ημί-αυτοματοποιημένη αρχιτεκτονική [5].

Η τρίτη αρχιτεκτονική ονομάζεται **συνεργατική αρχιτεκτονική (cooperative architecture)** [2]. Σε αυτή τη περίπτωση, οι αισθητήρες διαβιβάζουν τις μετρήσεις τους στους ενεργοποιητές. Οι ενεργοποιητές με τη σειρά τους, αναλύουν τα δεδομένα και πιθανώς να συμβουλευτούν τον Σ.Β πριν πάρουν οποιαδήποτε απόφαση δράσης. Με άλλα λόγια, οι ενεργοποιητές, επικοινωνούν μεταξύ τους για να πάρουν αποφάσεις δράσεις, και πιθανώς ενημερώνουν για τις αποφάσεις τους τον Σ.Β. Εναλλακτικά, μπορεί να ενημερώσουν τον Σ.Β για το παρατηρημένο φαινόμενο, και να περιμένουν εντολές δράσεις από τον Σ.Β. Η αρχιτεκτονική αυτή, παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.11: Συνεργατική αρχιτεκτονική [2].

Το βασικό πλεονέκτημα της ημί-αυτοματοποιημένης αρχιτεκτονικής, είναι το γεγονός ότι είναι όμοια με την αρχιτεκτονική των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Συνεπώς δεν χρειάζεται να δημιουργηθούν νέα πρωτόκολλα και αλγόριθμοι για την **επικοινωνία** και τον **συντονισμό (coordination)** των κόμβων του δικτύου [5].

Από την άλλη πλευρά, η αυτοματοποιημένη αρχιτεκτονική, προσφέρει [5] **χαμηλή καθυστέρηση (low latency)**, μιας και τα δεδομένα των αισθητήρων μεταδίδονται κατευθείαν προς τους ενεργοποιητές, χωρίς τη διαμεσολάβηση του Σ.Β. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα, να επιταχύνεται σημαντικά η δράση των ενεργοποιητών στα καταγεγραμμένα συμβάντα.

1.2.3 Χαρακτηριστικά WSANs

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές έχουν δύο μοναδικά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι τα εξής [5]:

1. **Απαιτήσεις πραγματικού χρόνου (Real-time requirements)**. Σε πολλές εφαρμογές των WSANs, τα δεδομένα των αισθητήρων πρέπει να αποστέλλονται εγκαίρως στους

ενεργοποιητές, έτσι ώστε οι τελευταίοι να δρουν αποτελεσματικά επί των παρατηρημένων φαινομένων. Για παράδειγμα, αν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ενεργοποιητές χρησιμοποιείται για την αποτροπή φωτιάς μέσα σε μία δασική έκταση, τότε αν οι αισθητήρες εντοπίσουν εστία φωτιάς, πρέπει πολύ γρήγορα να ενημερώσουν τους ενεργοποιητές, έτσι ώστε να δράσουν ταχύτατα, σβήνοντας την φωτιά προτού αυτή εξαπλωθεί. Συνεπώς, η απαίτηση πραγματικού χρόνου κατά την επικοινωνία των αισθητήρων με τους ενεργοποιητές, αποτελεί κρισιμότητα παράγοντα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές.

2. **Συντονισμός (coordination)**. Αντίθετα με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, στα οποία ο Σ.Β είναι υπεύθυνος για τη συλλογή όλων των δεδομένων, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές εμφανίζονται τα ζητήματα του **συντονισμού αισθητήρων με ενεργοποιητές (sensor-actor coordination)** αλλά και του **συντονισμού ενεργοποιητών με ενεργοποιητές (actor-actor coordination)**. Οι αισθητήρες, πρέπει να αποστέλλουν τα δεδομένα στους ενεργοποιητές, και οι ενεργοποιητές να συντονιστούν μεταξύ τους για να αποφασίσουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το πώς θα δράσουν.

1.2.4 Πεδία εφαρμογής WSANs

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές, χρησιμοποιούνται σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, στρατιωτικές εφαρμογές καθώς και σε εφαρμογές αυτοματοποίησης χώρων. Ουσιαστικά τα πεδία εφαρμογής των WSANs είναι λίγο πολύ τα ίδια με αυτά των WSNs, με τη θεμελιώδη διαφορά, ότι τα WSANs αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον το οποίο επιτηρούν.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Κεφάλαιο 2. Προκλήσεις στα WSNs

Όπως έγινε σαφές στο 1^ο κεφάλαιο, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές, αποτελούν την ένωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των ad-hoc δικτύων (δίκτυο ενεργοποιητών). Παρόλα ταύτα όμως, τα WSNs διαφέρουν από τα WSNs και τα ad-hoc δίκτυα, εξαιτίας των βασικών τους χαρακτηριστικών (απαιτήσεις πραγματικού χρόνου, συντονισμός, βλ. ενότητα 1.2.3).

Η επιστημονική κοινότητα, έχει αναπτύξει πολλά πρωτόκολλα και αλγορίθμους για την αντιμετώπιση διαφόρων ζητημάτων τόσο στα WSNs όσο και στα ad-hoc δίκτυα. Οι τεχνικές όμως αυτές, δεν είναι πολλές φορές εφαρμόσιμες στα WSNs, εξαιτίας των χαρακτηριστικών τους, όπως αναφέραμε παραπάνω. Το γεγονός αυτό, απαιτεί τη δημιουργία νέων τεχνικών αντιμετώπισης των προβλημάτων στα WSNs.

Στο παρόν κεφάλαιο, καταβάλλεται προσπάθεια να παρουσιαστούν οι βασικές προκλήσεις/προβλήματα που εμφανίζονται στα WSNs. Πιο συγκεκριμένα, η παρουσίαση θα γίνει ακολουθώντας μία από κάτω προς τα πάνω προσέγγιση των προκλήσεων στα επίπεδα της TCP/IP στοίβας πρωτοκόλλων.

Ειδικότερα, θα παρουσιάσουμε τις προκλήσεις των WSNs, αρχίζοντας από το φυσικό επίπεδο (physical layer). Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με το επίπεδο MAC. Ιδιαίτερη αναφορά θα γίνει στο επίπεδο δικτύου (Network layer) όπου και εντοπίζονται οι κυριότερες προκλήσεις στα WSNs, αφήνοντας στο τέλος το επίπεδο μεταφοράς (Transport layer).

2.1 Προκλήσεις στο φυσικό επίπεδο

Όπως προαναφέραμε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, θα αρχίσουμε την παρουσίαση των προκλήσεων στα WSANs από το φυσικό επίπεδο (physical layer) της TCP/IP στοίβας πρωτοκόλλων. Πρόκειται ουσιαστικά για το κατώτατο επίπεδο της στοίβας, το οποίο ασχολείται με τις φυσικές ιδιότητες ενός δικτύου επικοινωνιών.

Ειδικότερα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές, το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των μεταδιδόμενων σημάτων μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών και τη μετατροπή τους από bits σε οπτικά σήματα. Επιπρόσθετα, αναλαμβάνει την διαχείριση τόσο του περιορισμένου εύρους ζώνης όσο και της περιορισμένης ισχύος που απαιτείται για την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών. Παράλληλα, ελέγχει τόσο την **εμβέλεια αίσθησης (sensing range)** των αισθητήρων, όσο και την **εμβέλεια μετάδοσης (transmission range)** αισθητήρων και ενεργοποιητών [2]. Ως εμβέλεια αίσθησης, ορίζουμε τη μέγιστη δυνατή απόσταση κατά την οποία ένας αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει ένα συμβάν στο δίκτυο. Ως εμβέλεια μετάδοσης αισθητήρων και ενεργοποιητών, ορίζουμε τη μέγιστη δυνατή απόσταση κατά την οποία δύο οποιοδήποτε κόμβοι (είτε αισθητήρες είτε ενεργοποιητές) μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας χωρίς απώλειες μέσω ασύρματων ζεύξεων.

Επιπλέον, στο φυσικό επίπεδο, λαμβάνεται η απόφαση σχετικά με τη συχνότητα στην οποία θα μεταδίδουν τα πακέτα τους οι αισθητήρες. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες σε ένα WSAN, χρησιμοποιούν μία κοινή συχνότητα για τη μετάδοση των δεδομένων μεταξύ τους, και πιθανών μία ακόμη συχνότητα για την μετάδοση μηνυμάτων ελέγχου (control messages). Κάτι τέτοιο, γίνεται με σκοπό την αποφυγή αποστολών μηνυμάτων σε λανθασμένες συχνότητες, γεγονός που συνεπάγεται την άσκοπη κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων. Συνεπώς, πρωτόκολλα μετάδοσης μηνυμάτων που χρησιμοποιούν τεχνικές μεταπήδησης συχνότητας (frequency-hopping), όπως το πρωτόκολλο Bluetooth, δεν είναι κατάλληλα προς χρήση σε ένα WSAN [2].

Σε γενικές γραμμές, τα προβλήματα του φυσικού επιπέδου των WSANs, αντιμετωπίζονται από τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα και μηχανισμούς φυσικού επιπέδου για ad-hoc ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Συνεπώς, τα προβλήματα φυσικού επιπέδου δε θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

2.2 Προκλήσεις στο επίπεδο MAC

Όπως αναφέραμε στο 1^ο κεφάλαιο, η επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, είναι ασύρματη χρησιμοποιώντας ως μέσο μετάδοσης το κενό. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενός πρωτοκόλλου επιπέδου **MAC (Medium Access Control)** για τον έλεγχο πρόσβασης των κόμβων του WSAN στο μέσο μετάδοσης. Το επίπεδο MAC της TCP/IP στοίβας πρωτοκόλλων, στοχεύει στην [2] ύπαρξη επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου, με κύρια χαρακτηριστικά την **απουσία συγκρούσεων (collision free)** και την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, για να μεταδώσουν οι αισθητήρες με αποδοτικό τρόπο τα γεγονότα που έχουν καταγράψει στο πεδίο παρατήρησής τους στους ενεργοποιητές του δικτύου, χρειάζεται η ύπαρξη ενός πρωτοκόλλου επιπέδου MAC [5]. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε πως σε πολλά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές, οι τελευταίοι είναι κινούμενοι αλλάζοντας διαρκώς θέσεις μέσα στο πεδίο παρατήρησης. Καθώς οι ενεργοποιητές κινούνται, μπορούν να αποσυνδεθούν τελείως από το δίκτυο των αισθητήρων (απώλεια επικοινωνίας με τους αισθητήρες). Το γεγονός αυτό, πρέπει να αντιμετωπίζεται από το πρωτόκολλο επιπέδου MAC σε ένα WSAN [5].

Με άλλα λόγια, είναι απαραίτητη η σχεδίαση πρωτοκόλλων επιπέδου MAC, ειδικά για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές, τα οποία θα είναι σε θέση να διατηρούν τη συνδεσιμότητα (connectivity) μεταξύ των αισθητήρων και των κινούμενων ενεργοποιητών. Επιπλέον, οι απαιτήσεις πραγματικού χρόνου, κατά την μετάδοση των καταγεγραμμένων περιστατικών από τους αισθητήρες στους ενεργοποιητές, καθιστά πρακτικά μη εφαρμόσιμα τα **πρωτόκολλα βασισμένα στον ανταγωνισμό (contention-based protocols)** στα WSANs. Τα πρωτόκολλα αυτά, χρησιμοποιούν τεχνικές χειραγίας (handshake) για τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης ενός δικτύου, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση των καθυστερήσεων, καθιστώντας τα απαγορευτικά για τα WSANs [5].

Όσον αφορά την επικοινωνία μεταξύ των ενεργοποιητών (actor-actor communication), τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα επιπέδου MAC που έχουν αναπτυχθεί στα ad-hoc δίκτυα, δεν μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στα WSANs. Απεναντίας, θα πρέπει να υποστούν βελτιώσεις έτσι ώστε να υποστηρίζουν κίνηση πραγματικού χρόνου (real time traffic), η οποία εμφανίζεται στα WSANs [5].

2.3 Προκλήσεις στο επίπεδο δικτύου

Οι προκλήσεις των WSNs στο επίπεδο δικτύου (network layer), κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες [2]:

1. Ζητήματα τοπολογίας των WSNs.
2. Δρομολόγηση (Routing) πακέτων.
3. Συντονισμός (Coordination).

Οι τρεις κατηγορίες, παρουσιάζονται αναλυτικά στις ενότητες που ακολουθούν.

2.3.1 Ζητήματα τοπολογίας

Τα ζητήματα τοπολογίας σε ένα WSN, έχουν να κάνουν κυρίως με τον τρόπο που θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές εντός του πεδίου παρατήρησης. Μία καλά οργανωμένη τοπολογία, μπορεί να αυξήσει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, μιας και βελτιώνει την επικοινωνία μεταξύ των συστατικών μερών του WSN.

Πιο συγκεκριμένα, μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των WSNs στην κατηγορία της τοπολογίας, αποτελεί το πρόβλημα της **τοποθέτησης των ενεργοποιητών (actor placement)** εντός του πεδίου παρατήρησης. Η συγκεκριμένη πρόκληση, αποτελεί αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνητικών ομάδων του χώρου [6], [7], [8]. Οι μελέτες αυτές, προτείνουν διάφορους αλγόριθμους για την τοποθέτηση των ενεργοποιητών εντός του πεδίου παρατήρησης, με διαφορετικά κάθε φορά κριτήρια. Μερικά από τα κριτήρια αυτά είναι τα παρακάτω:

1. Μεγιστοποίηση της **κάλυψης (coverage)** που παρέχουν οι ενεργοποιητές. Ουσιαστικά, οι εν λόγω αλγόριθμοι τοποθετούν τους ενεργοποιητές στο χώρο κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι τελευταίοι, να μπορούν να παρέχουν τις υπηρεσίες τους σε όλο το μήκος και πλάτος του πεδίου παρατήρησης.
2. Ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων κατά τη συλλογή των δεδομένων των αισθητήρων από τους ενεργοποιητές.
3. Μεγιστοποίηση της κάλυψης που παρέχουν οι ενεργοποιητές, σε συνδυασμό με τη διατήρηση της μεταξύ τους συνδεσιμότητας.
4. Μεγιστοποίηση της κάλυψης που παρέχουν οι ενεργοποιητές, σε συνδυασμό με τη ελαχιστοποίηση του χρόνου δράσης των ενεργοποιητών επί των παρατηρημένων φαινομένων.
5. Συνδυασμός των 1 και 2.

Το ζήτημα της τοποθέτησης των ενεργοποιητών, θα αναπτυχθεί διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο. Εκτός από την πρόκληση της κατάλληλης τοποθέτησης των ενεργοποιητών σε ένα WSN, αντίστοιχα κρίσιμη πρόκληση αποτελεί και η σωστή επιλογή των κόμβων που θα μπου σε **κατάσταση «ύπνου» (sleep mode)**. Πιο συγκεκριμένα, επειδή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές, η εξοικονόμηση ενέργειας των κόμβων αποτελεί πρωταρχικό μέλημα, το ζήτημα της επιλογής εκείνων των ενεργοποιητών και των αισθητήρων που θα μεταβούν σε κατάσταση «ύπνου», αποτελεί κρίσιμότητα παράγοντα για την αύξηση της διάρκειας ζωής (lifetime) του δικτύου. Και λέγοντας κατάσταση «ύπνου», εννοούμε ότι ένας κόμβος (είτε ενεργοποιητής είτε αισθητήρας) του δικτύου μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί, για παράδειγμα, απενεργοποιώντας για κάποιο χρονικό διάστημα τη μονάδα λήψης/αποστολής μηνυμάτων, διακόπτοντας έτσι την επικοινωνία του με τους άλλους κόμβους του δικτύου.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η επιλογή για το ποιόι κόμβοι του WSN θα τεθούν σε κατάσταση «ύπνου», λαμβάνεται από ειδικούς αλγόριθμους, οι οποίοι συνεκτιμούν και άλλους παράγοντες, όπως τη διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του WSN που παραμένουν σε **ενεργή κατάσταση (active mode)**.

Στην κατηγορία των ζητημάτων τοπολογίας, εντάσσεται και το πρόβλημα της **συσταδοποίησης (clustering)** των κόμβων ενός WSN. Με τον όρο συσταδοποίηση, εννοούμε την σωστή οργάνωση των αισθητήρων του δικτύου σε **ομάδες (clusters)**, με σκοπό την καλύτερη επικοινωνία μεταξύ τους. Σε κάθε ομάδα, επιλέγεται και ένας κόμβος, κυρίως ενεργοποιητής, που αναλαμβάνει το ρόλο του **αρχηγού** της ομάδας (**cluster head**). Οι αισθητήρες της ομάδας, αποστέλλουν γρήγορα τις μετρήσεις τους στον ενεργοποιητή-αρχηγό της ομάδας, ικανοποιώντας κατανοτόν τον τρόπο τις απαιτήσεις πραγματικού χρόνου κατά την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων-ενεργοποιητών. Για την επιλογή τόσο των ομάδων όσο και των αρχηγών, χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αλγόριθμοι. Ζητήματα σύστασης ομάδων, θα μας απασχολήσουν σε διάφορες τεχνικές που θα παρουσιάσουμε σε επόμενα κεφάλαια.

Τέλος, εξίσου σημαντική πρόκληση στην κατηγορία της τοπολογίας των WSNs, αποτελεί και η διαχείριση της **κινητικότητας των ενεργοποιητών (actor mobility)** στο πεδίο παρατήρησης. Σε πολλές εφαρμογές WSNs, οι ενεργοποιητές κινούνται στο χώρο, έτσι ώστε να επισκέπτονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα τους αισθητήρες, «ρωτώντας» τους για τυχόν περιστατικά. Η κίνηση όμως αυτή των ενεργοποιητών, αφενός μεν μεταβάλλει την τοπολογία του δικτύου, αφετέρου δε, θα πρέπει να είναι κατάλληλα προσδιορισμένη από εξειδικευμένους αλγορίθμους, έτσι ώστε να ανιχνεύονται όσο το δυνατόν περισσότερα συμβάντα, και να είναι και οικονομική από άποψη κατανάλωσης ενέργειας. Η πρόκληση αυτή, θα αποτελέσει αντικείμενο μελέτης σε μεταγενέστερο κεφάλαιο.

2.3.2 Δρομολόγηση πακέτων

Σε ένα WSN, η **δρομολόγηση (routing)** πακέτων λαμβάνει χώρα τόσο κατά την επικοινωνία αισθητήρων-αισθητήρων, όσο και κατά την επικοινωνία αισθητήρων-ενεργοποιητών. Η πρώτη περίπτωση, εμφανίζεται τόσο όταν οι αισθητήρες συνεργάζονται μεταξύ τους για την εκλογή αρχηγού (cluster head) ομάδας (cluster), όσο και κατά την διαδικασία ανάθεσης καθηκόντων (βλ. ενότητα 2.3.3.3). Η δεύτερη περίπτωση, εμφανίζεται κάθε φορά που ένας αισθητήρας έχει εντοπίσει ένα περιστατικό στο πεδίο παρατήρησής τους, και επιδιώκει να ενημερώσει τον κατάλληλο ενεργοποιητή.

Και στις δύο περιπτώσεις, ένα κατάλληλο πρωτόκολλο δρομολόγησης, πρέπει να δρομολογεί τα πακέτα από την πηγή στον τελικό προορισμό, με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Λέγοντας βέλτιστο, εννοούμε ότι το μονοπάτι δρομολόγησης που θα ακολουθείται, θα εξασφαλίζει τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η συνολική ενέργεια που δαπανάται από όλους τους ενδιάμεσους κόμβους που συμμετέχουν στην προώθηση του πακέτου, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερη.
- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να υποστηρίζει επικοινωνία πραγματικού χρόνου, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα deadlines [5].
- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να εξυπηρετεί τα πακέτα με βάση την προτεραιότητά τους. Ένα πακέτο δεδομένων με υψηλή προτεραιότητα (πρέπει να αποσταλεί στον ενεργοποιητή σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα), πρέπει να δρομολογηθεί πρώτο συγκριτικά με ένα άλλο πακέτο μικρότερης προτεραιότητας [5].

Για την επικοινωνία των ενεργοποιητών μεταξύ τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης για ad-hoc δίκτυα, όπως το AODV (Ad-hoc On-Demand Vector Routing) και το DSR (Dynamic Source Routing), αρκεί να τροποποιηθούν έτσι ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις πραγματικού χρόνου που εμφανίζονται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές [5].

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης κατάλληλα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα πρωτόκολλα αυτά όμως, δε λαμβάνουν υπόψη τους τα μοναδικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με ενεργοποιητές. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη, η σχεδίαση εξειδικευμένων πρωτοκόλλων δρομολόγησης για WSNs, που θα καλύπτουν τις προαναφερθείσες απαιτήσεις.

2.3.3 Συντονισμός

Η ιδιότητα του **συντονισμού (coordination)**, είναι ίσως το σημαντικότερο ζήτημα που απασχολεί την ερευνητική κοινότητα στο χώρο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με ενεργοποιητές. Πιο συγκεκριμένα, ο όρος συντονισμός, αναφέρεται ουσιαστικά στην ικανότητα των κόμβων του WSN να **επικοινωνούν** μεταξύ τους φέρνοντας εις πέρας διάφορες αποστολές.

Ο συντονισμός σε ένα WSN εμφανίζεται με τις παρακάτω μορφές:

- Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων (sensor-sensor coordination).
- Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών (sensor-actor coordination).
- Συντονισμός μεταξύ ενεργοποιητών (actor-actor coordination).

Οι παραπάνω μορφές συντονισμού αναλύονται στις υποενότητες που ακολουθούν.

2.3.3.1 Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων

Όπως είναι γνωστό από το 1^ο κεφάλαιο, οι αισθητήρες σε ένα WSN, είναι επιφορτισμένοι με το ρόλο της ανίχνευσης διαφόρων φαινομένων μέσα σε μία περιοχή στην οποία είναι τοποθετημένοι. Πέρα όμως από αυτό, οι αισθητήρες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματων ζευξέων για να επιλύσουν διάφορα ζητήματα. Πιο συγκεκριμένα, ο συντονισμός μεταξύ αισθητήρων (sensor-sensor coordination) είναι απαραίτητος στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Πολλές φορές, οι αισθητήρες αποστέλλουν τις μετρήσεις τους σε άλλους αισθητήρες, είτε για να συγκρίνουν τις μεταξύ τους τιμές, είτε για να σταλεί στον ενεργοποιητή μία συγκεντρωτική μέτρηση από πολλούς αισθητήρες (η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται συνάθροιση δεδομένων - data aggregation και παρουσιάζεται στην ενότητα 2.4).
- Οι αισθητήρες συντονίζονται μεταξύ τους για να αποφασίσουν ποιοι αισθητήρες θα μεταβούν σε κατάσταση «ύπνου» διακόπτοντας την μετάδοση δεδομένων [5].
- Οι αισθητήρες συντονίζονται μεταξύ τους για να επιλέξουν τους ενεργοποιητές στους οποίους θα αποστέλλουν τα δεδομένα τους [5]. Αντίστοιχα, οι αισθητήρες συντονίζονται για να εκλέξουν ενεργοποιητές-αρχηγούς στις υπό σύσταση ομάδες (clusters) που αναφέραμε στην ενότητα 2.3.1.

2.3.3.2 **Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών**

Τα βασικά προβλήματα που εντοπίζονται στο συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, είναι τα παρακάτω [5]:

1. Ικανοποίηση των απαιτήσεων επικοινωνίας αισθητήρων – ενεργοποιητών.
2. Επιλογή του ποιοι αισθητήρες θα επικοινωνούν με ποιούς ενεργοποιητές.
3. Πώς γίνεται η επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών.

1^ο Πρόβλημα

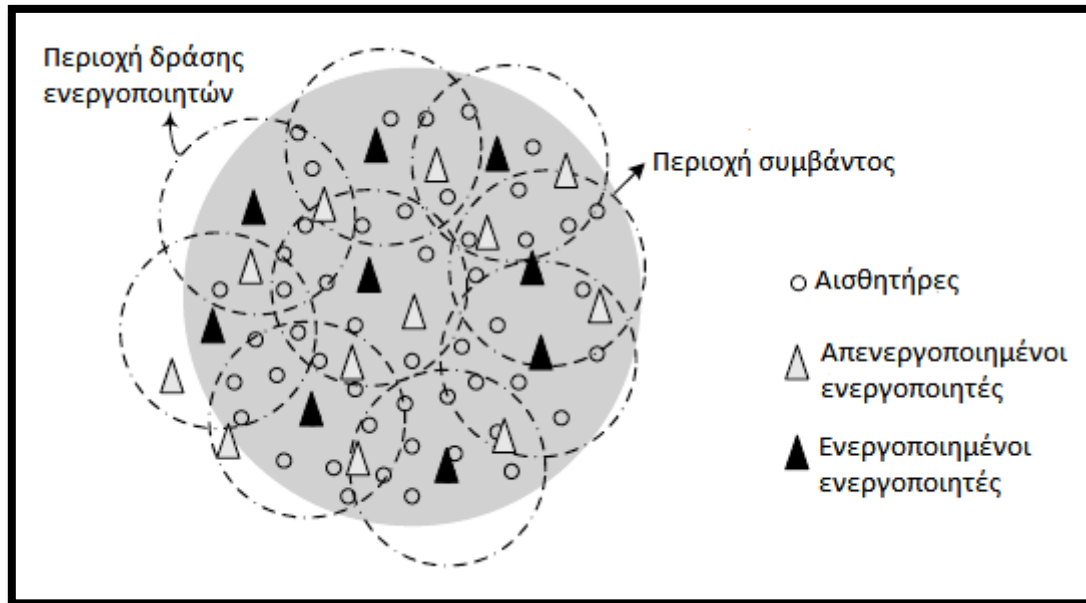
Όσον αφορά το πρώτο πρόβλημα, οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών, είναι οι παρακάτω [5]:

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.
- Η επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών πρέπει να υποστηρίζει κίνηση πραγματικού χρόνου (real time traffic). Ειδικότερα, σε ορισμένες εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων με ενεργοποιητές, όπως η κατάσβεση φωτιάς, η χρονική διάρκεια αποστολής των παρατηρημένων φαινομένων από τους αισθητήρες στους ενεργοποιητές, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, έτσι ώστε οι ενεργοποιητές να δράσουν άμεσα περιορίζοντας την εστία φωτιάς.
- Τα φαινόμενα που παρατηρούν ο αισθητήρες, πρέπει να παραδίδονται στους ενεργοποιητές με την ίδια σειρά που κατεγράφησαν. Αν για παράδειγμα, δύο αισθητήρες καταγράψουν δύο διαφορετικά φαινόμενα εντός του πεδίου παρατήρησής τους, τότε τα φαινόμενα αυτά πρέπει να παραδοθούν στους ενεργοποιητές με την ίδια ακριβώς σειρά που κατεγράφησαν. Κάτι τέτοιο εξασφαλίζει την επιτυχημένη δράση των ενεργοποιητών επί των φαινομένων.
- Πρέπει να υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ των αισθητήρων που αναφέρουν το ίδιο περιστατικό προς πολλούς ενεργοποιητές, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μία συντονισμένη δράση (one time action) των ενεργοποιητών επί του φαινομένου. Με αυτόν τον τρόπο το αποτέλεσμα της δράσης των ενεργοποιητών βελτιώνεται σημαντικά.

2^ο Πρόβλημα

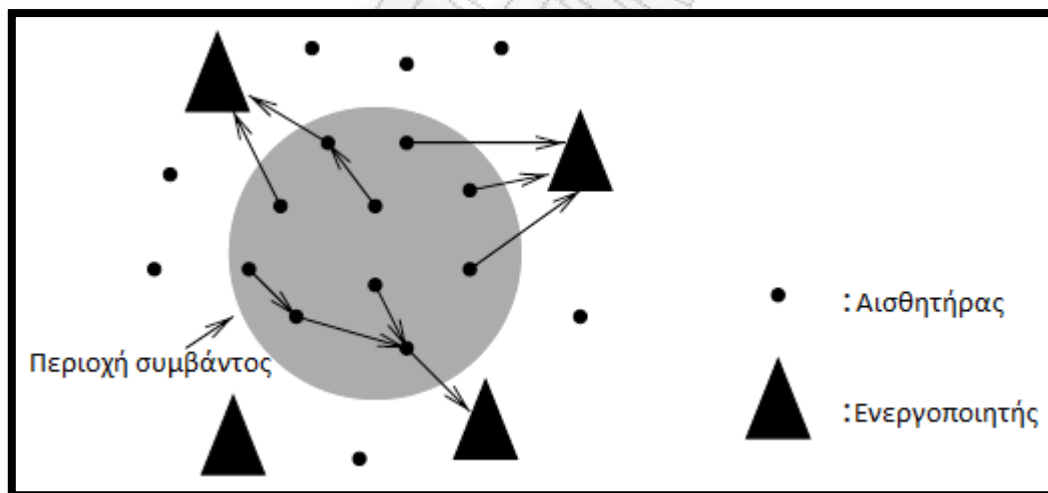
Όσον αφορά το δεύτερο πρόβλημα, ο επιθυμητός στόχος είναι να επιλέγονται όσο το δυνατόν λιγότεροι αισθητήρες για τον εντοπισμό των συμβάντων, και όσο το δυνατόν λιγότεροι ενεργοποιητές για την δράση επί αυτών των φαινομένων. Η επιλογή αυτή, γίνεται με στόχο την μείωση της συνολικής ενέργειας που δαπανάται τόσο από τους αισθητήρες όσο και από τους ενεργοποιητές για τη διεκπεραίωση των περιστατικών του WSN [5].

Στην εικόνα που ακολουθεί, αν ο ελάχιστος αριθμός των ενεργοποιητών που απαιτούνται για τη κάλυψη των παρατηρημένων φαινομένων είναι ίσος με 9, τότε οι 11 από τους 20 συνολικά ενεργοποιητές μπαίνουν σε κατάσταση «ύπνου» μη αλληλεπιδρώντας με το περιβάλλον.



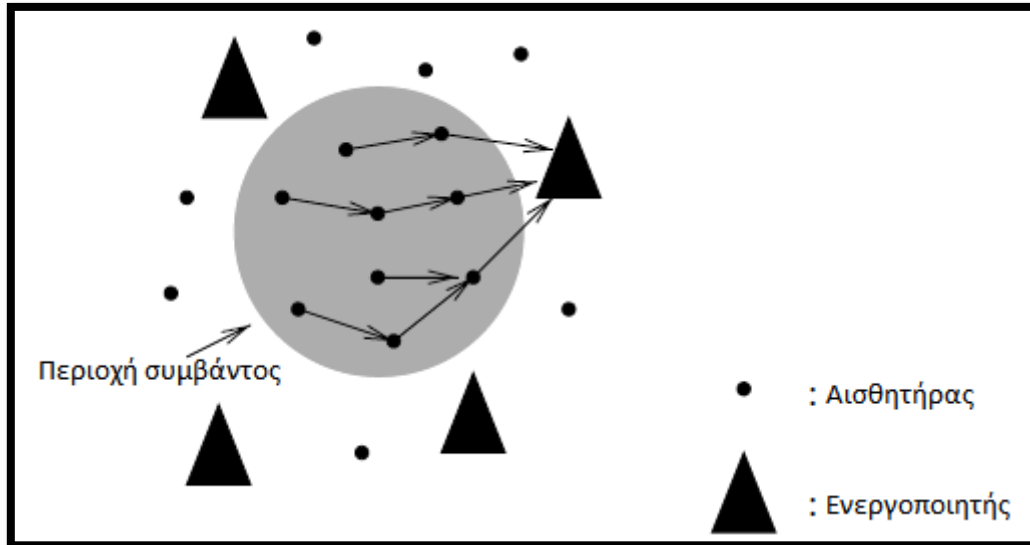
Εικόνα 2.1: Ελάχιστο σύνολο ενεργοποιητών προς δράση [5].

Υπάρχουν δύο βασικές επιλογές για το πού θα αποστείλουν τις μετρήσεις τους οι αισθητήρες. Στην πρώτη περίπτωση, οι αισθητήρες μπορούν ανεξάρτητα να επιλέξουν τον ενεργοποιητή στον οποίο θα αποστείλουν τις μετρήσεις τους. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται **Multi-Actor (MA)** επιλογή. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες καταγράφουν τα διάφορα περιστατικά μέσα στο δίκτυο, και τα στέλνουν σε διαφορετικούς ενεργοποιητές. Αυτή η έλλειψη συντονισμού μεταξύ των αισθητήρων, οδηγεί σε αύξηση της συνολικής ενέργειας που δαπανάται, εξαιτίας της ενεργοποίησης πολλών ενεργοποιητών [5]. Η περίπτωση αυτή φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.2: Multi-Actor (MA) [5].

Στη δεύτερη περίπτωση, οι αισθητήρες συνεργάζονται μεταξύ τους δημιουργώντας ομάδες (βλ. ενότητα 2.3.1). Σε κάθε ομάδα, εκλέγεται ως αρχηγός ένας ενεργοποιητής, στον οποίο αποστέλλουν τα δεδομένα τους οι αισθητήρες της ομάδας. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται **Single-Actor (SA)** [5] επιλογή ενεργοποιητή, και απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.3: Single-Actor (SA) [5].

Με τη σύσταση ομάδων, μειώνεται ο χρόνος αποστολής των πακέτων των αισθητήρων προς τον ενεργοποιητή-αρχηγό της ομάδας, και παράλληλα μειώνεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο, μιας και τα πακέτα των αισθητήρων δρομολογούνται προς τον αρχηγό της ομάδας (ο οποίος είναι σχετικά κοντά προς όλους τους αισθητήρες της ομάδας) και όχι προς κάποιον απομακρυσμένο ενεργοποιητή.

3^ο Πρόβλημα

Όσον αφορά το τρίτο πρόβλημα, υπάρχουν δύο τρόποι για να επικοινωνήσει ένας αισθητήρας με έναν ενεργοποιητή. Πρόκειται για την **single-hop** επικοινωνία και την **multi-hop** επικοινωνία [5].

Στη single-hop επικοινωνία, ο αισθητήρας αποστέλλει τα δεδομένα του απευθείας στον ενεργοποιητή, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ενδιάμεσων κόμβων δρομολογητών. Για να επιτευχθεί single-hop επικοινωνία, πρέπει ο ενεργοποιητής να είναι εντός της εμβέλειας μετάδοσης (transmission range) του αισθητήρα.

Στη multi-hop επικοινωνία, τα δεδομένα του αισθητήρα διέρχονται από ενδιάμεσους αισθητήρες-δρομολογητές, μέχρι να φτάσουν στον τελικό ενεργοποιητή. Η επικοινωνία αυτή λαμβάνει χώρα όταν ο ενεργοποιητής είναι αρκετά μακριά και εκτός εμβέλειας του αισθητήρα.

Ολοκληρώνοντας την ενότητα του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη εξειδικευμένων πρωτοκόλλων για WSANs, που επιλύουν τα παραπάνω προβλήματα κατά την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών.

2.3.3.3 Συντονισμός μεταξύ ενεργοποιητών

Ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών, κρίνεται απαραίτητος στις παρακάτω περιπτώσεις [5]:

- Πολλές φορές, οι ενεργοποιητές που λαμβάνουν μηνύματα από τους αισθητήρες, αδυνατούν να δράσουν επί των συμβάντων, εξαιτίας είτε της χαμηλής διαθέσιμης ενέργειας, είτε εξαιτίας μικρής **εμβέλειας δράσης (action range)**. Ως εμβέλεια δράσης ενός ενεργοποιητή, ορίζουμε τη μέγιστη δυνατή απόσταση στην οποία παρέχει κάλυψη (coverage) επί των συμβάντων από την τρέχουσα θέση του. Συνεπώς, πρέπει να υπάρξει επικοινωνία/συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών, έτσι ώστε το συμβάν να εξυπηρετηθεί από άλλον/άλλους διαθέσιμους ενεργοποιητές.
- Πολλές φορές, δεν αρκεί μόνο ένας ενεργοποιητής για να βγάλει εις πέρας το συμβάν που εντόπισε ένας αισθητήρας. Συνεπώς, πρέπει να συμβάλλουν και άλλοι γειτονικοί ενεργοποιητές στην εξυπηρέτηση του περιστατικού.
- Σε πολλές εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων με ενεργοποιητές, παρουσιάζονται περιπτώσεις συμβάντων τα οποία απαιτούν την επέμβαση πολλαπλών ενεργοποιητών για να διεκπεραιωθούν. Η δράση των ενεργοποιητών, θα πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανομημένη εντός της περιοχής του συμβάντος, αποφεύγοντας τις χωρικές **επικαλύψεις (overlapping)**.

- Εάν διαφορετικοί αισθητήρες, ενημερώνουν ταυτόχρονα πολλούς ενεργοποιητές για το ίδιο περιστατικό, τότε πιθανώς να απαιτείται μία κοινή και συντονισμένη δράση από τους ενεργοποιητές. Είναι απαραίτητος, λοιπόν, ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών, έτσι ώστε να δράσουν ταυτόχρονα επί του φαινομένου.
- Εάν εμφανιστούν πολλά περιστατικά ταυτόχρονα εντός του δικτύου, οι ενεργοποιητές πρέπει να συντονιστούν μεταξύ τους έτσι ώστε να γίνει σωστή **ανάθεση καθηκόντων (task assignment)** μεταξύ τους. Επιπλέον, τα περιστατικά θα πρέπει να εξυπηρετηθούν με τη σειρά που εμφανίστηκαν στο δίκτυο. Η περίπτωση αυτή, ονομάζεται **σειριακή εκτέλεση καθηκόντων/συμβάντων (ordered execution of tasks)**.

Ουσιαστικά, η ενδοεπικοινωνία των ενεργοποιητών, αποσκοπεί στη σωστή ανάθεση καθηκόντων μεταξύ τους. Λέγοντας καθήκοντα, εννοούμε την περαίωση των περιστατικών που εντοπίζονται στο δίκτυο από τους αισθητήρες.

Η ανάλυση της ανάθεσης καθηκόντων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ενεργοποιητές, κινείται πάνω σε δύο άξονες [5]:

1. Αρχικά, γίνεται διάκριση μεταξύ καθηκόντων που απαιτούν μόνο έναν ενεργοποιητή (**Single-Actor Task SAT**), και καθήκοντα που απαιτούν πολλούς ενεργοποιητές (**Multi-Actor Task MAT**) για να διεκπεραιωθούν.
2. Αφού γίνει η ανάθεση καθηκόντων, οι ενεργοποιητές πρέπει να συνεργαστούν μεταξύ τους για να αποφασίσουν τί είδους δράση (action) θα ακολουθήσουν για να αντιμετωπίσουν τα περιστατικά. Η απόφαση μπορεί να ληφθεί είτε κεντρικά, από έναν ενεργοποιητή που αναλαμβάνει να ενημερώσει τους υπόλοιπους ενεργοποιητές (**Κεντροκοποιημένη απόφαση - Centralized Decision CD**), είτε καταναμημένα από γειτονικούς ενεργοποιητές (**Καταναμημένη απόφαση - Distributed Decision DD**).

Η διαδικασία της ανάθεσης καθηκόντων, πρέπει να επιλέγει πάντοτε τους κατάλληλους ενεργοποιητές για την κάλυψη των περιστατικών που εμφανίζονται στο δίκτυο. Λέγοντας κατάλληλους, εννοούμε ότι οι επιλεγμένοι ενεργοποιητές θα πρέπει να είναι σχετικά κοντά στο συμβάν, να έχουν αρκετά αποθέματα ενέργειας, επαρκή εμβέλεια δράσης και κατάλληλες ικανότητες διεκπεραίωσης.

Συμπερασματικά, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων που θα ασχολούνται αποκλειστικά με τα παρακάτω ζητήματα [5]:

- Οι αλγόριθμοι θα πρέπει να ενημερώνουν τους ενεργοποιητές, για το κατά πόσο το συμβάν είναι SAT ή MAT. Στην περίπτωση του SAT, το πρόβλημα είναι η κατάλληλη επιλογή του ενεργοποιητή που θα δράσει επί του φαινομένου. Στη MAT περίπτωση, το πρόβλημα έγκειται στην βέλτιστη επιλογή των ενεργοποιητών που θα δράσουν επί του φαινομένου.
- Μία από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις του συντονισμού μεταξύ ενεργοποιητών, είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης των καθηκόντων τους. Συνεπώς, τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι για την επικοινωνία και τον συντονισμό μεταξύ των ενεργοποιητών, πρέπει να υποστηρίζουν τις απαιτήσεις πραγματικού χρόνου των WSANs.

2.4 Προκλήσεις στο επίπεδο μεταφοράς

Τα πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς (transport layer), τόσο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων όσο και στα ad-hoc δίκτυα, ασχολούνται με την **συλλογή δεδομένων (data gathering)** και την **συνάθροιση δεδομένων (data aggregation)**, με σκοπό τη μείωση της κίνησης και την αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου [2].

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ενεργοποιητές, ο όρος συλλογή δεδομένων αναφέρεται στην αξιόπιστη και έγκαιρη αποστολή των δεδομένων των αισθητήρων στους κατάλληλους ενεργοποιητές. Με την τεχνική της συνάθροισης δεδομένων, ένας αισθητήρας αποστέλλει μαζί με τις μετρήσεις τους, τα δεδομένα που έχει λάβει από άλλους αισθητήρες προς τον ενεργοποιητή.

Στα WSANs, τα πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς, παράλληλα με την συλλογή και συνάθροιση δεδομένων, πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις πραγματικού χρόνου (real time requirements), οι οποίες παρουσιάζονται σε αυτά [5]. Ενώ τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί πληθώρα πρωτοκόλλων επιπέδου μεταφοράς για WSNs και ad-hoc δίκτυα, κανένα από αυτά δεν αντιμετωπίζει ταυτόχρονα τον παράγοντα της αξιοπιστίας (αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων) και των απαιτήσεων πραγματικού χρόνου για τα WSANs [5].

Για αυτόν ακριβώς το λόγο, έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένα πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς για WSANs, που λαμβάνουν υπόψη τις προαναφερθείσες προκλήσεις/απαιτήσεις. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι

κατάλληλα τόσο για την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών, όσο και για την επικοινωνία ενεργοποιητών – ενεργοποιητών.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Κεφάλαιο 3. Τοποθέτηση Ενεργοποιητών

Τα πρώτα δύο κεφάλαια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, αποτελούν μία πλήρη παρουσίαση του χώρου των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με ενεργοποιητές και των προκλήσεων που εμφανίζονται σε αυτά. Από το παρόν κεφάλαιο και εν συνεχεία, θα παρουσιάσουμε με λεπτομέρεια συγκεκριμένες προκλήσεις (προβλήματα) του χώρου μαζί με τις αντίστοιχες λύσεις που προτείνονται στην βιβλιογραφία.

Πιο συγκεκριμένα, το συγκεκριμένο κεφάλαιο ασχολείται εξολοκλήρου με το πρόβλημα της κατάλληλης **τοποθέτησης των ενεργοποιητών (Actor Placement)** εντός του πεδίου παρατήρησης. Πρόκειται για μία από τις κρίσιμότερες σχεδιαστικές αποφάσεις που πρέπει να λάβει χώρα σε ένα WSN. Το συγκεκριμένο πρόβλημα εντάσσεται στην κατηγορία «**Ζητήματα τοπολογίας των WSNs**» του επιπέδου δικτύου της TCP/IP στοίβας πρωτοκόλλων (βλ. ενότητα 2.3.1).

Η τοποθέτηση των ενεργοποιητών σε ένα WSN, γίνεται μέσω κατάλληλων **κατανεμημένων αλγορίθμων (distributed algorithms)** που εκτελούνται από τους κόμβους του δικτύου. Ο κυρίαρχος σκοπός αυτών των αλγορίθμων, είναι να τοποθετηθούν οι ενεργοποιητές στο πεδίο παρατήρησης έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η **κάλυψη (coverage)** που παρέχουν οι τελευταίοι μέσα στο χώρο. Παράλληλα με τη μεγιστοποίηση της κάλυψης, οι εν λόγω αλγόριθμοι λαμβάνουν υπόψη και άλλες παραμέτρους όπως, ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών, διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ ενεργοποιητών κ.α.

Στις ενότητες που ακολουθούν, καταβάλλεται προσπάθεια να παρουσιασθούν με απλό και κατανοητό τρόπο διάφορες τεχνικές που επιλύουν το πρόβλημα της τοποθέτησης των ενεργοποιητών στο χώρο παρατήρησης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αναλυτικά οι στόχοι κάθε μηχανισμού, οι αλγόριθμοι των μηχανισμών μέσω στιγμιότυπων εκτέλεσης καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε τεχνικής. Τέλος, σε ορισμένες τεχνικές, προτείνονται και ορισμένες βελτιώσεις που θα μπορούσαν πιθανώς να οδηγήσουν σε αύξηση της αποδοτικότητάς τους.

3.1 Διάφοροι ορισμοί

Όπως έγινε κατανοητό από το πρώτο κεφάλαιο, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ενεργοποιητές, λειτουργεί εντός μίας περιοχής παρατήρησης με σκοπό την καταγραφή και την αντιμετώπιση διαφόρων συμβάντων.

Στις περισσότερες εφαρμογές των WSNs, οι αισθητήρες τοποθετούνται **τυχαία (randomly)** εντός του πεδίου παρατήρησης σε πολύ πυκνή διάταξη, εξαιτίας κυρίως του χαμηλού τους κόστους. Η τυχαία τοποθέτηση των αισθητήρων, δεν μειώνει την αποδοτικότητα του δικτύου όσον αφορά την καταγραφή των συμβάντων που λαμβάνουν χώρα εντός του πεδίου. Κάτι τέτοιο, όπως προαναφέραμε οφείλεται στην πληθώρα των αισθητήρων που τοποθετούνται στα WSN, με αποτέλεσμα την ικανοποιητική κάλυψη του πεδίου παρατήρησης.

Από την άλλη πλευρά, οι ενεργοποιητές σε μία εφαρμογή WSN είναι κατά πολύ λιγότεροι, συγκριτικά με τους αισθητήρες, εξαιτίας του αυξημένου κόστους τους. Συνεπώς, οι ενεργοποιητές, ενώ αρχικά τοποθετούνται τυχαία μέσα στο πεδίο παρατήρησης, στη συνέχεια θα πρέπει να **επαναπροσδιορίσουν** τη θέση τους στο χώρο, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων (**actor placement algorithms**), με βασικό σκοπό τη μεγιστοποίηση της **κάλυψης (coverage)** που παρέχουν στο δίκτυο.

Οι παραπάνω αλγόριθμοι είναι το ακριβές αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου. Πριν όμως παρουσιάσουμε με λεπτομέρεια τις εν λόγω τεχνικές, κρίνεται σκόπιμη η παράθεση κάποιων ορισμών, που θα βοηθήσουν τον αναγνώστη να παρακολουθήσει ευκολότερα τη ροή του κεφαλαίου και να κατανοήσει τις τεχνικές που θα παρουσιαστούν.

3.1.1 Ορισμός κάλυψης ενεργοποιητών

Σε ένα WSN, η **κάλυψη (coverage)** ενός σημείου του χώρου από έναν ενεργοποιητή, αναφέρεται στη δυνατότητα του τελευταίου, να προσφέρει τις υπηρεσίες του σε αυτό ακριβώς το σημείο του χώρου παρατήρησης.

Η **μεγιστοποίηση** της κάλυψης που παρέχεται από τους ενεργοποιητές, αποτελεί όπως προαναφέραμε τον κυρίαρχο στόχο τον αλγορίθμων τοποθέτησης ενεργοποιητών. Λέγοντας μεγιστοποίηση κάλυψης, εννοούμε ότι οι ενεργοποιητές θα είναι σε θέση να παρέχουν τις υπηρεσίες τους σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα του πεδίου παρατήρησης. Με άλλα λόγια, επιχειρείται να μην υπάρχει καταγεγραμμένο συμβάν εντός του δικτύου, το οποίο να μη μπορεί να αντιμετωπιστεί, λόγω απουσίας ενεργοποιητή πλησίον του περιστατικού.

3.1.2 Ορισμός αλγορίθμων συσταδοποίησης

Η **συσταδοποίηση (clustering)**, είναι μία τεχνική η οποία εφαρμόζεται σε πολλά πεδία όπως η επιστήμη των υπολογιστών, η βιολογία, η ιατρική, η ανθρωπολογία, το μάρκετινγκ και η οικονομία. Ο βασικός της στόχος είναι η οργάνωση των δεδομένων σε **συστάδες/ομάδες (clusters)** κοινών χαρακτηριστικών. Με άλλα λόγια, αν τα δεδομένα μίας εφαρμογής είναι αποθηκευμένα σε μία βάση δεδομένων, τότε ο μηχανισμός συσταδοποίησης, εξετάζει τα χαρακτηριστικά των δεδομένων της βάσης, και επιχειρεί να τα εντάξει σε ομάδες. Μία ομάδα περιέχει δεδομένα με παρόμοια χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

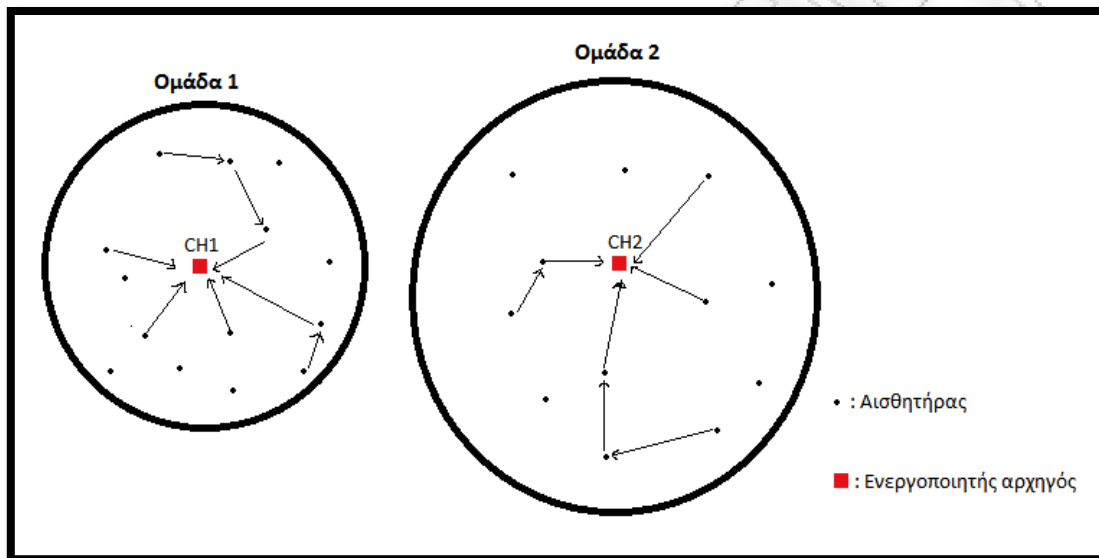
Για την επίτευξη της συσταδοποίησης δεδομένων σε μία βάση δεδομένων, εφαρμόζονται κατάλληλοι **αλγόριθμοι συσταδοποίησης (clustering algorithms)**. Οι αλγόριθμοι αυτοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες [9]:

- **Ιεραρχικοί (Hierarchical)** αλγόριθμοι συσταδοποίησης για τη δημιουργία συνόλων συστάδων. Κάθε επίπεδο της ιεραρχίας έχει ένα ξεχωριστό σύνολο συστάδων. Στο κατώτατο επίπεδο, κάθε αντικείμενο βρίσκεται στη δική του συστάδα. Στο ανώτατο επίπεδο, όλα τα αντικείμενα ανήκουν στην ίδια συστάδα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων αλγορίθμων είναι, οι συσσωρευτικοί (agglomerative) αλγόριθμοι και οι διαιρετικοί (divisive clustering) αλγόριθμοι.
- **Διαμεριστικοί (Partitional)** αλγόριθμοι συσταδοποίησης για τη δημιουργία ενός μόνο συνόλου συστάδων. Ο αριθμός των συστάδων δίνεται ως είσοδος από το χρήστη. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων αλγορίθμων είναι, ο αλγόριθμος συσταδοποίησης τετραγωνικού σφάλματος (squared error clustering algorithm) και ο αλγόριθμος K – Means.

Η περαιτέρω ανάλυση των παραπάνω αλγορίθμων κρίνεται μη αναγκαία στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Για περαιτέρω λεπτομέρειες σχετικά με τη λειτουργία και την πολυπλοκότητα των εν λόγω αλγορίθμων, ο αναγνώστης ενθαρρύνεται όπως ανατρέξει στην παραπομπή [9].

Στα πλαίσια του συγκεκριμένου κεφαλαίου, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι συσταδοποίησης για την δημιουργία ομάδων αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα, οι διάφοροι αλγόριθμοι, ομαδοποιούν τους αισθητήρες σε συστάδες (clusters). Σε κάθε ομάδα, επιλέγεται ένας **κόμβος αρχηγός** της συστάδας (**Cluster Head - CH**). Στις περισσότερες των περιπτώσεων, το ρόλο του αρχηγού της ομάδας αναλαμβάνει να τον διατελέσει ένας ενεργοποιητής. Ένα πιθανό κριτήριο ένταξης σε μία ομάδα για έναν αισθητήρα, θα μπορούσε να είναι η απόστασή του από τον ενεργοποιητή – αρχηγό της ομάδας. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες εντάσσονται στην ομάδα εκείνου του ενεργοποιητή από τον οποίο απέχουν την ελάχιστη δυνατή απόσταση. Ο ενεργοποιητής – αρχηγός της ομάδας, λαμβάνει όλα τα δεδομένα από τους αισθητήρες της ομάδας του και αναλόγως δρα στα συμβάντα. Φυσικά, υπάρχουν και άλλα κριτήρια ένταξης ενός αισθητήρα σε μία συστάδα.

Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα WSN, το οποίο αποτελείται από δύο ομάδες αισθητήρων. Οι αρχηγοί των ομάδων είναι οι δύο ενεργοποιητές του δικτύου.



Εικόνα 3.1: Ομαδοποίηση του WSN σε συστάδες.

Ολοκληρώνοντας την παράθεση των απαιτούμενων ορισμών, σειρά έχει η αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών/μηχανισμών τοποθέτησης των ενεργοποιητών εντός του πεδίου παρατήρησης. Η παρουσίαση θα γίνει ως εξής:

1. Μηχανισμός 1: Τοποθέτηση ενεργοποιητών με στόχο την μεγιστοποίηση της κάλυψης και την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών (COLA: A Coverage and Latency aware Actor Placement for Wireless Sensor and Actor Networks, [6]).
2. Μηχανισμός 2: Τοποθέτηση ενεργοποιητών με στόχο την μεγιστοποίηση της κάλυψης και την διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ των ενεργοποιητών (C²AP: Coverage – aware and Connectivity – constrained Actor Positioning in Wireless Sensor and Actor Networks, [7]).
3. Μηχανισμός 3: Αυτόνομη τοποθέτηση των ενεργοποιητών σε ένα WSN, με χρήση αλγορίθμου σταθερού ταιριάσματος (Autonomous actor positioning in wireless sensor and actor networks using stable – matching, [8]).

3.2 Μηχανισμός 1: COLA

Θα ξεκινήσουμε την παρουσίαση των τεχνικών τοποθέτησης των ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης, αρχίζοντας από τον μηχανισμό COLA (A Coverage and Latency aware Actor Placement for Wireless Sensor and Actor Networks, [6]).

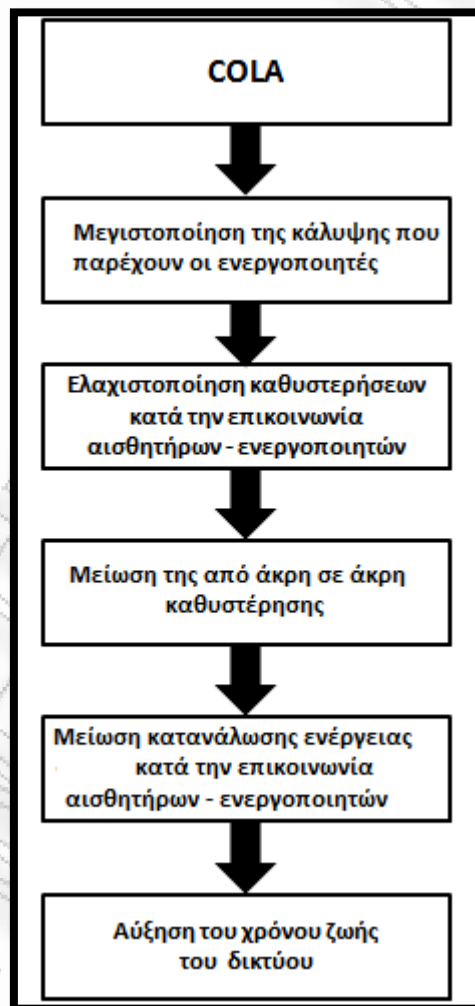
Ο εν λόγω μηχανισμός, επιχειρεί να τοποθετήσει τους ενεργοποιητές στο πεδίο παρατήρησης, με βάση τους δύο παρακάτω άξονες:

1. **Μεγιστοποίηση** της κάλυψης που παρέχουν οι ενεργοποιητές εντός του πεδίου παρατήρησης.
2. **Ελαχιστοποίηση** των καθυστερήσεων κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών. Με άλλα λόγια, ο μηχανισμός επιδιώκει να τοποθετεί τους ενεργοποιητές στο χώρο κατά τέτοιο

τρόπο ώστε, οι αισθητήρες να ενημερώνουν όσο το δυνατόν **συντομότερα** τους ενεργοποιητές, για τα περιστατικά που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο.

Από τη στιγμή που ο μηχανισμός COLA μειώνει τις καθυστερήσεις κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών, αυτό έχει ως επακόλουθο την επιτάχυνση της δράσης των ενεργοποιητών επί των καταγεγραμμένων συμβάντων. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο ενεργοποιητής ειδοποιηθεί πολύ γρήγορα για ένα συμβάν που λαμβάνει χώρα στο δίκτυο, τότε δρα άμεσα σε αυτό προλαμβάνοντας έτσι μία ανεπιθύμητη εξάπλωση του φαινομένου στο δίκτυο (παραδείγματος χάριν σε περίπτωση φωτιάς). Συνεπώς, ο μηχανισμός COLA, μειώνει την **από άκρη σε άκρη καθυστέρηση** στο δίκτυο (**end to end delay**), η οποία περιλαμβάνει την ενημέρωση των ενεργοποιητών από τους αισθητήρες για τα διάφορα συμβάντα, καθώς και το χρόνο που απαιτείται από τους ενεργοποιητές για να δράσουν επί των περιστατικών. Τέλος, η μείωση της από άκρη σε άκρη καθυστέρησης στο δίκτυο, έχει ως επακόλουθο τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά την επικοινωνία αισθητήρων - ενεργοποιητών, μιας και οι ενεργοποιητές τοποθετούνται αρκετά κοντά στους αισθητήρες, όπως θα δούμε και παρακάτω. Τέλος, η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών, οδηγεί σε αύξηση του χρόνου ζωής (lifetime) του WSAN.

Σχηματικά, οι συνολικοί στόχοι που εξασφαλίζονται από το μηχανισμό COLA, φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 3.2: Στόχοι που εξασφαλίζονται από το μηχανισμό COLA.

3.2.1 Αναλυτική παρουσίαση μηχανισμού COLA

Ο μηχανισμός COLA επιδιώκει ουσιαστικά να επιλύσει το παρακάτω πρόβλημα:

“Δοθείσης μίας περιοχής ενδιαφέροντος με γνωστά όρια και ενός συνόλου αισθητήρων και ενεργοποιητών, οι οποίοι σε πρώτη φάση τοποθετούνται τυχαία στο χώρο, ποία είναι η καλύτερη δυνατή

επανατοποθέτηση των ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης η οποία οδηγεί σε μεγιστοποίηση της κάλυψης και ελαχιστοποίηση των χρόνων συλλογής δεδομένων και δράσης των ενεργοποιητών, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς ενέργειας των αισθητήρων” [6].

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, ο μηχανισμός COLA αποτελείται από δύο βασικά μέρη που αναλαμβάνουν να τοποθετήσουν τους ενεργοποιητές στο χώρο, έτσι ώστε να μην υπάρχουν επικαλύψεις (overlaps) στις εμβέλειες δράσης (action range, βλ. ενότητα 2.3.3.3) των ενεργοποιητών. Τα μέρη αυτά, παρουσιάζονται αναλυτικά στις ενότητες που ακολουθούν.

3.2.1.1 Α μέρος COLA: Ομαδοποίηση δικτύου

Το πρώτο μέρος του μηχανισμού COLA, περιλαμβάνει:

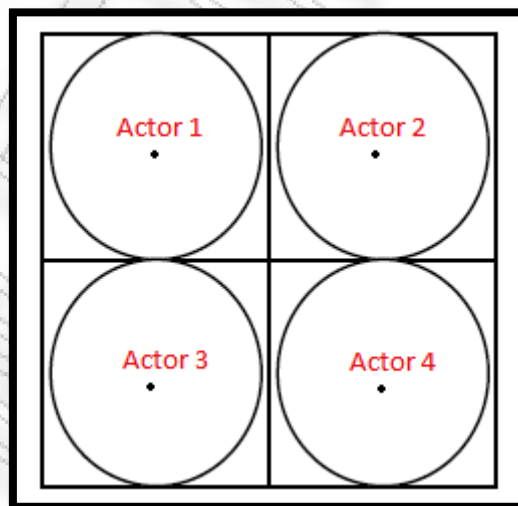
1. Την αρχική τοποθέτηση των ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης με χρήση κατάλληλου κατανεμημένου αλγορίθμου.
2. Την ομαδοποίηση (clustering) των αισθητήρων σε συστάδες/ομάδες (clusters) με χρήση κατάλληλου κατανεμημένου αλγορίθμου.

Αρχική τοποθέτηση ενεργοποιητών

Όπως προαναφέραμε, σε πρώτη φάση οι ενεργοποιητές τοποθετούνται τυχαία εντός του πεδίου παρατήρησης. Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα ο παρακάτω μηχανισμός τοποθέτησης των ενεργοποιητών στο χώρο με στόχο τη μεγιστοποίηση της παρεχόμενης κάλυψης.

Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός COLA χρησιμοποιεί έναν **κατανεμημένο** αλγόριθμο ο οποίος εκτελείται από **όλους τους ενεργοποιητές** του WSN. Το πεδίο παρατήρησης χωρίζεται σε **κυψέλες (cells)** ίσου μεγέθους, ενώ το πλήθος τους ισούται με το πλήθος των ενεργοποιητών του δικτύου. Στη συνέχεια, οι ενεργοποιητές τοποθετούνται στα εκάστοτε κέντρα των κυψελών/ομάδων. Αυτή η τοποθέτηση, οδηγεί σε αύξηση της παρεχόμενης κάλυψης που παρέχουν οι ενεργοποιητές, ενώ παράλληλα μειώνονται οι επικαλύψεις των εμβελειών δράσης [6].

Παρακάτω απεικονίζεται η τοποθέτηση τεσσάρων ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης. Οι ενεργοποιητές τοποθετούνται στα κέντρα των κύκλων. Οι κύκλοι απεικονίζουν την εμβέλεια δράσης του εκάστοτε ενεργοποιητή. Οι ενεργοποιητές, έχουν τη δυνατότητα να μετακινηθούν όταν η εμβέλεια δράσης τους δεν καλύπτει ολόκληρη την περιοχή ευθύνης τους, και υπάρχει ανάγκη δράσης έξω από την εμβέλεια δράσης τους [6]. Παρατηρήστε ότι δεν υπάρχουν επικαλύψεις.



Εικόνα 3.3: Τοποθέτηση τεσσάρων ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης [6].

Τα βήματα του κατανεμημένου αλγορίθμου για τον υπολογισμό των θέσεων των ενεργοποιητών στο χώρο, είναι τα παρακάτω [6]:

1. **Κάθε ενεργοποιητής** αποστέλλει το αναγνωριστικό του (ID) και την θέση του προς όλους τους άλλους ενεργοποιητές μέσω πολυεκπομπής (broadcasting).
2. Χρησιμοποιώντας τα αναγνωριστικά των ενεργοποιητών, το πλήθος των ενεργοποιητών, τη θέση κάθε ενεργοποιητή και τις συντεταγμένες όλων των ορίων του πεδίου παρατήρησης, κάθε ενεργοποιητής εφαρμόζει έναν αναδρομικό αλγόριθμο για να χωρίσει την περιοχή σε κυψέλες. Στη συνέχεια, αποθηκεύει τα κέντρα των κυψελών σε ένα δυαδικό δένδρο.

3. Τέλος, κάθε ενεργοποιητής υπολογίζει τη κοντινότερη κυψέλη στην οποία θα μεταβεί, συγκρίνοντας την αρχική του θέση με τα κέντρα που έχει αποθηκεύσει στο δυαδικό του δένδρο. Αφού κάθε ενεργοποιητής επιλέγει να μεταβεί στην κοντινότερη κυψέλη, ελαχιστοποιείται η συνολική απόσταση που διανύουν οι ενεργοποιητές με επακόλουθο την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας που απαιτεί η κίνηση των ενεργοποιητών.
4. Κάθε ενεργοποιητής αρχίζει να κινείται προς το αντίστοιχο κέντρο κυψέλης που έχει επιλέξει.

Ο παραπάνω αλγόριθμος εξασφαλίζει μία 1-1 ανάθεση των ενεργοποιητών στα κέντρα των κυψελών. Αυτό οφείλεται στο ότι όλοι οι ενεργοποιητές διαθέτουν την ίδια πληροφορία και ακολουθούν την ίδια σειρά κατά την ανάθεση θέσεων σε ενεργοποιητές, σύμφωνα με το αναγνωριστικό ID. Έτσι, όλοι οι ενεργοποιητές δημιουργούν την ίδια λίστα ανάθεσης, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται τυχόν συγκρούσεις [6].

Δημιουργία συστάδων

Αφού τοποθετήσαμε κατάλληλα τους ενεργοποιητές στο πεδίο παρατήρησης του WSN, σειρά έχει η ομαδοποίηση των αισθητήρων του δικτύου σε συστάδες (ομάδες). Κάθε συστάδα, θα αποτελείται από έναν κόμβο – αρχηγό (Cluster Head - CH). Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει να διατελέσει ο εκάστοτε ενεργοποιητής της ομάδας. Ειδικότερα, οι αισθητήρες της συστάδας, θα στέλνουν τις μετρήσεις τους στον ενεργοποιητή – αρχηγό της ομάδας, ο οποίος θα δρα αναλόγως επί των συμβάντων.

Για τη δημιουργία των συστάδων, ο μηχανισμός COLA χρησιμοποιεί τον παρακάτω αλγόριθμο συσταδοποίησης [6]:

1. Αρχικά, κάθε ενεργοποιητής του δικτύου αποστέλλει μέσω πολυεκπομπής (broadcasting), ένα μήνυμα το οποίο περιέχει το αναγνωριστικό του (ID) και την τρέχουσα θέση του.
2. Ένας αισθητήρας που λαμβάνει το παραπάνω μήνυμα, υπολογίζει την απόστασή του από τον εν λόγω ενεργοποιητή.
3. Ο αισθητήρας περιμένει για ένα χρονικό διάστημα έτσι ώστε να λάβει αντίστοιχα μηνύματα και από άλλους ενεργοποιητές.
4. Ο αισθητήρας υπολογίζει την απόστασή του και από τους υπόλοιπους ενεργοποιητές που έλαβε μηνύματα.
5. Ο αισθητήρας επιλέγει τον ενεργοποιητή από τον οποίο απέχει την **ελάχιστη** δυνατή απόσταση.
6. Ο αισθητήρας αποστέλλει ένα μήνυμα στον εν λόγω ενεργοποιητή και εντάσσεται στη συστάδα του.

Με τον παραπάνω αλγόριθμο, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ενεργοποιητές, χωρίζεται σε συστάδες, όπου κάθε συστάδα αποτελείται από τους αντίστοιχους αισθητήρες και ηγείται από τον αντίστοιχο ενεργοποιητή – αρχηγό. Το πλήθος των συστάδων του δικτύου, ισούται με τον αριθμό των ενεργοποιητών του WSN.

Το Α μέρος του μηχανισμού COLA που μόλις παρουσιάσαμε, έχει ως αποτέλεσμα την τοποθέτηση των ενεργοποιητών στο χώρο με στόχο την μεγιστοποίηση της κάλυψης που παρέχουν οι τελευταίοι μέσα στο πεδίο παρατήρησης. Ο μηχανισμός όμως, στοχεύει παράλληλα στην ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών. Για αυτόν ακριβώς το λόγο απαιτείται μία επανατοποθέτηση των ενεργοποιητών εντός του πεδίου παρατήρησης. Αυτή η επανατοποθέτηση πραγματοποιείται μέσω κατάλληλου αλγορίθμου, η παρουσίαση του οποίου γίνεται στην ενότητα που ακολουθεί.

3.2.1.2 Β μέρος COLA: Επανατοποθέτηση ενεργοποιητών

Ο κατανεμημένος αλγόριθμος της ενότητας 3.2.1.1 τοποθετεί τους ενεργοποιητές στα κέντρα των κυψελών/ συστάδων με σκοπό την μεγιστοποίηση της κάλυψης που παρέχουν οι τελευταίοι στο πεδίο παρατήρησης. Για την ελαχιστοποίηση όμως των καθυστερήσεων κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών, απαιτείται μία **επανατοποθέτηση** των ενεργοποιητών εντός των ορίων των συστάδων τους. Η νέα θέση του κάθε ενεργοποιητή, θα πρέπει να επιλέγεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της **μέγιστης καθυστέρησης** που εμφανίζεται κατά τη μετάδοση ενός πακέτου από έναν αισθητήρα της συστάδας προς τον αντίστοιχο ενεργοποιητή. Με άλλα λόγια, επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του πλήθους των μεταδόσεων (hops) κατά μήκος του μακρύτερου μονοπατιού μεταξύ αισθητήρα και ενεργοποιητή της συστάδας [6].

Η επανατοποθέτηση αυτή των ενεργοποιητών, πραγματοποιείται εντός των ορίων των συστάδων τους, έτσι ώστε να μην διαταράσσεται η **κάλυψη** που παρέχουν στο πεδίο παρατήρησης και να αποφεύγονται, όσο το δυνατόν περισσότερο οι τυχόν **επικαλύψεις** των εμβλειών δράσεις των ενεργοποιητών. Η νέα

θέση των ενεργοποιητών δεν θα απέχει πολύ από το κέντρο των αντίστοιχων συστάδων [6]. Επιπρόσθετα, όπως προαναφέραμε και στην ενότητα 3.2.1.1, ο ενεργοποιητής μπορεί να κινηθεί όταν η εμβέλεια δράσης του δεν επαρκεί για να καλύψει ολόκληρη τη συστάδα για την οποία είναι υπεύθυνος [6].

Για την επανατοποθέτηση των ενεργοποιητών εντός των συστάδων τους, ο μηχανισμός COLA χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο **vertex 1 – center**, ο οποίος εξασφαλίζει ότι ακόμα και ο πιο απομακρυσμένος αισθητήρας μίας συστάδας, μεταδίδει τα δεδομένα του προς τον αντίστοιχο ενεργοποιητή εντός αποδεκτού χρόνου [6]. Ο αλγόριθμος έχει ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση του ενεργοποιητή της συστάδας στη θέση ενός αισθητήρα της ομάδας [6]. Κάθε ενεργοποιητής του δικτύου, εφαρμόζει **ξεχωριστά** τον αλγόριθμο vertex 1 – center για να μετακινηθεί εντός της συστάδας του. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω, ξεκινώντας με την παράθεση του αντίστοιχου ψευδοκώδικα [6], και την βήμα προς βήμα επεξήγησή του.

Ψευδοκώδικας για τον αλγόριθμο vertex 1 – center

1. Ο ενεργοποιητής υπολογίζει τον πίνακα ελαχίστων αποστάσεων M της συστάδας του
 $M = d[k, l]$ για $\forall k, l \in$ στους αισθητήρες της συστάδας.
2. **for** κάθε γραμμή m του πίνακα M **do**
/ Βρες το μακρύτερο μονοπάτι για αυτόν τον κόμβο αισθητήρα προς όλους τους υπόλοιπους αισθητήρες της συστάδας. */*
3. *Find Max(row(m));*
4. $MaxList \leftarrow Max(row(m));$
/ Από τη λίστα MaxList με τις μακρύτερες διαδρομές, επέλεξε τον αισθητήρα με την ελάχιστη διαδρομή. */*
5. $MinCost \leftarrow Min(MaxList);$
6. $VertexCenter \leftarrow Position(First\ node\ on\ Path(MinCost));$
7. Επανατοποθέτησε τον ενεργοποιητή στη θέση VertexCenter.

Ο παραπάνω αλγόριθμος, υπολογίζει στο βήμα 1 τον πίνακα ελαχίστων αποστάσεων M μεταξύ όλων των αισθητήρων της συστάδας. Με $d[k, l]$ συμβολίζουμε την ελάχιστη απόσταση (σε πλήθος hops μετάδοσης) μεταξύ των αισθητήρων k και l της συστάδας. Ο πίνακας M , υπολογίζεται εντός πολυωνυμικού χρόνου μέσω του αλγορίθμου εύρεσης ελαχίστων μονοπατιών **Floyd – Warshall**. Οι διαστάσεις του πίνακα M είναι $N \times N$, όπου N : το πλήθος των αισθητήρων της συστάδας.

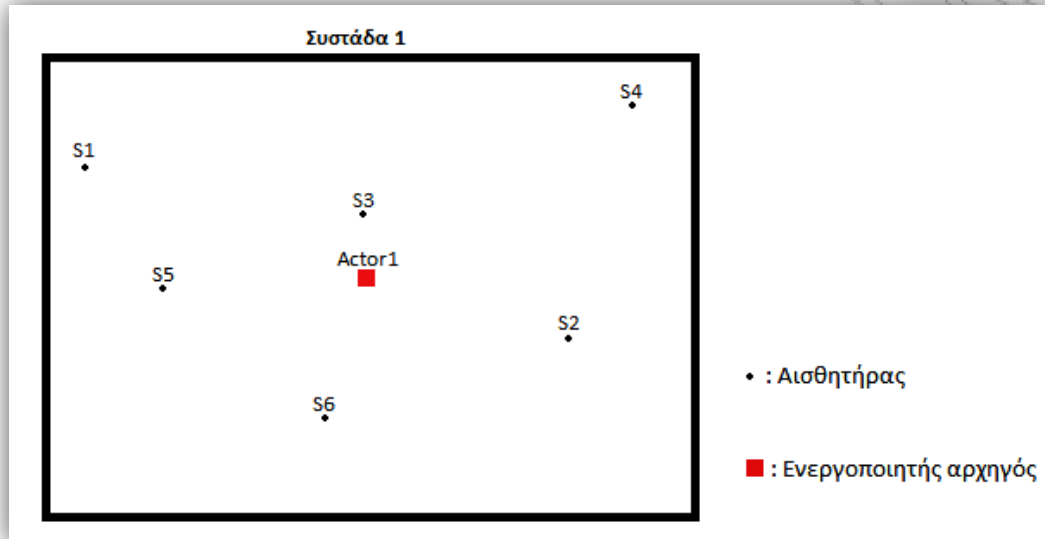
Στη συνέχεια, σε κάθε γραμμή του πίνακα M , βρίσκουμε την μέγιστη τιμή της γραμμής, η οποία αντιστοιχεί στην μέγιστη απόσταση του εν λόγω αισθητήρα προς κάθε άλλο αισθητήρα της συστάδας (βήμα 2, 3). Αμέσως μετά, οι τιμές αυτές αποθηκεύονται στη λίστα $MaxList$ (βήμα 4). Από τη λίστα $MaxList$, βρίσκεται η ελάχιστη τιμή $MinCost$ (βήμα 5). Η θέση του αισθητήρα της συστάδας, στον οποίο αντιστοιχεί αυτή η τιμή $MinCost$, αποτελεί τη νέα θέση (vertex 1 - center) του ενεργοποιητή μέσα στη συστάδα (VertexCenter βήμα 6). Τέλος, ο ενεργοποιητής μετακινείται προς τη νέα θέση του (βήμα 7).

Από τη στιγμή που η νέα θέση του ενεργοποιητή (VertexCenter), αντιστοιχεί σε κάποια τοποθεσία κάποιου αισθητήρα της συστάδας, το γεγονός αυτό εξασφαλίζει ότι η επανατοποθέτηση του ενεργοποιητή γίνεται εντός των ορίων της συστάδας του, και ότι η επικάλυψη των εμβελειών δράσης των ενεργοποιητών, παραμένει στο ελάχιστο [6].

Στιγμιότυπο εκτέλεσης του αλγορίθμου vertex 1 – center

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ενεργοποιητές της εικόνας 3.3. Οι ενεργοποιητές βρίσκονται τοποθετημένοι στα κέντρα των συστάδων. Κάθε ενεργοποιητής της εικόνας, εκτελεί τον αλγόριθμο vertex 1 – center **ξεχωριστά**, για να μετακινηθεί εντός της συστάδας του. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, για λόγους συντομίας, εκτελούμε τον αλγόριθμο μονάχα για τη συστάδα 1 (επάνω αριστερή συστάδα της εικόνας 3.3) του ενεργοποιητή 1. Η διαδικασία είναι ίδια και για τις υπόλοιπες τρεις συστάδες του δικτύου, με την εκτέλεση του αλγορίθμου vertex 1 – center σε κάθε

συστάδα από τους αντίστοιχους ενεργοποιητές. Παρακάτω, ακολουθεί μία εικόνα η οποία περιλαμβάνει τους έξι αισθητήρες και τον ενεργοποιητή της συστάδας 1 πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου vertex 1 - center. Το πλήθος των αισθητήρων της συστάδας 1 είναι τυχαίο για την εξυπηρέτηση του παρόντος παραδείγματος.



Εικόνα 3.4: Κατάσταση συστάδας πριν την εφαρμογή του vertex 1 – center αλγορίθμου.

Ο ενεργοποιητής εκτελεί τον αλγόριθμο vertex 1 – center. Αρχικά, κατασκευάζεται ο παρακάτω πίνακας M (μέσω της εκτέλεσης του αλγορίθμου Floyd – Warshall από τον ενεργοποιητή 1 της συστάδας 1) με τις ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των έξι αισθητήρων της συστάδας. Για παράδειγμα, ο αισθητήρας 1 για να επικοινωνήσει με τον αισθητήρα 2, πρώτα στέλνει τα δεδομένα του στον αισθητήρα 3 και αυτός με τη σειρά του τα προωθεί στον 2. Ο αισθητήρας 1 δε μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με τον 2 λόγω χαμηλής εμβέλειας μετάδοσης (transmission range). Συνεπώς έχουμε 2 μεταδόσεις, για αυτόν ακριβώς το λόγο, στη θέση $M = [\text{Αισθητήρας 1}, \text{Αισθητήρας 2}]$ του πίνακα M, τοποθετούμε την τιμή 2. Υπενθυμίζουμε εδώ, πως αυτή η μετάδοση είναι η βέλτιστη δυνατή (από άποψη πλήθους αναμεταδόσεων του ίδιου πακέτου), μιας και ο αισθητήρας 1 θα μπορούσε να δρομολογήσει τα πακέτα του προς τον αισθητήρα 2 μέσω του μονοπατιού: αισθητήρας 1 → αισθητήρας 5 → αισθητήρας 6 → αισθητήρας 2. Μία τέτοια μετάδοση θα οδηγούσε σε $\text{hop} = 3$.

Με την ίδια ακριβώς φιλοσοφία συμπληρώνονται και οι υπόλοιπες θέσεις του πίνακα M, ο οποίος φαίνεται παρακάτω.

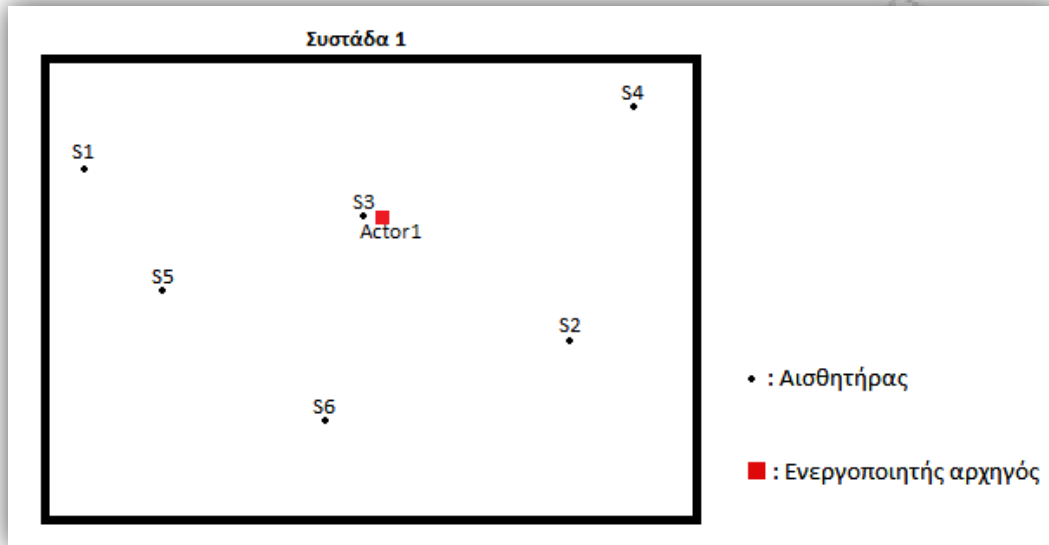
| | Αισθητήρας1 | Αισθητήρας2 | Αισθητήρας3 | Αισθητήρας4 | Αισθητήρας5 | Αισθητήρας6 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Αισθητήρας1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Αισθητήρας2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Αισθητήρας3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Αισθητήρας4 | 2 | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 |
| Αισθητήρας5 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| Αισθητήρας6 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 |

Στη συνέχεια υπολογίζεται η λίστα MaxList, η οποία περιέχει τις μέγιστες τιμές κάθε γραμμής του πίνακα M. Η λίστα έχει ως εξής:

$$\text{MaxList} = \{2, 2, 1, 2, 2, 2\}$$

Το ελάχιστο στοιχείο της λίστας MaxList ισούται με 1, συνεπώς $\text{MinCost} = 1$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στον αισθητήρα 3 της συστάδας. Συνεπώς, ο ενεργοποιητής 1 της συστάδας 1, μετακινείται προς τη **θέση του αισθητήρα 3** μέσα στη συστάδα. Άρα, $\text{VertexCenter} = \text{Θέση του ενεργοποιητή 3}$.

Η κατάσταση της συστάδας 1 αμέσως μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου vertex 1 – center, φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 3.5: Κατάσταση συστάδας μετά την εφαρμογή του vertex 1 – center αλγορίθμου.

Παρατηρούμε ότι ο ενεργοποιητής, έχει μετακινηθεί στη θέση του αισθητήρα 3 της συστάδας. Η νέα θέση του ενεργοποιητή δεν απέχει πολύ από το κέντρο της συστάδας στο οποίο βρισκόταν πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου vertex 1 – center.

Η επανοτοποθέτηση αυτή των ενεργοποιητών των συστάδων, μειώνει τις καθυστερήσεις κατά τη μετάδοση δεδομένων από τους αισθητήρες προς τους ενεργοποιητές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι ενεργοποιητές έρχονται πιο κοντά στους αισθητήρες, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η καταναλισκόμενη ενέργεια κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται και ο χρόνος ζωής του δικτύου (network lifetime), όπως αναφέραμε και στην ενότητα 3.2.

3.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα COLA

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του μηχανισμού τοποθέτησης ενεργοποιητών COLA.

Πλεονεκτήματα μηχανισμού COLA

- ✓ Όλοι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από το μηχανισμό COLA (1: αλγόριθμος για την αρχική τοποθέτηση των ενεργοποιητών στα κέντρα των κυψελών, 2: αλγόριθμος για τη δημιουργία των συστάδων, 3: αλγόριθμος vertex 1 - center) είναι πλήρως καταναλισκόμενοι. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καταναλώνεται το υπολογιστικό κόστος των αλγορίθμων σε όλους τους κόμβους του δικτύου και κυρίως στους ενεργοποιητές (διαθέτουν μεγαλύτερα αποθέματα ενέργειας και υπολογιστική ισχύ από τους αισθητήρες) του WSN οι οποίοι εκτελούν τους αλγόριθμους 1 και 3 καθώς και το 1^ο βήμα του αλγορίθμου 2. Τα υπόλοιπα βήματα του αλγορίθμου 2 εκτελούνται από όλους τους αισθητήρες του δικτύου. Η καταναλισκόμενη εκτέλεση των αλγορίθμων οδηγεί σε αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου, μιας και η ενέργεια που απαιτεί η εκτέλεσή τους δεν επιβαρύνει ένα μοναδικό κόμβο (για παράδειγμα έναν μοναδικό ενεργοποιητή υπεύθυνο για την εκτέλεση των αλγορίθμων), αλλά όλους τους κόμβους του δικτύου. Έτσι, η επιβάρυνση λόγω της εκτέλεσης των αλγορίθμων, είναι ομοιόμορφη στους κόμβους του WSN και όχι συγκεντρωτική σε ένα μοναδικό κόμβο, γεγονός που αυξάνει το συνολικό χρόνο ζωής του δικτύου.
- ✓ Ο μηχανισμός COLA, τοποθετεί τους ενεργοποιητές στο χώρο με κυρίαρχο σκοπό τη μεγιστοποίηση της παρεχόμενης κάλυψης από τους ενεργοποιητές και τη μείωση των καθυστερήσεων κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών. Παράλληλα όμως εξασφαλίζεται, η μείωση της από άκρη σε άκρη καθυστέρησης στο δίκτυο, η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά την επικοινωνία αισθητήρων – ενεργοποιητών, καθώς και η αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου (βλ. ενότητα 3.2).

Μειονεκτήματα μηχανισμού COLA

- Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου αρχικής τοποθέτησης των ενεργοποιητών στα κέντρα των κυψελών (βλ. ενότητα 3.2.1.1), οι ενεργοποιητές, μπορεί να αντιμετωπίσουν δυσκολία, στο βήμα 2 του εν λόγω αλγορίθμου, στο να χωρίσουν το πεδίο παρατήρησης σε κυψέλες, αν η περιοχή δεν είναι ομοιόμορφη (για παράδειγμα τετραγωνική περιοχή) με σαφή, διακριτά όρια και συντεταγμένες.
- Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου vertex 1 – center από τους ενεργοποιητές του WSN, η επανατοποθέτηση των ενεργοποιητών μέσα στο πεδίο παρατήρησης μπορεί **πιθανόν** να οδηγήσει σε δυσάρεστες επικαλύψεις των εμβλειών δράσης των ενεργοποιητών. Αυτό έχει ως συνέπεια μία πιθανή διατάραξη της κάλυψης που παρέχουν οι ενεργοποιητές του δικτύου. Παρόλα αυτά, οι δημιουργοί του μηχανισμού COLA, ισχυρίζονται πως η επανατοποθέτηση των ενεργοποιητών μέσω του αλγορίθμου vertex 1 – center, δεν απέχει σημαντικά από τα κέντρα των συστάδων, γεγονός που περιορίζει τις επικαλύψεις των εμβλειών δράσης των ενεργοποιητών.

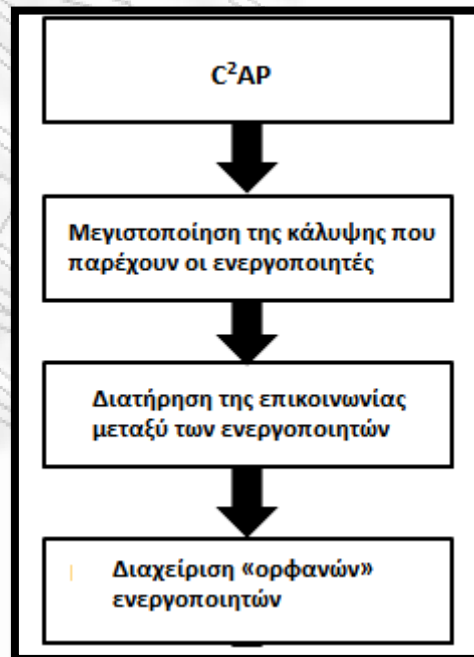
3.3 Μηχανισμός 2: C²AP

Ο δεύτερος μηχανισμός τοποθέτησης ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης που θα μας απασχολήσει, ονομάζεται **C²AP** (Coverage – aware and Connectivity – constrained Actor Positioning in Wireless Sensor and Actor Networks, [7]).

Ο εν λόγω μηχανισμός, επιχειρεί να τοποθετήσει τους ενεργοποιητές του WSN στο πεδίο παρατήρησης, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζονται οι τρεις παρακάτω στόχοι:

1. Μεγιστοποίηση της κάλυψης που παρέχουν οι ενεργοποιητές εντός του πεδίου παρατήρησης.
2. Διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ των ενεργοποιητών του δικτύου (maintenance of inter – actor connectivity). Ουσιαστικά επιδιώκεται η διατήρηση του **δικτύου ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών (inter – actor network)**.
3. Διαχείριση «ορφανών» ενεργοποιητών: Πρόκειται για ενεργοποιητές που είναι αποκομμένοι από το δίκτυο ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών. Ουσιαστικά, οι «ορφανοί» ενεργοποιητές δεν έχουν επικοινωνία με κανέναν άλλον ενεργοποιητή του WSN, μιας και βρίσκονται έξω από τις εμβλέιες μετάδοσης (transmission range) τους. Ο μηχανισμός C²AP, ανακαλύπτει αυτούς τους ενεργοποιητές και τους εντάσσει στο δίκτυο ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών.

Σχηματικά, οι στόχοι που εξασφαλίζονται από το μηχανισμό C²AP, φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί:



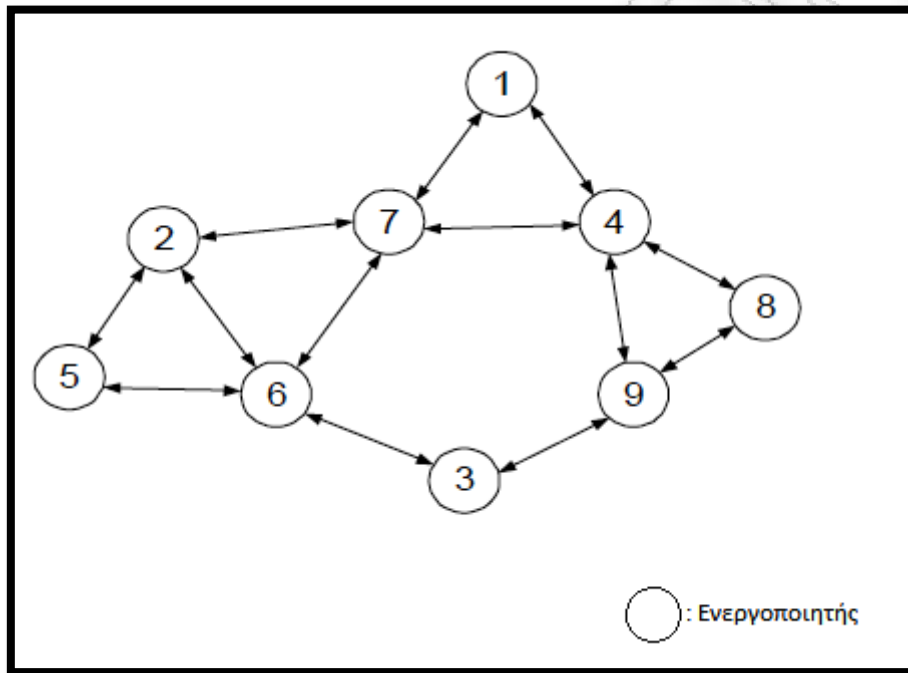
Εικόνα 3.6: Στόχοι που εξασφαλίζονται από το μηχανισμό C²AP.

3.3.1 Αναλυτική παρουσίαση μηχανισμού C²AP

Ο μηχανισμός C²AP επιδιώκει ουσιαστικά να επιλύσει το παρακάτω πρόβλημα:

“Δοθέντος ενός συνόλου αισθητήρων το οποίο τοποθετείται τυχαία και σε πυκνή διάταξη εντός του πεδίου παρατήρησης του WSN και n ενεργοποιητών, η αρχική τοποθέτηση των οποίων οδηγεί σε ένα **δίκτυο ενδοεπικοινωνίας (inter – actor network)** μεταξύ τους, ποιά είναι η καλύτερη δυνατή επανατοποθέτηση των ενεργοποιητών στο χώρο παρατήρησης, η οποία οδηγεί σε μεγιστοποίηση της κάλυψης που παρέχουν οι ενεργοποιητές στο δίκτυο, ενώ παράλληλα διατηρείται η επικοινωνία μεταξύ των ενεργοποιητών” [7].

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται εύκολα κατανοητό, ότι ο μηχανισμός C²AP εφαρμόζεται σε ένα WSN με την προϋπόθεση ότι, η **αρχική τοποθέτηση** των ενεργοποιητών είναι τέτοια ώστε να σχηματίζουν ένα δίκτυο ενδοεπικοινωνίας μεταξύ τους. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο μηχανισμός ο οποίος εξασφαλίζει τους στόχους που αναφέραμε στην ενότητα 3.3. Μία πιθανή αρχική τοπολογία των ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 3.7: Δίκτυο ενδοεπικοινωνίας ενεργοποιητών [7].

Πιο συγκεκριμένα, στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το δίκτυο ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών. Παρατηρούμε ότι οι ενεργοποιητές επικοινωνούν μεταξύ τους, είτε απευθείας, είτε μέσω ενδιάμεσων ενεργοποιητών. Στην πρώτη περίπτωση, οι ενεργοποιητές επικοινωνούν απευθείας με τους γείτονές τους (στην εικόνα 3.7 οι γείτονες συνδέονται μέσω ζεύξεων στο γράφημα). Δύο ενεργοποιητές θεωρούνται γειτονικοί, όταν ο ένας βρίσκεται εντός εμβέλειας μετάδοσης του άλλου. Για παράδειγμα, ο ενεργοποιητής 2 επικοινωνεί απευθείας με τους ενεργοποιητές 5, 6 και 7, μιας και αυτοί βρίσκονται εντός της εμβέλειας μετάδοσής του. Όταν η εμβέλεια μετάδοσης ενός ενεργοποιητή δεν περιλαμβάνει τον ενεργοποιητή στον οποίο επιθυμεί να μεταδώσει πληροφορία, τότε λαμβάνει χώρα η ενδιάμεση δρομολόγηση. Για παράδειγμα ο ενεργοποιητής 5 επικοινωνεί με τον 8 μέσω του μονοπατιού: 5→6→3→9→8.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι ο μηχανισμός C²AP εφαρμόζεται και σε περιπτώσεις όπου ένας ή περισσότεροι ενεργοποιητές είναι εκτός του δικτύου ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών, και δεν έχουν επικοινωνία με κανέναν άλλον ενεργοποιητή του δικτύου. Πρόκειται για τους «ορφανούς» ενεργοποιητές (βλ. ενότητα 3.3), τους οποίους ο μηχανισμός επιχειρεί να τοποθετήσει εντός του δικτύου ενδοεπικοινωνίας, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο τη διασύνδεση των ενεργοποιητών του WSN (τρίτος στόχος μηχανισμού C²AP, ενότητα 3.3).

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, ο μηχανισμός C²AP χρησιμοποιεί συγκεκριμένες τεχνικές, οι οποίες είναι οι εξής:

1. Απωθητικές δυνάμεις.
2. Εξάλειψη περιττών ζεύξεων.

3. Καθολική σειρά επανατοποθετήσεων.
4. Διαχείριση «ορφανών» ενεργοποιητών.

Όλες οι παραπάνω τεχνικές αναλύονται με λεπτομέρεια στις ενότητες που ακολουθούν.

3.3.1.1 Απωθητικές δυνάμεις

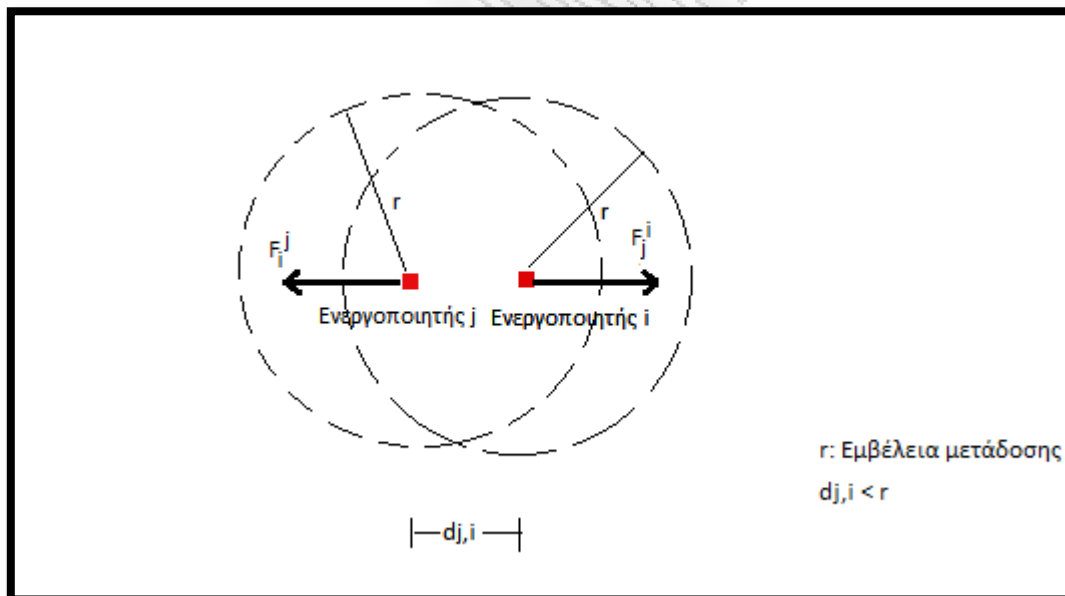
Ο μηχανισμός C²AP, βασίζεται στους νόμους της φυσικής για την επανατοποθέτηση των ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης. Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός εφαρμόζει την τεχνική των **απωθητικών δυνάμεων (repelling forces)**, οι οποίες ασκούνται μεταξύ των μοριακών σωματιδίων. Κάθε ενεργοποιητής του WSAN, δέχεται (και ταυτόχρονα ασκεί) απωθητικές δυνάμεις από τους γείτονές του, καθώς και από τα ακραία σημεία (όρια) του πεδίου παρατήρησης με αποτέλεσμα την μετακίνησή του στο πεδίο παρατήρησης [7]. Η τεχνική των απωθητικών δυνάμεων αποσκοπεί στα εξής:

1. Μεγιστοποίηση της κάλυψης που θα παρέχουν οι ενεργοποιητές στο πεδίο παρατήρησης, αμέσως μετά την επανατοποθέτησή τους.
2. Διατήρηση του δικτύου ενδοεπικοινωνίας μεταξύ των ενεργοποιητών και μετά την επανατοποθέτηση των τελευταίων στο πεδίο παρατήρησης.

Η απωθητική δύναμη που ασκεί ένας ενεργοποιητής j σε έναν ενεργοποιητή i , υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [7]:

$$F_j^i = \begin{cases} \frac{(r - d_{ji})}{2}, & \text{εάν } r > d_{ji} \\ 0, & \text{εάν } r \ll d_{ji} \end{cases} \quad (1)$$

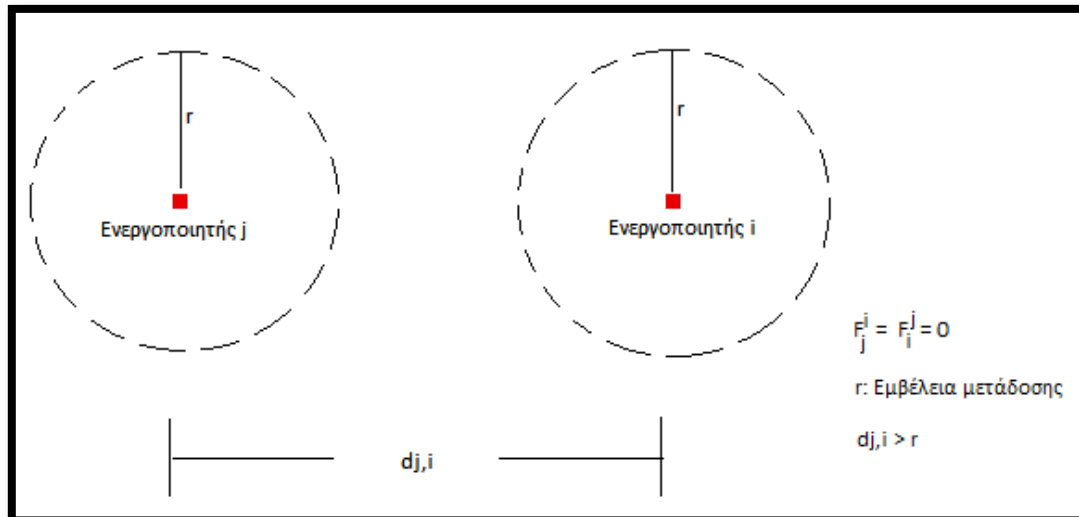
Όπου r είναι η εμβέλεια μετάδοσης των ενεργοποιητών του WSAN (κοινή για όλους τους ενεργοποιητές του δικτύου), και d_{ji} η απόσταση μεταξύ των ενεργοποιητών j και i . Από τον ίδιο τύπο προκύπτει και η αντίστοιχη δύναμη F_i^j που ασκεί ο ενεργοποιητής i στον j . Παρακάτω ακολουθεί μία γραφική αναπαράσταση των δυνάμεων F_j^i και F_i^j .



Εικόνα 3.8: Απωθητικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των i και j .

Στην εικόνα 3.8 ο ενεργοποιητής i είναι εντός εμβέλειας του ενεργοποιητή j (όπως και ο j είναι εντός εμβέλειας του i). Συνεπώς του ασκεί απωθητική δύναμη F_j^i , η οποία υπολογίζεται από το πρώτο σκέλος του τύπου (1). Αντίστοιχα, ο ενεργοποιητής j ασκεί απωθητική δύναμη F_i^j , ίδιου μέτρου αλλά αντίθετης φοράς με την F_j^i .

Όταν ο ενεργοποιητής i είναι εκτός εμβέλειας του j και αντίστοιχα ο j εκτός εμβέλειας του i , τότε δεν ασκούνται απωθητικές δυνάμεις μεταξύ των ενεργοποιητών, σύμφωνα και με το δεύτερο σκέλος της σχέσης (1). Η περίπτωση αυτή, απεικονίζεται γραφικά στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 3.9: Παράδειγμα μη άσκησης απωθητικών δυνάμεων.

Αντίστοιχα, η απωθητική δύναμη που ασκεί ένα ακραίο σημείο e του πεδίου παρατήρησης σε έναν ενεργοποιητή i, υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [7]:

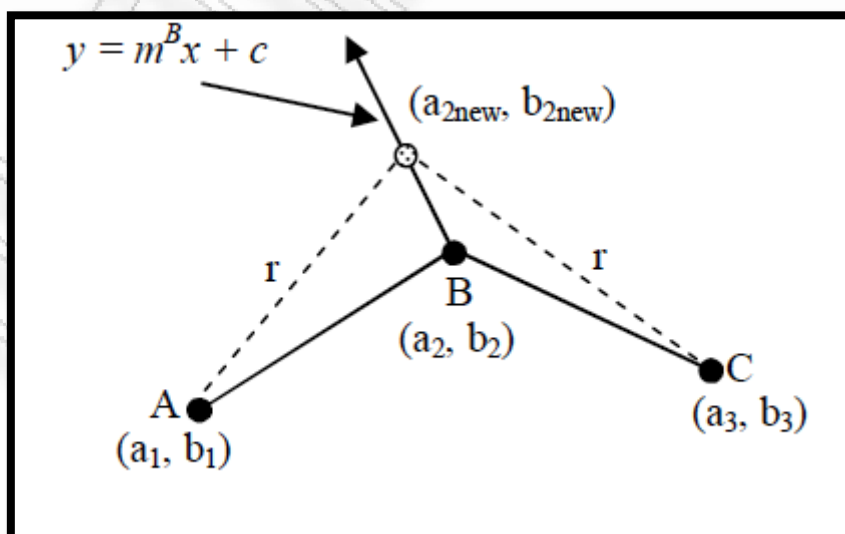
$$F_e^i = \begin{cases} (s - d_{ei}), & \text{εάν } s > d_{ei} \\ 0, & \text{εάν } s \ll d_{ei} \end{cases} \quad (2)$$

Όπου με s συμβολίζουμε την εμβέλεια δράσης του ενεργοποιητή i (κοινή για όλους τους ενεργοποιητές του δικτύου), και με d_{ei} την απόσταση μεταξύ του ακραίου σημείου e και του ενεργοποιητή i.

Υπολογισμός συνισταμένης δύναμης

Όταν ένας ενεργοποιητής διαθέτει παραπάνω από έναν γείτονα, τότε πρέπει να υπολογιστεί η **συνισταμένη** των απωθητικών δυνάμεων που του ασκούνται, για να καθοριστεί η τελική τοποθεσία στην οποία θα μεταβεί. Ο ενεργοποιητής θα μετακινηθεί προς τη φορά της συνισταμένης δύναμης. Η τελική θέση στην οποία θα μεταβεί, θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην «σπάσει» καμία ζεύξη (link) επικοινωνίας προς τους γείτονές του. Συνεπώς, η νέα θέση του ενεργοποιητή, θα είναι τέτοια ώστε να απέχει από τον κάθε γείτονά του το πολύ απόσταση ίση με την εμβέλεια μετάδοσης r.

Ας πάρουμε για παράδειγμα τη περίπτωση ενός ενεργοποιητή ο οποίος διαθέτει δύο γείτονες. Ο ενεργοποιητής δέχεται δύο απωθητικές δυνάμεις από τους αντίστοιχους γείτονές του, συνεπώς απαιτείται ο υπολογισμός της συνισταμένης δύναμης, για την εύρεση της τελικής θέσης του ενεργοποιητή. Παρακάτω απεικονίζεται η συγκεκριμένη περίπτωση.



Εικόνα 3.10: Συνισταμένη απωθητικών δυνάμεων [7].

Πιο συγκεκριμένα, στην παραπάνω εικόνα, ο ενεργοποιητής B δέχεται απωθητικές δυνάμεις από τους γείτονές του A και C. Η δύναμη που απεικονίζεται είναι η συνισταμένη των δύο απωθητικών δυνάμεων. Πάνω σε αυτό το διάγραμμα θα τοποθετηθεί τελικά ο ενεργοποιητής B. Η τελική όμως θέση θα πρέπει να απέχει από τους ενεργοποιητές A και C το πολύ απόσταση ίση με r έτσι ώστε να μην υπάρξουν απώλειες επικοινωνίας. Η τελική θέση του ενεργοποιητή B, υπολογίζεται με την παρακάτω διαδικασία.

Ας υποθέσουμε ότι η συνισταμένη δύναμη περιγράφεται από την εξίσωση:

$$y = m^B x + c \quad (3)$$

Η παραπάνω ευθεία διέρχεται από το σημείο (a_2, b_2) , συνεπώς η σταθερά c , υπολογίζεται ως εξής:

$$b_2 = m^B a_2 + c \quad \text{μέσω (3)}$$

$$\Rightarrow c = b_2 - m^B a_2 \quad (4)$$

Η ευθεία διέρχεται επίσης από τη νέα θέση (a_{2new}, b_{2new}) του ενεργοποιητή B. Συνεπώς, εφαρμόζοντας αυτό το σημείο στην εξίσωση (3), προκύπτει:

$$b_{2new} = m^B a_{2new} + c \quad (5)$$

Όπως προαναφέραμε, η νέα θέση (a_{2new}, b_{2new}) του ενεργοποιητή B θα πρέπει να απέχει από τους γείτονές του το πολύ απόσταση r . Χρησιμοποιώντας τον τύπο της **ευκλείδειας απόστασης**, προκύπτουν οι παρακάτω ανισότητες:

$$(a_{2new} - a_1)^2 + (b_{2new} - b_1)^2 \leq r^2 \quad (6)$$

για την απόσταση της νέας θέσης του B από τον ενεργοποιητή A, και

$$(a_{2new} - a_3)^2 + (b_{2new} - b_3)^2 \leq r^2 \quad (7)$$

για την απόσταση της νέας θέσης του B από τον ενεργοποιητή C. Από τις σχέσεις (5), (6) και (7), υπολογίζεται η νέα θέση (a_{2new}, b_{2new}) του ενεργοποιητή B.

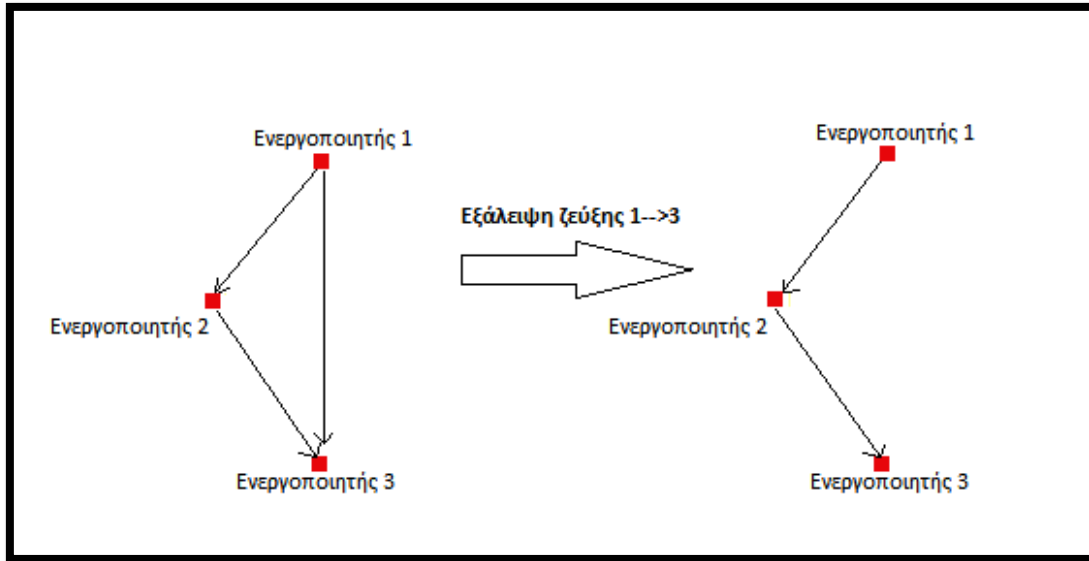
Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση που κάποιος ενεργοποιητής διαθέτει παραπάνω από δύο γείτονες, τότε υπολογίζεται η συνισταμένη όλων των απωθητικών δυνάμεων που ασκούνται στον ενεργοποιητή. Στη συνέχεια, για κάθε ζεύγος γειτόνων υπολογίζεται μέσω των σχέσεων (5), (6) και (7) μία πιθανή τελική θέση του ενεργοποιητή [7]. Τελικά, από όλες τις πιθανές θέσεις, επιλέγεται η πιο κοντινή από όλες τις εναλλακτικές. Η τελική θέση του ενεργοποιητή θα πρέπει να απέχει απόσταση το πολύ ίση με r από όλους τους γείτονές του.

3.3.1.2 Εξάλειψη περιττών ζεύξεων

Όταν ένας ενεργοποιητής διαθέτει πολλούς γειτονικούς ενεργοποιητές, τότε κατά τον υπολογισμό της νέας θέσης του στο πεδίο παρατήρησης μέσω της τεχνικής των απωθητικών δυνάμεων, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες οι ζεύξεις επικοινωνίας με τους αντίστοιχους γείτονες. Κάτι τέτοιο, μπορεί να οδηγήσει τον ενεργοποιητή σε περιορισμένη μετάκίνηση μέσα στο πεδίο παρατήρησης, με αποτέλεσμα την χαμηλή βελτίωση της παρεχόμενης κάλυψης.

Για αυτόν ακριβώς το λόγο, ο μηχανισμός C^2AP χρησιμοποιεί την τεχνική της **εξάλειψης περιττών ζεύξεων** για την μείωση του πλήθους των γειτονικών ενεργοποιητών ενός ενεργοποιητή. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω τεχνική επιδιώκει να διατηρήσει τον ελάχιστο αριθμό γειτόνων ενός ενεργοποιητή διατηρώντας ταυτόχρονα τη σύνδεσή του με όλο το δίκτυο ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών. Για το σκοπό αυτό, οι ενεργοποιητές ανταλλάσσουν τους πίνακες με τους γείτονές τους (neighborhood tables) και αναζητούν εναλλακτικές διαδρομές για να επικοινωνήσουν με έναν γείτονα. Αν βρεθεί εναλλακτική διαδρομή, τότε ο ενεργοποιητής διαγράφει τον εν λόγω γείτονα από τον πίνακα και επικοινωνεί μαζί του μέσω ενδιάμεσης δρομολόγησης (μέσω άλλου ενεργοποιητή) [7]. Κατ' αυτόν τον τρόπο λαμβάνει χώρα η εξάλειψη περιττών ζεύξεων.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι η τεχνική εξαλείφει τους πιο απομακρυσμένους γείτονες ενός ενεργοποιητή, μιας και αυτοί είναι οι πρώτοι που θα αποκοπούν (απώλεια επικοινωνίας) κατά τη μετακίνηση του τελευταίου από την εφαρμογή της τεχνικής των απωθητικών δυνάμεων. Παρακάτω ακολουθεί ένα παράδειγμα στο οποίο εφαρμόζεται η εν λόγω τεχνική.



Εικόνα 3.11: Παράδειγμα εξάλειψης περιττής ζεύξης επικοινωνίας.

Στην παραπάνω εικόνα, ο ενεργοποιητής 1 διαθέτει δύο γείτονες με τους οποίους επικοινωνεί απευθείας. Η απόσταση του ενεργοποιητή 1 από τον 2 είναι μικρότερη σε σύγκριση με αυτή από τον 3 (υποθέτουμε ότι η απόσταση μεταξύ του ενεργοποιητή 1 και 3 είναι περίπου ίση με την εμβέλεια μετάδοσης r). Συνεπώς, μία πιθανή μετακίνηση του ενεργοποιητή στο χώρο παρατήρησης, εξαιτίας των αποθητικών δυνάμεων, θα ήταν περιορισμένη μιας και δε θα έπρεπε να σπάσει η ζεύξη επικοινωνίας 1→3. Παρόλα ταύτα όμως, η τεχνική της εξάλειψης περιττών ζεύξεων, αποκόπτει τη ζεύξη 1→3, και ο ενεργοποιητής 1 επικοινωνεί με τον ενεργοποιητή 3 μέσω του 2. Έτσι, κατά των υπολογισμών της νέας θέσης του ενεργοποιητή 1 στο πεδίο παρατήρησης, δε λαμβάνεται υπόψη η ζεύξη 1→3, με αποτέλεσμα την καλύτερη και πιο διευρυμένη εξάπλωση του ενεργοποιητή 1 στο χώρο. Έτσι, πετυχαίνουμε καλύτερη παρεχόμενη **κάλυψη** από τους ενεργοποιητές του WSN.

3.3.1.3 Καθολική σειρά επανατοποθετήσεων

Κατά τη μετακίνηση ενός ενεργοποιητή εντός του πεδίου παρατήρησης, εξαιτίας των αποθητικών δυνάμεων που του ασκούνται από τους γείτονές του, οι τελευταίοι θα πρέπει να παραμένουν ακινητοποιημένοι έτσι ώστε να μην χαλάσει η συνεκτικότητα του δικτύου ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών [7]. Συνεπώς, απαιτείται μία τεχνική η οποία θα καθορίζει το ποιός ενεργοποιητής θα μετακινείται κάθε φορά.

Η τεχνική που χρησιμοποιεί ο μηχανισμός C^2AP εκτελείται από όλους τους ενεργοποιητές του δικτύου. Ουσιαστικά, οι ενεργοποιητές ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το ποιός θα μετακινηθεί πρώτος μέσα στο πεδίο παρατήρησης. Ειδικότερα, ένας ενεργοποιητής ανταγωνίζεται μόνο με τους γείτονές του για το ποιός θα μετακινηθεί πρώτος. Κάθε ενεργοποιητής – νικητής μετακινείται στη νέα του θέση, ενώ οι γείτονές του παραμένουν αδρανείς για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η εν λόγω μετακίνηση. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική/αλγόριθμος έχει ως εξής [7]:

1. Κάθε ενεργοποιητής i υπολογίζει την προτεραιότητά του $\varphi_i = |Γείτονες(i)|$, όπου με φ_i συμβολίζουμε το πλήθος των γειτόνων του εν λόγω ενεργοποιητή.
2. Στη συνέχεια, κάθε ενεργοποιητής i αποστέλλει μέσω πολυεκπομπής, την προτεραιότητά του φ_i προς όλους τους γείτονές του.
3. Κάθε ενεργοποιητής συγκρίνει την προτεραιότητά του με αυτή των γειτόνων του.
4. Ο ενεργοποιητής που διαθέτει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα μεταξύ των γειτόνων μετακινείται πρώτος στο χώρο, ενώ οι υπόλοιποι παραμένουν ακινητοποιημένοι.
5. Προτού ο ενεργοποιητής – νικητής φτάσει στον τελικό του προορισμό, ενημερώνει τους γείτονές του έτσι ώστε να καθορίσουν το ποιός θα μετακινηθεί στη συνέχεια.

Αν δύο ενεργοποιητές έχουν τον ίδιο βαθμό προτεραιότητας, τότε μετακινείται ο ενεργοποιητής με το μεγαλύτερο id . Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι δεν απαγορεύεται η ταυτόχρονη μετακίνηση ενεργοποιητών αν και εφόσον δεν είναι γειτονικοί και φυσικά έχουν τη μεγαλύτερη προτεραιότητα μεταξύ των γειτόνων τους.

3.3.1.4 Διαχείριση «ορφανών» ενεργοποιητών

Όπως προαναφέραμε στην ενότητα 3.3.1, ο μηχανισμός C^2AP μεριμνά για τους «ορφανούς» ενεργοποιητές του δικτύου, οι οποίοι δεν επικοινωνούν με κανέναν άλλον ενεργοποιητή. Για τον εντοπισμό και την ένταξη των «ορφανών» ενεργοποιητών εντός του δικτύου ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών, ο μηχανισμός C^2AP χρησιμοποιεί τον παρακάτω αλγόριθμο/τεχνική [7]:

1. Αρχικά ο ενεργοποιητής περιμένει για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα προτού ανακηρυχθεί ως «ορφανός». Η αναμονή έγκειται στο να εξαπλωθούν οι υπόλοιποι ενεργοποιητές του δικτύου (μέσω των αποθητικών δυνάμεων) και να βρεθούν εντός της εμβέλειας μετάδοσης του εν λόγω ενεργοποιητή.
2. Από τη στιγμή που λήξει ο χρόνος αναμονής χωρίς να υπάρξει επικοινωνία με άλλον ενεργοποιητή του δικτύου, ο «ορφανός» ενεργοποιητής ξεκινάει να κατευθύνεται προς το κέντρο του πεδίου παρατήρησης του δικτύου, ευελπιστώντας ότι θα συναντήσει κάποιον άλλον ενεργοποιητή.
3. Αν κάτι τέτοιο δεν συμβεί, ο «ορφανός» ενεργοποιητής συνεχίζει την αναζήτησή του κατευθυνόμενος από το κέντρο του πεδίου παρατήρησης προς το μακρινότερο σημείο του πεδίου παρατήρησης.

3.3.1.5 Συγκεντρωτικός αλγόριθμος C^2AP

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι να παρουσιαστούν όλες οι τεχνικές του μηχανισμού C^2AP που παρουσιάσαμε παραπάνω, σε έναν συγκεντρωτικό αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω, ξεκινώντας με την παράθεση του αντίστοιχου ψευδοκώδικα [7], και την βήμα προς βήμα επεξήγησή του.

Ψευδοκώδικας για τον αλγόριθμο C^2AP

// Για κάθε ενεργοποιητή A_i εκτέλεσε τα παρακάτω βήματα:

$C^2AP()$

1. Broadcast (i, pos_i)
2. Περίμενε για απάντηση από κάθε γειτονικό ενεργοποιητή του A_i
3. **IF** δεν ληφθεί καμία απάντηση **THEN**
4. SetTimer(T);
5. **ELSE**
6. Create(NeighborList(A_i)); // τοποθέτηση των ID των γειτόνων σε μία λίστα
7. ComputeCompositeForce(A_i); // υπολογισμός αποθητικών δυνάμεων
8. Broadcast(φ_i , NeighborList(A_i));
9. Περίμενε μέχρις ότου λάβεις την τιμή προτεραιότητας φ από όλους τους γείτονές σου
10. **IF** φ_i είναι η μέγιστη τιμή μεταξύ όλων των γειτόνων **THEN**
11. Prune(A_i); // συνάρτηση εξάλειψης περιττών ζεύξεων
12. ComputeNewLoc(A_i , NeighborList(A_i)); // υπολογισμός τελικής θέσης
13. Broadcast("RTM", NewLoc);
14. Relocate(NewLoc);
15. **ELSE**
16. Περίμενε μέχρις ότου λάβεις μήνυμα "RTM" από κάποιον γειτονικό ενεργοποιητή A_j
 με $\varphi_j > \varphi_i$
17. Broadcast("RTM", NewLoc);
18. Relocate(NewLoc);

END IF

19. **END IF** (κλείνει το IF της τρίτης γραμμής του αλγορίθμου)
20. **IF** $T = 0$ **THEN** // Έχει λήξει ο χρόνος αναμονής, άρα είναι «ορφανός» ενεργοποιητής
21. Center \leftarrow ComputeCenter(Region);
22. Ο ενεργοποιητής A_i ξεκινά να κινείται προς το κέντρο του δικτύου
23. **REPEAT**
24. Broadcast (“Ορφανός ενεργοποιητής”);
25. Κινήσου προς το κέντρο του δικτύου
26. **UNTIL** να συναντήσει ενεργοποιητή A_j που να είναι εντός της εμβέλειας επικοινωνίας του
27. **END IF**
- // Ψευδοκώδικας συνάρτησης Prune() για την εξάλειψη περιττών ζεύξεων
- Prune(A_i)**
28. Distance_Sort(NeighborList(A_i));
29. **FOR** κάθε $A_k \in$ NeighborList(A_i)
30. **IF** IsNeeded(link(A_i, A_k)) = FALSE &&
- $\exists A_j | A_k \in$ NeighborList(A_j) **THEN**
31. Delete(A_k , NeighborList(A_i));
32. Inform(A_k); // Ο A_k διαγράφει επίσης τον A_i από γείτόνά του
33. IsNeeded(link(A_i, A_j)) \leftarrow True;
34. **END IF**
35. **END FOR**

Ο παραπάνω αλγόριθμος εκτελείται από όλους τους ενεργοποιητές του δικτύου. Ειδικότερα, κάθε ενεργοποιητής A_i μεταδίδει μέσω πολυεκπομπής το αναγνωριστικό του ID καθώς και την θέση του στο χώρο προς όλους τους γείτονές του (βήματα 1,2). Εάν δε βρεθεί κάποιος γειτονικός ενεργοποιητής, τότε θέτει ένα χρονικό όριο T προτού ανακηρύξει τον εαυτό του ως «ορφανό» (βήματα 3, 4). Εάν εντοπιστούν γείτονες, τότε ο A_i αποθηκεύει το αναγνωριστικό και την θέση των γειτόνων (βήμα 6), και στη συνέχεια υπολογίζει τη συνισταμένη των απωθητικών δυνάμεων που του ασκούνται από τους γείτονες, για να καθορίσει τη νέα θέση του στο πεδίο παρατήρησης (βήμα 7). Πριν όμως πραγματοποιήσει την επανατοποθέτηση, ο ενεργοποιητής A_i πρέπει να διαβεβαιωθεί ότι διαθέτει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα φ_i μεταξύ όλων των γειτόνων του (βήματα 8, 9). Εάν ο ενεργοποιητής A_i διαθέτει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα (βήμα 10), τότε προχωρά σε εξάλειψη των περιττών ζεύξεων/γειτόνων (Pruning) (βήμα 11) και υπολογίζει τη νέα του θέση στο χώρο χωρίς να σπάσει τη συνδεσιμότητα του με το δίκτυο ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών (βήμα 12). Στη συνέχεια, ο ενεργοποιητής A_i ενημερώνει τους γείτονές του για τη νέα του θέση (βήμα 13), έτσι ώστε ο επόμενος γειτονικός ενεργοποιητής με την αμέσως μεγαλύτερη προτεραιότητα να ξεκινήσει την διαδικασία επανατοποθέτησής του στο χώρο. Εάν ο ενεργοποιητής A_i δεν διαθέτει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα φ_i περιμένει να λάβει μηνύματα RTM από άλλους γειτονικούς ενεργοποιητές, προτού ξεκινήσει την διαδικασία επανατοποθέτησής του στο χώρο (βήματα 16-18).

Εάν το χρονικό όριο T λήξει ($T=0$), ο ενεργοποιητής A_i ανακηρύσσεται ως «ορφανός», και ξεκινά να κινείται προς το κέντρο του πεδίου παρατήρησης, ευελπιστώντας πως θα ανακαλύψει κάποιον άλλον ενεργοποιητή ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών (βήματα 20 - 26). Τα βήματα 28 - 35 περιγράφουν τη διαδικασία εξάλειψης περιττών ζεύξεων, όπως την παρουσιάσαμε και στην ενότητα 3.3.1.2. Αρκεί να επισημάνουμε ότι στο βήμα 28 ο ενεργοποιητής A_i ταξινομεί τους γείτονές του με βάση την απόστασή τους από αυτόν, κατά φθίνουσα σειρά. Η διαδικασία ελέγχου για την εξάλειψη περιττών ζεύξεων ξεκινάει από τον πιο απομακρυσμένο ενεργοποιητή.

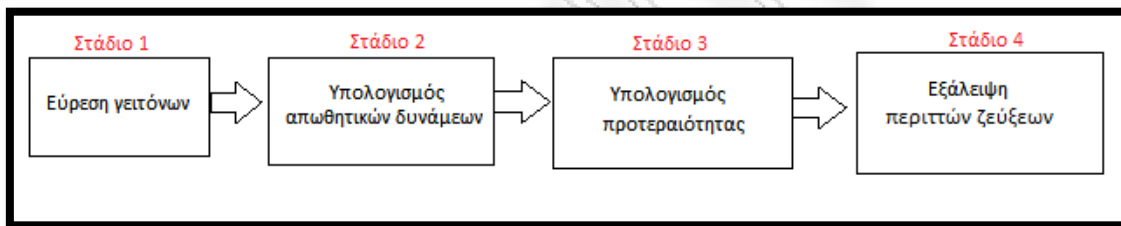
Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι ο παραπάνω αλγόριθμος εκτελείται επαναληπτικά από όλους τους ενεργοποιητές του δικτύου, μέχρις ότου να μην παρουσιάζεται περαιτέρω βελτίωση της παρεχόμενης κάλυψης από τους ενεργοποιητές.

3.3.2 Παρατηρήσεις – βελτιώσεις επί του μηχανισμού C^2AP

Αμέσως παραπάνω, παρουσιάσαμε τον συγκεντρωτικό αλγόριθμο του μηχανισμού C^2AP , για την επανατοποθέτηση των ενεργοποιητών του WSN στο πεδίο παρατήρησης. Στην παρούσα ενότητα, καταβάλλεται προσπάθεια να εντοπιστούν σημεία του αλγορίθμου C^2AP της ενότητας 3.3.1.5, τα οποία θα μπορούσαν να εκτελεστούν με **διαφορετική σειρά**, βελτιώνοντας καταυτόν τον τρόπο την συνολική απόδοση του αλγορίθμου.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον αλγόριθμο C^2AP , η σειρά εκτέλεσης των τεχνικών του μηχανισμού, έχει ως εξής:

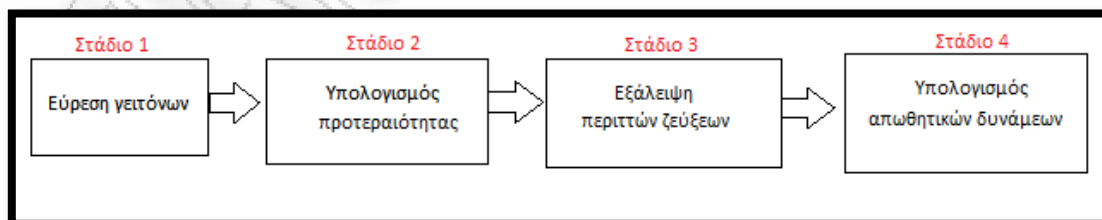
Αρχικά κάθε ενεργοποιητής του δικτύου υπολογίζει τους γείτονές του (βήμα 6). Στη συνέχεια υπολογίζει τη συνισταμένη των αποθητικών δυνάμεων που του ασκούν οι γείτονές του (βήμα 7). Σειρά έχει η τεχνική της καθολικής σειράς επανατοποθέτησεων (βλ. ενότητα 3.3.1.3) στην οποία ο ενεργοποιητής εξετάζει το αν έχει την κατάλληλη προτεραιότητα έτσι ώστε να μετακινηθεί εντός του πεδίου παρατήρησης (βήματα 8, 9). Αν όντως έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα έναντι των γειτονικών ενεργοποιητών, τότε λαμβάνει χώρα η τεχνική της εξάλειψης περιττών ζεύξεων (βλ. ενότητα 3.3.1.2) (βήμα 11), και τελικά στο βήμα 12 του αλγορίθμου, υπολογίζει την τελική του θέση στο χώρο, η οποία δε θα προκαλεί απώλεια επικοινωνίας με κανέναν από τους εναπομείναντες ενεργοποιητές – γείτονές του. Σχηματικά, η σειρά εκτέλεσης των τεχνικών έχει ως εξής:



Εικόνα 3.12: Σειρά εκτέλεσης τεχνικών C^2AP .

Σύμφωνα με την παραπάνω σειρά εκτέλεσης των τεχνικών του μηχανισμού C^2AP , ένας ενεργοποιητής υπολογίζει στο στάδιο 2 τη συνισταμένη των αποθητικών δυνάμεων που του ασκούνται από τους γείτονές του, και στη συνέχεια στο στάδιο 4 εκτελεί την τεχνική της εξάλειψης περιττών γειτόνων. Το γεγονός αυτό, αποτελεί **μειονέκτημα** της υλοποίησης του αλγορίθμου C^2AP , μιας και έτσι υπολογίζονται αποθητικές δυνάμεις στο στάδιο 2 από γείτονες, οι οποίοι πιθανόν να εξαλειφθούν στο στάδιο 4. Κρίνεται **προτιμότερος** ο υπολογισμός της συνισταμένης των αποθητικών δυνάμεων **μετά** την εξάλειψη των περιττών ζεύξεων ενός ενεργοποιητή. Συνεπώς, μία πιο ορθή σειρά εκτέλεσης των τεχνικών, θα ήταν η εξής:

Αφού ο ενεργοποιητής υπολογίσει στο στάδιο 1 τους γείτονές του, στη συνέχεια στο στάδιο 2 υπολογίζει την προτεραιότητά του (στάδιο 3 εικόνας 3.12), στο στάδιο 3 εκτελεί την τεχνική της εξάλειψης περιττών ζεύξεων (στάδιο 4 εικόνας 3.12), και στο στάδιο 4 υπολογίζει τη συνισταμένη των αποθητικών δυνάμεων (στάδιο 2 εικόνας 3.12) που του ασκούνται από τους **τελικούς** του γείτονες. Έτσι, αποφεύγεται ο υπολογισμός περιττών αποθητικών δυνάμεων. Σχηματικά, η **προτεινόμενη** σειρά εκτέλεσης των τεχνικών έχει ως εξής:



Εικόνα 3.13: Προτεινόμενη σειρά εκτέλεσης τεχνικών C^2AP .

Ο τροποποιημένος συγκεντρωτικός αλγόριθμος C^2AP , οποίος λαμβάνει υπόψη τις παραπάνω προτάσεις, παρουσιάζεται παρακάτω (παραθέτουμε μόνο τα βήματα 1 – 14, μιας και τα βήματα 15 – 35 δεν περιέχουν τροποποιήσεις.)

Τροποποιημένος ψευδοκώδικας για τον αλγόριθμο C^2AP

// Για κάθε ενεργοποιητή A_i εκτέλεσε τα παρακάτω βήματα:

 $C^2AP()$

1. Broadcast (i, pos_i)
2. Περίμενε για απάντηση από κάθε γειτονικό ενεργοποιητή του A_i
3. **IF** δεν ληφθεί καμία απάντηση **THEN**
4. SetTimer(T);
5. **ELSE**
6. Create(NeighborList(A_i)); // τοποθέτηση των ID των γειτόνων σε μία λίστα
7. Broadcast(φ_i , NeighborList(A_i));
8. Περίμενε μέχρις ότου λάβεις την τιμή προτεραιότητας φ από όλους τους γείτονές σου
9. **IF** φ_i είναι η μέγιστη τιμή μεταξύ όλων των γειτόνων **THEN**
10. Prune(A_i); // συνάρτηση εξάλειψης περιττών ζεύξεων
11. ComputeCompositeForce(A_i); // υπολογισμός αποθητικών δυνάμεων
12. ComputeNewLoc(A_i , NeighborList(A_i)); // υπολογισμός τελικής θέσης
13. Broadcast("RTM", NewLoc);
14. Relocate(NewLoc);

3.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα C^2AP

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του μηχανισμού τοποθέτησης ενεργοποιητών C^2AP .

Πλεονεκτήματα μηχανισμού C^2AP

- ✓ Ο συγκεντρωτικός αλγόριθμος C^2AP της ενότητας 3.3.1.5 είναι πλήρως κατανεμημένος, μιας και εκτελείται από όλους τους ενεργοποιητές του WSA. Το γεγονός αυτό, έχει ως αποτέλεσμα να κατανέμεται το υπολογιστικό κόστος του αλγορίθμου μόνο στους ενεργοποιητές του δικτύου (διαθέτουν μεγαλύτερα αποθέματα ενέργειας και υπολογιστική ισχύ από τους αισθητήρες). Η κατανεμημένη εκτέλεση του αλγορίθμου οδηγεί σε αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου, μιας και η ενέργεια που απαιτεί η εκτέλεσή του δεν επιβαρύνει ένα μοναδικό κόμβο (για παράδειγμα έναν μοναδικό ενεργοποιητή υπεύθυνο για την εκτέλεση των αλγορίθμων), αλλά όλους τους ενεργοποιητές του δικτύου. Έτσι, η επιβάρυνση λόγω της εκτέλεσης του αλγορίθμου, είναι ομοιόμορφη στους ενεργοποιητές του WSA και όχι συγκεντρωτική σε ένα μοναδικό κόμβο, γεγονός που αυξάνει το συνολικό χρόνο ζωής του δικτύου.
- ✓ Ο μηχανισμός C^2AP , τοποθετεί τους ενεργοποιητές στο χώρο με κυρίαρχο σκοπό τη μεγιστοποίηση της παρεχόμενης κάλυψης από τους ενεργοποιητές και τη διατήρηση του δικτύου ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών. Παράλληλα όμως διαχειρίζεται και τους «ορφανούς» ενεργοποιητές, επιχειρώντας να τους εντάξει στο δίκτυο ενδοεπικοινωνίας των ενεργοποιητών (βλ. ενότητα 3.3).

Μειονεκτήματα μηχανισμού C^2AP

- Σύμφωνα με τον ορισμό του προβλήματος στην ενότητα 3.3.1, είναι ξεκάθαρο ότι ο μηχανισμός C^2AP εφαρμόζεται όταν η αρχική τοπολογία των ενεργοποιητών οδηγεί σε ένα δίκτυο ενδοεπικοινωνίας μεταξύ τους. Αν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό σε ένα πραγματικό σενάριο, τότε ο μηχανισμός πιθανών να μην εκπληρώσει τους στόχους του.

- Ο μηχανισμός δεν λαμβάνει υπόψη του την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών. Όταν οι ενεργοποιητές, εξαιτίας του μηχανισμού, εξαπλωθούν μέσα στο πεδίο παρατήρησης βελτιώνοντας την παρεχόμενη κάλυψη, δεν παρέχονται διαβεβαιώσεις για το κατά πόσο θα μπορούν οι αισθητήρες να επικοινωνούν μαζί τους, μεταφέροντάς τους έγκαιρα τα περιστατικά που εντοπίζουν στο δίκτυο.

3.4 Μηχανισμός 3: Σταθερό ταιρίασμα

Ο τρίτος και τελευταίος μηχανισμός τοποθέτησης ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης που θα μας απασχολήσει, ονομάζεται **αυτόνομος μηχανισμός σταθερού ταιριάσματος** (Autonomous actor positioning in wireless sensor and actor networks using stable – matching, [8]).

Στον εν λόγω μηχανισμό, υποθέτουμε ότι οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές τοποθετούνται αρχικά **τυχαία** εντός του πεδίου παρατήρησης. Στη συνέχεια, οι αισθητήρες ομαδοποιούνται σε συστάδες μέσω κατάλληλων αλγορίθμων συσταδοποίησης. Κάθε συστάδα αποτελείται και από έναν **κόμβο αισθητήρα αρχηγό (Cluster Head – CH)**. Ο μηχανισμός επιδιώκει να τοποθετήσει τους ενεργοποιητές στις αντίστοιχες θέσεις των CHs μέσω της εφαρμογής του αλγορίθμου **σταθερού ταιριάσματος Gale – Shapley (GS stable matching algorithm)** [8]. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος GS τοποθετεί τους ενεργοποιητές στα αντίστοιχα CHs με βάση τις αποστάσεις τους από τα αντίστοιχα CHs. Οι αποστάσεις μεταξύ ενεργοποιητών και CHs, υπολογίζονται μέσω του τύπου της ευκλείδειας απόστασης. Συνεπώς, οι ενεργοποιητές τοποθετούνται στα κοντινότερα CHs, μειώνοντας καταυτόν τον τρόπο τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια που επιφέρει η μετακίνηση των ενεργοποιητών. Αποτέλεσμα του παραπάνω είναι η αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου. Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι η τοποθέτηση αυτή οδηγεί σε ικανοποιητική κάλυψη του δικτύου από πλευράς ενεργοποιητών, ενώ παράλληλα αποφεύγονται οι τυχόν συγκρούσεις (conflicts) κατά την ανάθεση ενεργοποιητών στα CHs (δεν υπάρχουν δύο διαφορετικοί ενεργοποιητές που ανατίθενται στο ίδιο CH).

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτέλεση του αλγορίθμου GS, αποτελεί η ύπαρξη ενός κεντρικού κόμβου (κόμβος sink) ο οποίος θα γνωρίζει όλες τις σχετικές θέσεις των ενεργοποιητών και των CHs. Στη συνέχεια, θα πρέπει να υπολογίσει τις λίστες προτίμησης (σε ποιο CH επιθυμεί να μεταβεί ο κάθε ενεργοποιητής, και ποιόν ενεργοποιητή επιθυμεί να φιλοξενήσει κάθε CH κατά φθίνουσα σειρά προτίμησης) αυτών των κόμβων με βάση τις σχετικές αποστάσεις μεταξύ τους, και να τρέξει στη συνέχεια τον αλγόριθμο. Αντί αυτού, ο εν λόγω μηχανισμός, χρησιμοποιεί μία **κατανεμημένη εκδοχή** του αλγορίθμου GS με ονομασία **DGS (Distributed Gale Shapley)** [8], ο οποίος εκτελείται από όλους τους ενεργοποιητές του WSN. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρουσιάζεται στις ενότητες που ακολουθούν.

Αλγόριθμος Gale – Shapley

Στο σημείο αυτό, θα παραθέσουμε τον αλγόριθμο σταθερού ταιριάσματος Gale – Shapley για την επίλυση του προβλήματος «σταθερού παντρέματος – stable marriage problem». Το συγκεκριμένο πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής [8]:

“Δοθέντος n ανδρών και n γυναικών, όπου κάθε ένα από αυτά τα πρόσωπα έχει μία λίστα προτίμησης για άτομα του αντίθετου φύλου με μία κατάταξη από το 1 έως το n , πάντρεψε τους άνδρες με τις γυναίκες έτσι ώστε να μην υπάρχει ζευγάρι άνδρα – γυναίκας που να προτιμούσε ο ένας τον άλλον από τους τρέχοντες συντρόφους τους. Εάν δεν υπάρχουν τέτοια ζευγάρια, τότε οι γάμοι λέμε πως είναι σταθεροί.”

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος GS, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω:

Αλγόριθμος GS για Stable Marriage

1. Αρχικοποίησε όλους τους άνδρες m και όλες τις γυναίκες w ως ελεύθερους
2. While (υπάρχει ελεύθερος άνδρας m που έχει να κάνει πρόταση σε γυναίκα w) do
3. $w = \eta$ γυναίκα με το μεγαλύτερο ranking στη λίστα προτίμησης του εν λόγω άνδρα στην
οποία δεν έχει κάνει ακόμη πρόταση γάμου
4. if (η γυναίκα w είναι ελεύθερη)
5. (m, w) αραβωνιάζονται

```

6.     else
      // υπάρχει ήδη κάποιο ζευγάρι (m', w)
7.         if (η γυναίκα w προτιμά τον άνδρα m από τον m')
8.             (m, w) αρραβωνιάζονται
9.             ο άνδρας m' γίνεται ελεύθερος
10.        else
11.            (m', w) παραμένουν αρραβωνιασμένοι
12.        end if
13.    end if
14. end while

```

Ο παραπάνω αλγόριθμος, εκτελείται επαναληπτικά και εγγυάται ότι με τη λήξη του, κάθε άνδρας θα έχει μία γυναίκα, και ότι οι εν λόγω γάμοι θα είναι σταθεροί.

Στη περίπτωση των WSANs, οι άνδρες είναι οι ενεργοποιητές και οι γυναίκες τα CHs. Συνεπώς, ο αλγόριθμος GS, αναθέτει τους ενεργοποιητές στα CHs με βάση τις λίστες προτίμησής τους.

3.4.1 Αναλυτική παρουσίαση αλγορίθμου DGS

Υποθέτουμε ότι το πλήθος n των ενεργοποιητών είναι ίσο με το πλήθος m των CHs μέσα στο WSAN. Ο αλγόριθμος DGS, επιδιώκει να αναθέσει τους n ενεργοποιητές στις m θέσεις των CHs του δικτύου, έτσι ώστε η συνολική διαδρομή που θα διανύσουν οι ενεργοποιητές να είναι η ελάχιστη δυνατή. Καταυτόν τον τρόπο, ελαχιστοποιείται η συνολική ενέργεια που καταναλώνουν οι ενεργοποιητές, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου. Επιπρόσθετα, η ανάθεση γίνεται χωρίς συγκρούσεις. Για να επιτευχθεί η προαναφερθείσα ανάθεση, ο αλγόριθμος DGS χρησιμοποιεί τρία στάδια, τα οποία είναι τα εξής [8]:

1. Δημιουργία υποδικτύων (sub - networks) αποτελούμενα από ενεργοποιητές και CHs.
2. Εκτέλεση του **αλγορίθμου GS** σε κάθε υποδίκτυο.
3. Διαχείριση ενεργοποιητών που δεν έχουν ανατεθεί σε κανένα CH.

Η ανάλυση των παραπάνω σταδίων, πραγματοποιείται στις ενότητες που ακολουθούν.

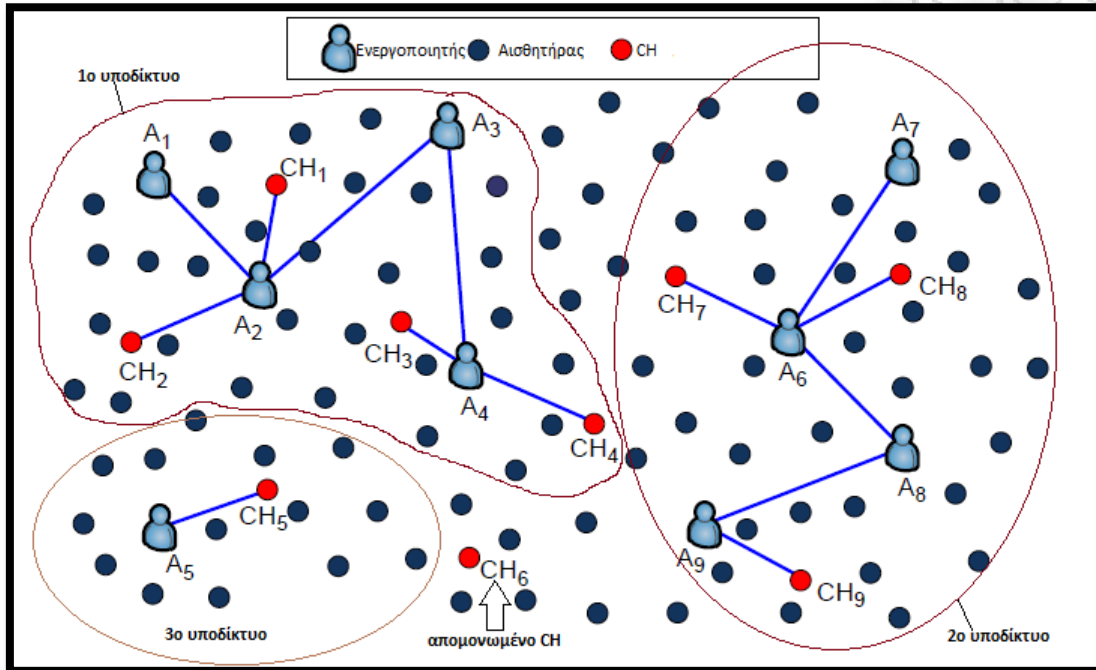
3.4.1.1 Δημιουργία υποδικτύων

Αρχικά, αξίζει να υπενθυμίσουμε ότι το WSAN, στην παρούσα φάση, αποτελείται από τους αισθητήρες, τα CHs (αισθητήρες) και τους ενεργοποιητές, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι τυχαία εντός του πεδίου παρατήρησης (βλ. ενότητα 3.4). Σειρά έχει η δημιουργία **υποδικτύων (sub - networks)** ενεργοποιητών και CHs. Ειδικότερα, για τη δημιουργία των εν λόγω υποδικτύων, κάθε ενεργοποιητής πρέπει να εντοπίσει τους άμεσους (1 - hop) γείτονές του (ενεργοποιητές και CHs). Στο σημείο αυτό, αξίζει να επισημάνουμε ότι το WSAN μπορεί να αποτελείται από πολλά τέτοια υποδίκτυα. Ενώ η αρχική υπόθεση (βλ. ενότητα 3.4.1) υποδεικνύει ότι $n = m$ σε όλο το WSAN, είναι πιθανό σε κάποιο υποδίκτυο το πλήθος των ενεργοποιητών να είναι διαφορετικό από αυτό των CHs (δηλαδή $n \neq m$). Για τη δημιουργία των υποδικτύων λαμβάνει χώρα η παρακάτω διαδικασία [8]:

1. Αρχικά, κάθε ενεργοποιητής i πρέπει να εντοπίσει τους άμεσους γείτονές του (1 - hop). Για αυτό το λόγο, αποστέλλει μέσω πολυεκπομπής το ID του και τη τρέχουσα θέση του. Οι ενεργοποιητές που του απαντάνε, αποτελούν τους γείτονές του, και τοποθετούνται σε ένα πίνακα N_A . Επίσης, τα CHs (αισθητήρες) λαμβάνουν τα μηνύματα πολλαπλών ενεργοποιητών. Απαντούν όμως στον ενεργοποιητή που βρίσκεται **πλησιέστερα** σε αυτούς. Συνεπώς, κάθε CH περιλαμβάνεται σε ένα και μοναδικό υποδίκτυο. Άρα, κάθε ενεργοποιητής διαθέτει δύο πίνακες. Ένα πίνακα N_A με τους γειτονικούς του ενεργοποιητές, και έναν πίνακα N_{CH} με τα γειτονικά CHs. Καταυτόν τον τρόπο δημιουργούνται τα υποδίκτυα αποτελούμενα από ενεργοποιητές και CHs. Υπάρχει βέβαια πιθανότητα, με το πέρας της παραπάνω διαδικασίας να υπάρξουν ορισμένα CHs ή ενεργοποιητές απομονωμένοι (isolated) από το υπόλοιπο δίκτυο χωρίς καθόλου γείτονες. Αυτοί οι απομονωμένοι ενεργοποιητές (ή CHs) δεν αποτελούν ξεχωριστά υποδίκτυα.

2. Στη συνέχεια, **σε κάθε υποδίκτυο** λαμβάνει χώρα η διαδικασία εκλογής ενός ενεργοποιητή – αρχηγού (leader actor) μέσω οποιουδήποτε κατανεμημένου αλγορίθμου εκλογών. Ο αρχηγός αναλαμβάνει να εκτελέσει τον αλγόριθμο GS **εντός του υποδικτύου του**.

Ένα στιγμιότυπο δικτύου, αποτελούμενο από υποδίκτυα ενεργοποιητών και CHs, παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 3.14: Δημιουργία τριών υποδικτύων [8].

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται 3 υποδίκτυα του WSN. Παρατηρούμε επίσης την ύπαρξη ενός απομονωμένου CH (CH_6). Ο ενεργοποιητής A_2 για παράδειγμα, διαθέτει στον πίνακά του N_A τους ενεργοποιητές A_1 και A_3 και στον πίνακά του N_{CH} τα CH CH_1 και CH_2 .

3.4.1.2 Εκτέλεση αλγορίθμου GS

Μετά την εκλογή των αρχηγών, σειρά έχει η εκτέλεση, **σε κάθε υποδίκτυο**, του αλγορίθμου GS για την τοποθέτηση των ενεργοποιητών των υποδικτύων στα αντίστοιχα CHs. Πιο συγκεκριμένα σε κάθε υποδίκτυο λαμβάνουν χώρα τα παρακάτω [8]:

1. Ο αρχηγός, αποστέλλει μήνυμα προς όλους τους ενεργοποιητές και CHs του υποδικτύου, για να του αποστείλουν το ID τους και την τρέχουσα θέση τους. Με τη σειρά τους, κάθε ενεργοποιητής θα αποστείλει το ID του, τη τρέχουσα θέση του και τον πίνακα N_{CH} . Κατατών τον τρόπο, ο αρχηγός συλλέγει όλη την απαραίτητη πληροφορία για τους ενεργοποιητές και τα CHs, και καταστρώνει τις λίστες προτίμησης (βλ. ενότητα 3.4) για κάθε κόμβο του υποδικτύου.
2. Στη συνέχεια εκτελεί τον αλγόριθμο GS μέσα στο υποδίκτυο.
3. Αφού εκτελεστεί ο αλγόριθμος GS, ακολουθεί η ανάθεση των ενεργοποιητών στα αντίστοιχα CHs. Ειδικότερα, ο αρχηγός αποστέλλει σε κάθε ενεργοποιητή ξεχωριστά τη νέα του θέση έτσι ώστε να μεταβεί σε αυτή. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η τοποθέτηση των ενεργοποιητών στα αντίστοιχα CHs του υποδικτύου, σύμφωνα με τις λίστες προτίμησης των κόμβων.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε το εξής:

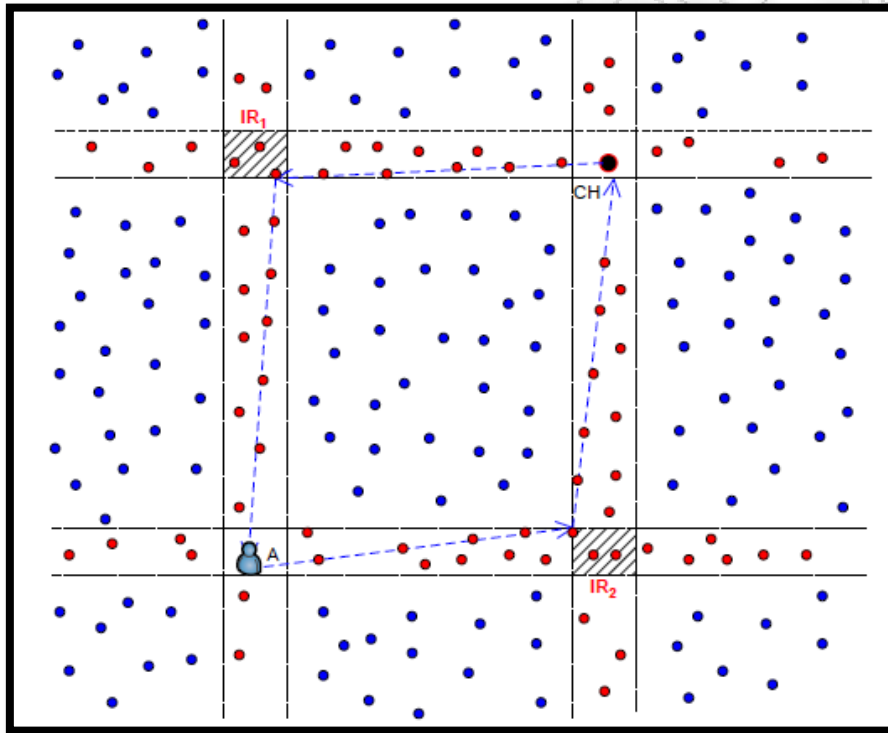
- Αν μέσα στο υποδίκτυο ισχύει ότι $n = m$, όλοι οι ενεργοποιητές τοποθετούνται στα αντίστοιχα CHs.
- Αν μέσα στο υποδίκτυο ισχύει ότι $n \neq m$, τότε διακρίνουμε τις δύο παρακάτω υποπεριπτώσεις:
 1. Αν $n > m$, τότε κάποιοι ενεργοποιητές του υποδικτύου δε θα ανατεθούν σε κανένα CH. Συνεπώς, ο αρχηγός στο βήμα 3 της παραπάνω διαδικασίας, αποστέλλει μήνυμα UNMATCHED στον ενεργοποιητή αντί για τη νέα του θέση. Οι ενεργοποιητές αυτοί θα τοποθετηθούν σε CHs στο στάδιο 3.4.1.3 που ακολουθεί.

2. Αν $n < m$, όλοι οι ενεργοποιητές του υποδικτύου θα ανατεθούν σε κάποιο CH, ενώ τα υπολειπόμενα CHs θα «φιλοξενήσουν» κάποιον ενεργοποιητή μετά την εκτέλεση του σταδίου 3.4.1.3 που ακολουθεί.

3.4.1.3 Διαχείριση αταίριαστων ενεργοποιητών και CHs

Μετά την εφαρμογή των σταδίων 1 και 2 του αλγορίθμου DGS που παρουσιάσαμε παραπάνω, μπορεί να υπάρχουν ενεργοποιητές που δεν έχουν ανατεθεί σε κανένα CH, και CHs που δεν φιλοξενούν κανέναν ενεργοποιητή. Για τον εντοπισμό αυτών των κόμβων, λαμβάνει χώρα η παρακάτω διαδικασία αναζήτησης (**quorum – based** αναζήτηση) [8]:

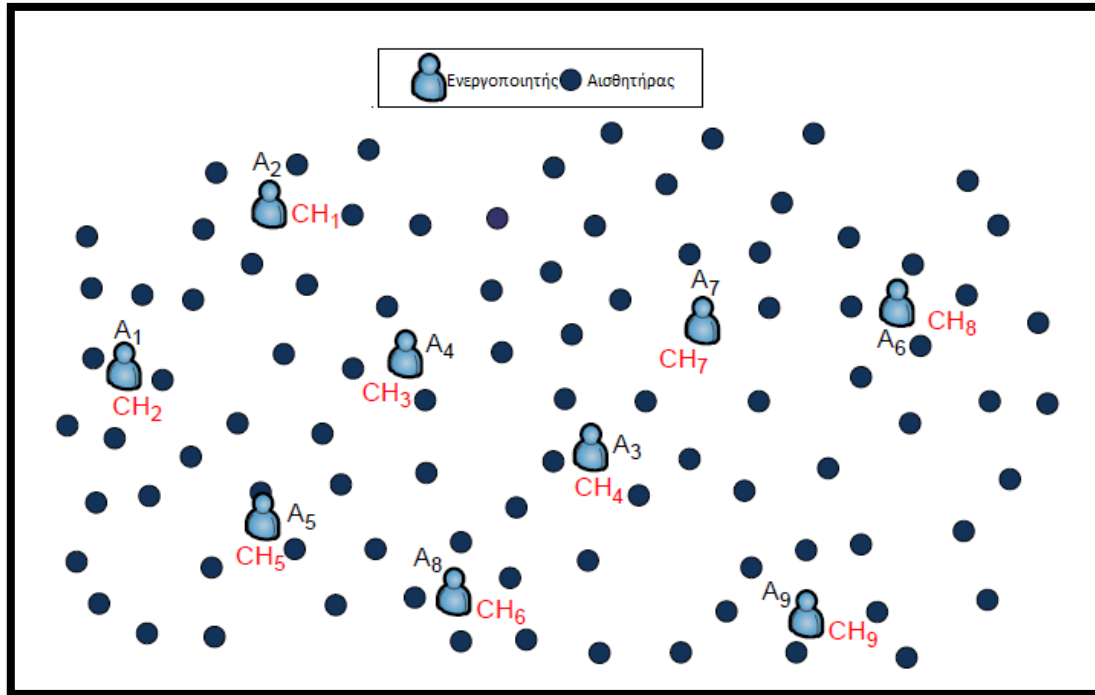
1. Κάθε τέτοιος ενεργοποιητής και CH (ονομάζονται **αταίριαστοι - unmatched**) στέλνουν ένα μήνυμα μέσα σε προκαθορισμένου πλάτους στήλη (column) και γραμμή (row), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.15: Αναζήτηση αταίριαστων ενεργοποιητών – CHs [8].

2. Τα μηνύματα συναντιούνται στις περιοχές τομής (intersection IR) και έτσι κάθε ενεργοποιητής ενημερώνεται για την ύπαρξη ελεύθερων CHs και ενεργοποιητών μέσα στο WSAN. Για παράδειγμα, ο ενεργοποιητής A της εικόνας 3.15, εντοπίζει το CH μέσω των αισθητήρων των περιοχών IR1 και IR2. Οι αισθητήρες αυτών των περιοχών, μέσω αντίστροφης μετάδοσης, μεταφέρουν στον ενεργοποιητή A το ID και τη θέση του CH. Με την διαδικασία αυτή, κάθε ενεργοποιητής εντοπίζει όλους τους ενεργοποιητές και τα αταίριαστα CHs του δικτύου.
3. Τελικά, κάθε ενεργοποιητής, εκτελεί τον αλγόριθμο GS την ίδια χρονική στιγμή και καθορίζει τη νέα του θέση μέσα στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος παράγει σε κάθε ενεργοποιητή το **ίδιο αποτέλεσμα** το οποίο δεν οδηγεί σε συγκρούσεις.

Μετά την εκτέλεση των σταδίων που αναλύσαμε στις ενότητες 3.4.1.1 έως 3.4.1.3 του αλγορίθμου DGS, το δίκτυο της εικόνας 3.14 παίρνει την μορφή που απεικονίζεται στην εικόνα 3.16. Στην συγκεκριμένη εικόνα, οι ενεργοποιητές του δικτύου έχουν τοποθετηθεί στις θέσεις των αντίστοιχων CHs.



Εικόνα 3.16: Τοποθέτηση ενεργοποιητών στα αντίστοιχα CHs [8].

3.4.1.4 Συγκεντρωτικός αλγόριθμος DGS

Συγκεντρωτικά, ο αλγόριθμος DGS ο οποίος περιλαμβάνει τα τρία στάδια που αναλύσαμε στις ενότητες 3.4.1.1 έως 3.4.1.3, εκτελείται από όλους τους ενεργοποιητές και τα CHs του δικτύου. Ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου είναι ο παρακάτω [8]:

Ψευδοκώδικας για τον αλγόριθμο DGS

1. A_i .Sub-network-detection(); // κάθε ενεργοποιητής εντοπίζει το υποδίκτυό του
2. leader ← Leader-Election(); // καθορισμός αρχηγού υποδικτύου
3. leader.GS-subnetwork(|actors|, |CHs|); // εκτέλεση αλγορίθμου GS από τον αρχηγό
4. **for** κάθε A_i μέσα στο υποδίκτυο **do**
5. leader.inform(A_i , newloc); // ενημέρωση ενεργοποιητή της νέας του θέσης
6. A_i .Move(newloc); // μετακίνηση ενεργοποιητή στη νέα του θέση
7. **endfor**
8. **If** (υπάρχουν αταίριαστοι ενεργοποιητές A_i ή CHs) **then**
9. A_i .Quorum-based-broadcast(i, loc(i)); // διαδικασία αναζήτησης από ενεργοποιητή
10. CH_i .Quorum-based-broadcast(i, loc(i)); // διαδικασία αναζήτησης από CH
11. **endif**
12. A_i .GS(|unmatched actors|, |unmatched CHs|); // κάθε ενεργοποιητής εκτελεί GS
13. A_i .Move(newloc); // κάθε ενεργοποιητής μετακινείται στη νέα του θέση

Πιο συγκεκριμένα, στον παραπάνω αλγόριθμο κάθε ενεργοποιητής A_i εντοπίζει το υποδίκτυό του (βήμα 1). Σε κάθε υποδίκτυο λαμβάνει χώρα η εκλογή του ενεργοποιητή – αρχηγού (βήμα 2). Ο αρχηγός εκτελεί τον αλγόριθμο GS μέσα στο υποδίκτυό του (βήμα 3). Στη συνέχεια, ο αρχηγός ενημερώνει κάθε ενεργοποιητή του υποδικτύου να μεταβεί στη νέα του θέση (βήματα 5, 6). Οι αταίριαστοι ενεργοποιητές

και CHs του υποδικτύου, αποστέλλουν τα ID τους και την τρέχουσα θέση τους (βήματα 8, 9, 10). Τέλος, κάθε αταίριαστος ενεργοποιητής, εκτελεί τον αλγόριθμο GS και μετακινείται προς τη νέα του θέση (βήματα 12, 13).

3.4.2 Παρατηρήσεις – βελτιώσεις επί του αλγορίθμου DGS

Όπως είναι φανερό από τον αλγόριθμο DGS στο βήμα 12, **κάθε** ενεργοποιητής που δεν έχει ανατεθεί σε κανένα CH, εκτελεί τον αλγόριθμο GS. Ο αλγόριθμος, όπως αναφέρουμε και στην ενότητα 3.4.1.3, παράγει το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα σε κάθε ενεργοποιητή που τον εκτελεί. Συνεπώς, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, προτείνεται η εκτέλεση του αλγορίθμου GS για την διαχείριση των αταίριαστων ενεργοποιητών – CHs, από έναν και μοναδικό αταίριαστο ενεργοποιητή του δικτύου.

Ο ενεργοποιητής που θα αναλάβει να τρέξει τον αλγόριθμο GS, θα είναι αυτός που θα έχει το μεγαλύτερο απόθεμα ενέργειας εν συγκρίσει με όλους τους άλλους αταίριαστους ενεργοποιητές. Συνεπώς, κατά τη διαδικασία της quorum – based αναζήτησης, κάθε ενεργοποιητής, εκτός από το ID του και την τρέχουσα θέση του, θα αποστέλλει και το απόθεμα ενέργειάς του. Ο ενεργοποιητής με το μεγαλύτερο απόθεμα, τρέχει τον αλγόριθμο GS και ενημερώνει όλους τους υπόλοιπους. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος DGS, που περιέχει την παραπάνω τροποποίηση, παρουσιάζεται παρακάτω:

Τροποποιημένος ψευδοκώδικας για τον αλγόριθμο DGS

```

1.  $A_i$ .Sub-network-detection(); // κάθε ενεργοποιητής εντοπίζει το υποδίκτυό του
2. leader ← Leader-Election(); // καθορισμός αρχηγού υποδικτύου
3. leader.GS-subnetwork(|actors|, |CHs|); // εκτέλεση αλγορίθμου GS από τον αρχηγό
4. for κάθε  $A_i$  μέσα στο υποδίκτυο do
5.     leader.inform( $A_i$ , newloc ); // ενημέρωση ενεργοποιητή της νέας του θέσης
6.      $A_i$ .Move(newloc); // μετακίνηση ενεργοποιητή στη νέα του θέση
7. endfor
8. If (υπάρχουν αταίριαστοι ενεργοποιητές  $A_i$  ή CHs) then
9.      $A_i$ .Quorum-based-broadcast(i. loc(i), energy_level(i)); /*αποστολή αποθέματος ενέργειας
    ενεργοποιητή*/
10.     $CH_i$ .Quorum-based-broadcast(i. loc(i));
11. endif
12. maximum_energy=energy_level(i); /* Εύρεση ενεργοποιητή με το μεγαλύτερο απόθεμα ενέργειας*/
13. for (j=0; j<=|unmatched actors|; j++) do
14.     if (energy_level(j)> maximum_energy) then
15.         maximum_energy=energy_level(j);
16.         leader_id=j;
17.     endif
18.     else
19.         maximum_energy=energy_level(j);
20.         leader_id=j;
21.     endelse
22. endfor
// Αν ο  $A_i$  έχει το μεγαλύτερο απόθεμα ενέργειας, τότε εκτελεί τον αλγόριθμο GS
23. if leader_id==i then
// Ο νικητής το ανακοινώνει στους υπόλοιπους unmatched ενεργοποιητές
24.      $A_i$ . Quorum-based-broadcast("I am the winner");
25.      $A_i$ .GS(|unmatched actors|, |unmatched CHs|); //εκτελεί τον GS

```

/ ο A_i φτιάχνει έναν πίνακα `NewLocations` ο οποίος περιέχει τα actor ID και τις νέες θέσεις τους μέσα στο πεδίο παρατήρησης*/*

26. A_i . Quorum-based-broadcast(`NewLocations`);

27. A_i .Move(`newloc`); // μετακίνηση ενεργοποιητή στη νέα του θέση

28. **end if**

// Αν ο A_i δεν έχει το μεγαλύτερο απόθεμα ενέργειας, τότε περιμένει μήνυμα `NewLocations`

29. **else**

30. wait until receiving `NewLocations` message from another actor;

31. A_i .Move(`newloc`);

32. **endelse**

Τα πρώτα 8 βήματα του προτεινόμενου αλγορίθμου DGS είναι ακριβώς όμοια με αυτά του αρχικού αλγορίθμου DGS της ενότητας 3.4.1.4. Από το βήμα 9 και μετά, ο ψευδοκώδικας περιέχει κάποιες τροποποιήσεις για να συμπεριλάβει τις παρατηρήσεις που κάναμε στην αρχή της παρούσας ενότητας.

Πιο συγκεκριμένα, στο βήμα 9, κάθε αταίριαστος ενεργοποιητής A_i αποστέλλει μαζί με το ID του και την τρέχουσα θέση του, το απόθεμά ενέργειάς του (`energy_level(i)`). Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα η διαδικασία εύρεσης του ενεργοποιητή με το μεγαλύτερο απόθεμα ενέργειας (βήματα 12 - 22). Αν ο ενεργοποιητής A_i έχει το μεγαλύτερο απόθεμα ενέργειας (βήμα 23), τότε ανακοινώνει σε όλους τους αταίριαστους κόμβους ότι είναι ο νικητής (βήμα 24), και εκτελεί τον αλγόριθμο GS (βήμα 25). Στη συνέχεια, ο νικητής αποστέλλει μέσω πολυεκπομπής, έναν πίνακα `NewLocations`, με τις θέσεις όλων των αταίριαστων ενεργοποιητών του δικτύου(βήμα 26), οι οποίοι μεταβαίνουν σε αυτές στο βήμα 27. Αν ο ενεργοποιητής A_i δεν έχει το μεγαλύτερο απόθεμα ενέργειας (βήμα 29), τότε περιμένει μέχρι να λάβει μήνυμα `NewLocations` από άλλον ενεργοποιητή νικητή (βήμα 30) και μεταβαίνει στη νέα του θέση (βήμα 31).

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Κεφάλαιο 4. Διαχείριση κινητικότητας ενεργοποιητών

Στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, παρουσιάσαμε διάφορες τεχνικές τοποθέτησης των ενεργοποιητών εντός του πεδίου παρατήρησης ενός WSN. Αφού γίνει η κατάλληλη τοποθέτηση των ενεργοποιητών, στη συνέχεια οι αισθητήρες του δικτύου εντοπίζουν τα διάφορα συμβάντα που εμφανίζονται εντός της εμβέλειάς τους και ενημερώνουν, μέσω αποστολής μηνυμάτων, τους ενεργοποιητές του δικτύου οι οποίοι δρουν επί των καταγεγραμμένων συμβάντων.

Σε πολλές εφαρμογές WSNs, η επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών δεν είναι εφικτή εξαιτίας διαφόρων παραγόντων (χαμηλή εμβέλεια μετάδοσης αισθητήρων, φυσικά εμπόδια που παρεμβάλλουν κ.α.), με αποτέλεσμα οι αισθητήρες να μην είναι σε θέση να ενημερώνουν τους ενεργοποιητές για τα συμβάντα που παρατηρούν. Το γεγονός αυτό, οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης ενός μοντέλου διαρκώς **κινούμενων ενεργοποιητών (mobile actors)** εντός του WSN, οι οποίοι θα επισκέπτονται περιοδικά τις συστάδες (clusters) των αισθητήρων, θα ενημερώνονται για τυχόν περιστατικά που λαμβάνουν χώρα εντός της συστάδας, και εν συνεχεία θα τα αντιμετωπίζουν.

Η κίνηση αυτή των ενεργοποιητών εντός του δικτύου, υποδεικνύεται από κατάλληλους αλγορίθμους. Οι αλγόριθμοι (ή αλλιώς **μοντέλα κινητικότητας - mobility models**) αυτοί, αποσκοπούν στην εύρεση κατάλληλων **μονοπατιών (paths)** που θα πρέπει να ακολουθούν οι ενεργοποιητές, έτσι ώστε οι τελευταίοι να εντοπίζουν όσο το δυνατόν περισσότερα περιστατικά κατά τη διάρκεια της μετακίνησής τους από τη μία συστάδα αισθητήρων στην άλλη, όπως αυτή καθορίζεται από το μονοπάτι του αλγορίθμου. Με άλλα λόγια, τα μονοπάτια που εξάγονται από τους αλγορίθμους, αποτελούν μία καθορισμένη σειρά επίσκεψης των συστάδων των αισθητήρων του δικτύου, που θα ακολουθήσουν οι ενεργοποιητές.

Οι εν λόγω αλγόριθμοι αποτελούν αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου. Οι αλγόριθμοι αυτοί, ουσιαστικά διαχειρίζονται την κινητικότητα των ενεργοποιητών του WSN. Το πρόβλημα της διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών εντάσσεται στην κατηγορία «**Ζητήματα τοπολογίας των WSNs**» του επιπέδου δικτύου της TCP/IP στοίβας πρωτοκόλλων (βλ. ενότητα 2.3.1), μιας και αυτή η κινητικότητα των ενεργοποιητών μεταβάλλει και τελικώς καθορίζει την τοπολογία του δικτύου.

Στις ενότητες που ακολουθούν, καταβάλλεται προσπάθεια να παρουσιαστούν με αναλυτικό τρόπο διάφοροι αλγόριθμοι εύρεσης κατάλληλων μονοπατιών για τους ενεργοποιητές του WSN. Παρατίθενται στιγμιότυπα εκτέλεσης των εν λόγω αλγορίθμων, ενώ παράλληλα προτείνεται και ένας νέος αλγόριθμος αυτής της κατηγορίας. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται ένας αντίστοιχος μηχανισμός καθορισμού του δρομολογίου ενός κινούμενου παρατηρητή, εμπνευσμένος από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs).

4.1 Διάφοροι ορισμοί

Πριν παρουσιάσουμε με λεπτομέρεια τους αλγορίθμους διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών ενός WSAN, κρίνεται σκόπιμη η παράθεση διάφορων ορισμών καθώς και μερικών συμβάσεων/υποθέσεων που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

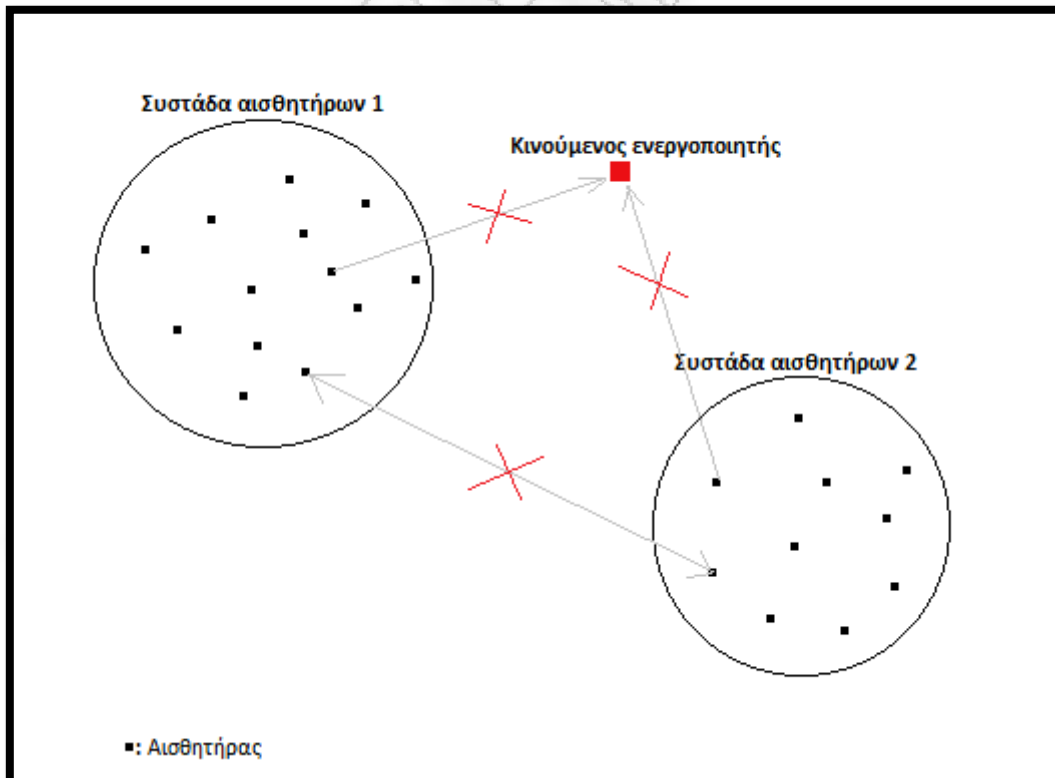
4.1.1 Αραιά συνδεδεμένο WSAWs

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, υπάρχουν περιπτώσεις εφαρμογών WSAWs στις οποίες η επικοινωνία αισθητήρα – ενεργοποιητή δεν είναι εφικτή. Η αδυναμία αυτή μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως:

- Χαμηλή εμβέλεια μετάδοσης (low transmission range) του αισθητήρα με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αποστείλει τις μετρήσεις του στον κατάλληλο ενεργοποιητή.
- Μικρό απόθεμα ενέργειας αισθητήρα.
- Σε πολλές εφαρμογές WSAWs, υπάρχει πιθανότητα ύπαρξης φυσικών εμποδίων που παρεμβάλλουν μεταξύ αισθητήρα – ενεργοποιητή, γεγονός που καθιστά αδύνατη την μεταξύ τους επικοινωνία.

Η αδυναμία αυτή επικοινωνίας μεταξύ αισθητήρων – ενεργοποιητών αποτελεί το βασικότερο χαρακτηριστικό ενός **αραιά συνδεδεμένου WSAW (sparsely connected WSAW)**. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα αραιά συνδεδεμένο WSAW, οι αισθητήρες του δικτύου οργανώνονται σε συστάδες (clusters). Πραγματοποιούν τις μετρήσεις τους εντός της συστάδας τους και επικοινωνούν **μόνο** με αισθητήρες – μέλη της ίδιας συστάδας. Η επικοινωνία ενός αισθητήρα με ενεργοποιητή ή αισθητήρα άλλης συστάδας είναι αδύνατη [10]. Ένα παράδειγμα εφαρμογής αραιά συνδεδεμένου WSAW, είναι η παρακολούθηση μίας υποθαλάσσιας περιοχής. Αισθητήρες οργανωμένοι σε συστάδες, πραγματοποιούν μετρήσεις όπως θερμοκρασία νερού, στάθμη νερού κ.α., ενώ οι ενεργοποιητές του δικτύου επισκέπτονται τις συστάδες των αισθητήρων ενημερώνονται και επεμβαίνουν όταν παρουσιαστούν διάφορα συμβάντα.

Ένα στιγμιότυπο αραιά συνδεδεμένου WSAW, με δύο συστάδες αισθητήρων που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, και έναν ενεργοποιητή που δεν έχει αμφίδρομη επικοινωνία με κανέναν αισθητήρα (οι αισθητήρες αδυνατούν να επικοινωνήσουν με τον ενεργοποιητή), παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 4.1: Παράδειγμα αραιά συνδεδεμένου WSAW.

Τα αραιά συνδεδεμένα WSNs θα αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου (υπόθεση εργασίας). Όπως είναι φανερό, στα δίκτυα αυτά οι αισθητήρες αδυνατούν να αποστείλουν τις μετρήσεις τους στον ενεργοποιητή του δικτύου. Συνεπώς απαιτείται, ο ενεργοποιητής να είναι **κινούμενος (mobile actor)**, έτσι ώστε να επισκέπτεται **περιοδικά** τις συστάδες των αισθητήρων και να ενημερώνεται για τυχόν περιστατικά. Στη συνέχεια θα δρα επί των συμβάντων και μετέπειτα θα επισκέπτεται επόμενη συστάδα προς εξέταση. Η σειρά (μονοπάτι) με την οποία επισκέπτεται τις συστάδες ο ενεργοποιητής, καθορίζεται από κατάλληλους αλγορίθμους που θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια του κεφαλαίου.

4.1.2 Κινούμενος ενεργοποιητής

Ένας **κινούμενος ενεργοποιητής (mobile actor)** εκτός από τις δυνατότητες δράσεις επί των καταγεγραμμένων συμβάντων στο δίκτυο, έχει και τη δυνατότητα κίνησης μέσα στο πεδίο παρατήρησης του WSN (βλ. ενότητα 1.2.1.1).

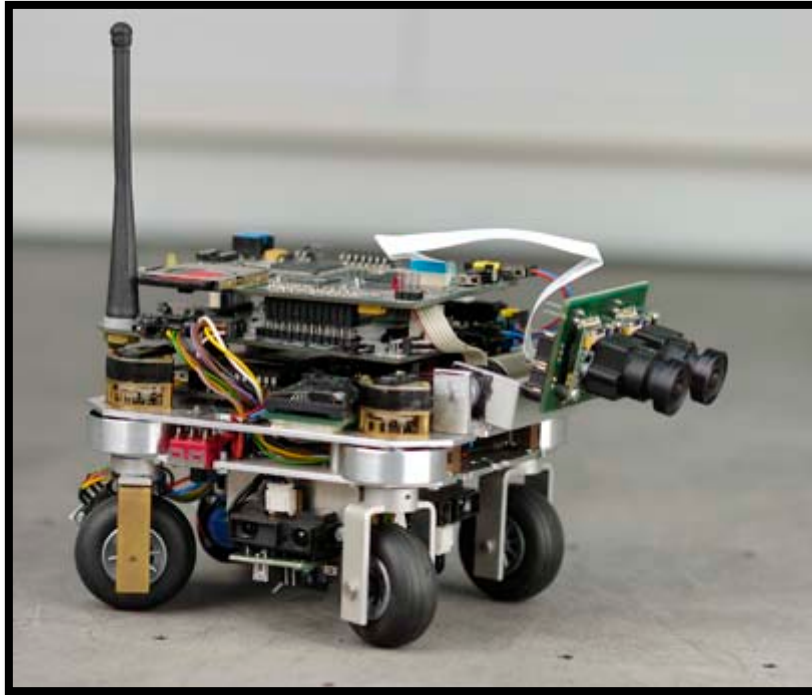
Φυσικά, η έννοια της κινητικότητας των ενεργοποιητών δεν πρωτοεμφανίζεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Αντιθέτως, και στο 3^ο κεφάλαιο, οι ενεργοποιητές έχουν τη δυνατότητα κίνησης εντός του πεδίου παρατήρησης. Πιο συγκεκριμένα, οι ενεργοποιητές μετακινούνται σε κατάλληλες θέσεις του δικτύου, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της κάλυψης που θα παρέχουν σε αυτό. Στη συνέχεια, και αφού οι ενεργοποιητές τοποθετηθούν στις προαναφερθείσες θέσεις, δρουν επί των καταγεγραμμένων συμβάντων από τη τελική τους θέση, εκμεταλλευόμενοι την μεγάλη εμβέλεια δράσης (action range) τους.

Από την άλλη πλευρά, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο όπου τα υπό μελέτη WSNs είναι αραιά συνδεδεμένα, οι ενεργοποιητές κινούνται διαρκώς μέσα στο πεδίο παρατήρησης. Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη ενότητα, επισκέπτονται περιοδικά τις συστάδες των αισθητήρων, ενημερώνονται για τυχόν περιστατικά και τελικά δρουν επί των συμβάντων. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαρκούς κινήσεως των ενεργοποιητών εντός του πεδίου παρατήρησης, είναι τα παρακάτω [10]:

- Από τη στιγμή που ο ενεργοποιητής επισκέπτεται τις συστάδες των αισθητήρων, έχει τη δυνατότητα να προσεγγίσει όσο το δυνατόν περισσότερο το καταγεγραμμένο συμβάν εντός της συστάδας. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη δράση του ενεργοποιητή επί του περιστατικού.
- Σε ένα αραιά συνδεδεμένο WSN, ένας κινούμενος ενεργοποιητής μπορεί να γεφυρώσει δύο οποιοσδήποτε απομονωμένες συστάδες αισθητήρων, αποκαθιστώντας την επικοινωνία μεταξύ τους.

Από την άλλη πλευρά, το παραπάνω μοντέλο διαρκώς κινούμενων ενεργοποιητών στο πεδίο παρατήρησης του WSN, έχει το μειονέκτημα της σημαντικής κατανάλωσης ενέργειας των ενεργοποιητών. Με άλλα λόγια, υπάρχει περίπτωση κατά την επίσκεψη ενός ενεργοποιητή στις συστάδες αισθητήρων του WSN, να μην παρουσιασθεί κανένα περιστατικό, καταναλώνοντας καταυτόν τον τρόπο άσκοπα αποθέματα ενέργειας. Το γεγονός αυτό, αποφεύγεται σε περιπτώσεις δικτύων όπως αυτά του 3^{ου} κεφαλαίου.

Ένα στιγμιότυπο ενεργοποιητή με δυνατότητα κίνησης, παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 4.2: Κινούμενος ενεργοποιητής – ρομπότ [11].

4.1.3 Αλγόριθμοι διαχείρισης κινητικότητας ενεργοποιητών

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, οι αλγόριθμοι διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών (ή αλλιώς μοντέλα κινητικότητας - mobility models) ενός αραιά συνδεδεμένου WSN, παράγουν το μονοπάτι P (Path) που ακολουθεί ένας κινούμενος ενεργοποιητής, για την επίσκεψη του στις συστάδες των αισθητήρων του δικτύου. Οι συστάδες αισθητήρων αποτελούν το σύνολο επίσκεψης S . Το εξαγόμενο μονοπάτι P , αποτελεί την **σειρά** με την οποία ο ενεργοποιητής θα επισκεφτεί τις συστάδες των αισθητήρων του δικτύου. Φυσικά, οι εκάστοτε αλγόριθμοι, χρησιμοποιούν διαφορετικά κριτήρια για την εξαγωγή του μονοπατιού επίσκεψης.

Οι εν λόγω αλγόριθμοι εντάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Στατικοί αλγόριθμοι διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών.
2. Δυναμικοί αλγόριθμοι διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών.

Στατικοί αλγόριθμοι

Στους στατικούς αλγόριθμους διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών ενός αραιά συνδεδεμένου WSN, η μελλοντική επίσκεψη ενός ενεργοποιητή σε μία συστάδα αισθητήρων, δεν επηρεάζεται από την παρελθοντική επίσκεψή του προς τον εν λόγω προορισμό [10]. Η σειρά (μονοπάτι) με την οποία θα επισκεφτεί ο ενεργοποιητής τις συστάδες, υπολογίζεται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως, η προϊστορία συμβάντων (πλήθος εμφανίσεων περιστατικών) των συστάδων.

Δυναμικοί αλγόριθμοι

Στους δυναμικούς αλγόριθμους διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών ενός αραιά συνδεδεμένου WSN, η μελλοντική επίσκεψη ενός ενεργοποιητή σε μία συστάδα αισθητήρων, επηρεάζεται από την παρελθοντική επίσκεψή του προς τον εν λόγω προορισμό [10]. Η σειρά (μονοπάτι) με την οποία θα επισκεφτεί ο ενεργοποιητής τις συστάδες, λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως, η προϊστορία συμβάντων (πλήθος εμφανίσεων περιστατικών) των συστάδων.

Στις ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά αλγόριθμοι και των δύο παραπάνω κατηγοριών.

4.2 Παρουσίαση στατικών αλγορίθμων

Στην παρούσα ενότητα, θα παρουσιάσουμε δύο στατικούς αλγορίθμους (μοντέλα κινητικότητας) διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών ενός αραιά συνδεδεμένου WSN.

Κατά την παρουσίαση των αλγορίθμων, λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω υποθέσεις:

1. Το αραιά συνδεδεμένο WSN στο οποίο εφαρμόζονται οι αλγόριθμοι αποτελείται από αισθητήρες και **έναν** κινούμενο ενεργοποιητή.
2. Οι αισθητήρες οργανώνονται σε συστάδες. Για τον καθορισμό των συστάδων χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος συσταδοποίησης της εργασίας [10]. Ο ενεργοποιητής του δικτύου είναι γνώστης των συστάδων των αισθητήρων.
3. Ο ενεργοποιητής είναι σε θέση να γνωρίζει την τρέχουσα θέση (x, y) του κάθε αισθητήρα στο πεδίο του WSN.
4. Τα σημεία επίσκεψης S του ενεργοποιητή, είναι τα **κέντρα** των εκάστοτε συστάδων αισθητήρων. Οι συντεταγμένες (x, y) των κέντρων αυτών είναι γνωστές στον ενεργοποιητή του δικτύου [10].
5. Οποιοδήποτε κέντρο συστάδας του συνόλου S , μπορεί να επιλεγθεί ως αρχικό σημείο εκκίνησης (starting point) του ενεργοποιητή. Στη συνέχεια, το μονοπάτι P καθορίζεται από τον αντίστοιχο αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί [10].

4.2.1 Στατικός αλγόριθμος MM1

Ο πρώτος στατικός αλγόριθμος διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών ενός αραιά συνδεδεμένου WSN που θα παρουσιάσουμε, ονομάζεται **MM1** (Mobility Model 1) [10].

Στο συγκεκριμένο αλγόριθμο, ο ενεργοποιητής του WSN επιλέγει ως σημείο εκκίνησης ένα οποιοδήποτε κέντρο συστάδας αισθητήρων του δικτύου (βλ. ενότητα 4.2). Το επόμενο κέντρο συστάδας προς επίσκεψη, είναι αυτό που απέχει τη **μικρότερη** δυνατή απόσταση από την τρέχουσα θέση του ενεργοποιητή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, παράγεται το μονοπάτι P επίσκεψης του ενεργοποιητή στα κέντρα των συστάδων αισθητήρων S του αραιά συνδεδεμένου WSN.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι, ο αλγόριθμος MM1 λαμβάνει υπόψη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης, κατά την εύρεση του μονοπατιού P . Ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης του ενεργοποιητή, η διάρκεια της προσομοίωσης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το χρόνο που χρειάζεται ο ενεργοποιητής για να επισκεφθεί όλα τα κέντρα των συστάδων του συνόλου S του μονοπατιού P μία φορά. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο αλγόριθμος MM1 επαναλαμβάνεται για να εξαχθεί το μονοπάτι P ξανά για την επιθυμητή διάρκεια της προσομοίωσης [10]. Για παράδειγμα, αν ο ενεργοποιητής επισκεφτεί όλες τις συστάδες κατά το πρώτο πέρασμά του μέσα σε 3 δευτερόλεπτα, και η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης είναι 15 δευτερόλεπτα, τότε ο αλγόριθμος MM1 εκτελείται από τον ενεργοποιητή 5 συνεχόμενες φορές.

Ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου MM1, ο οποίος εκτελείται από τον ενεργοποιητή του δικτύου, είναι ο παρακάτω [10]:

Ψευδοκώδικας για τον αλγόριθμο MM1

1. elapsed_time=0; // παρερχόμενος χρόνος
2. if (elapsed_time < sim_time) {
3. num_visited = 0;
4. Πρόσθεσε το σημείο εκκίνησης στο P και σημείωσε το ως visited στο S ;
5. sp = starting point;
6. num_visited ++;
- // Εύρεση της επόμενης συστάδας m προς επίσκεψη
7. if (num_visited < total_num_clusters) { // αν δεν έχει επισκεφτεί όλες οι συστάδες
8. Βρες το κοντινότερο κέντρο συστάδας m από την τρέχουσα θέση σου;
9. Πρόσθεσε το m στο P και σημείωσε το ως visited στο S ;
10. dist = απόσταση μεταξύ sp και m;


```

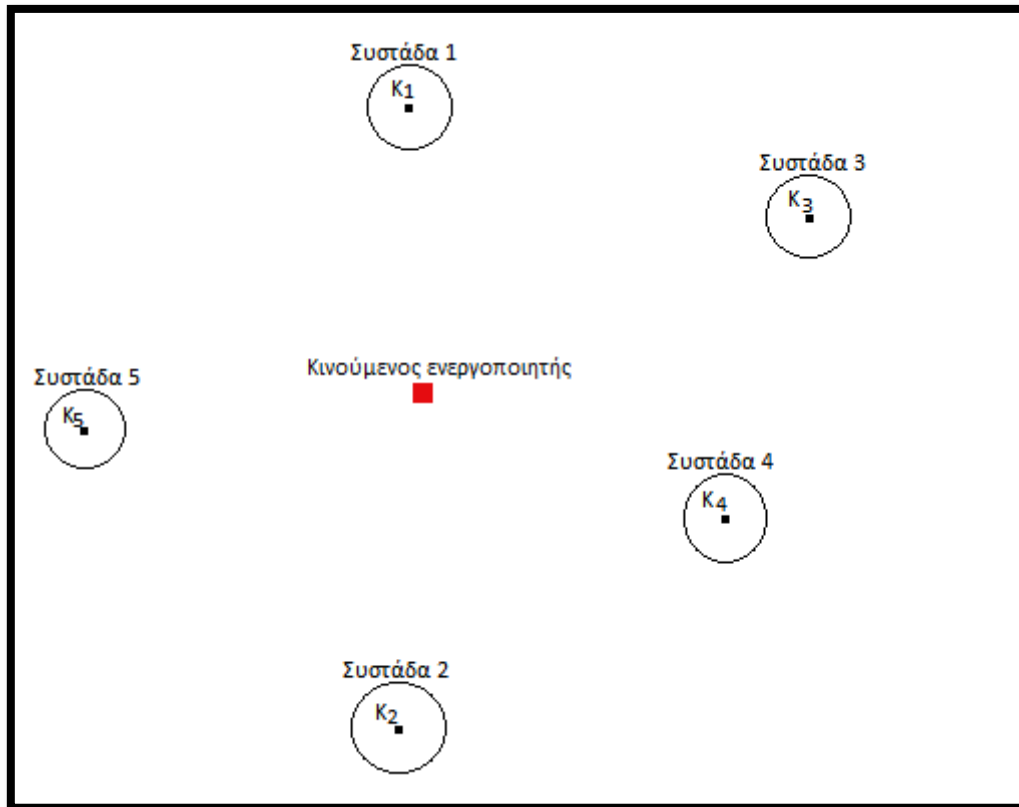
11.         elapsed_time +=  $\frac{dist}{actor\_speed}$  ;
12.         sp = m; // ορισμός m ως νέου σημείου εκκίνησης.
13.         num_visited ++;
14.     }
15.     Σημείωσε όλα τα σημεία του S ως visited;
        // Επιστροφή στο αρχικό σημείο εκκίνησης
16.     m = starting point;
17.     dist = απόσταση μεταξύ sp και m;
18.     elapsed_time +=  $\frac{dist}{actor\_speed}$  ;
19. }

```

Ας εξετάσουμε βήμα προς βήμα τον παραπάνω αλγόριθμο. Αρχικά, στο βήμα 1 ο παρερχόμενος χρόνος (elapsed_time) του αλγορίθμου ισούται με μηδέν, μιας και από το σημείο αυτό και μετά ξεκινά η εκτέλεση του αλγορίθμου από τον ενεργοποιητή του δικτύου. Στη συνέχεια, ελέγχεται το κατά πόσο ο παρερχόμενος αυτός χρόνος είναι μικρότερος από τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης (βήμα 2). Αν η συνθήκη είναι αληθής, ο ενεργοποιητής του δικτύου επισκέπτεται το σημείο εκκίνησης (οποιοδήποτε κέντρο συστάδας έχει ορίσει ως σημείο εκκίνησης) και αυξάνει το δείκτη καταμέτρησης των συστάδων που έχει επισκεφτεί (num_visited) εντός του δικτύου (βήματα 3 - 6). Στη συνέχεια, αφού ο ενεργοποιητής επισκεφτεί το σημείο εκκίνησης, αναζητά το επόμενο προς επίσκεψη κέντρο συστάδας αισθητήρων. Το κέντρο αυτό, είναι εκείνο το οποίο απέχει τη μικρότερη δυνατή απόσταση από την τρέχουσα θέση του ενεργοποιητή. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι ο ενεργοποιητής στο βήμα 8 υπολογίζει την απόστασή του από την τρέχουσα θέση του προς όλα τα υπόλοιπα κέντρα συστάδων που δεν έχει επισκεφτεί ακόμα. Ο αλγόριθμος δεν διευκρινίζει τη μέθοδο με την οποία υπολογίζονται οι παραπάνω αποστάσεις. Θα μπορούσε για παράδειγμα να χρησιμοποιείται η μέθοδος της **ευκλείδειας απόστασης**. Το κέντρο που απέχει τη μικρότερη απόσταση από την τρέχουσα θέση του ενεργοποιητή, επιλέγεται ως η επόμενη προς επίσκεψη συστάδα (βήμα 8). Το νέο κέντρο προστίθεται στο μονοπάτι P και σημειώνεται ως visited (βήμα 9). Ο χρόνος που απαιτείται για να μετακινηθεί ο ενεργοποιητής προς τη νέα συστάδα προστίθεται στον παρερχόμενο χρόνο του αλγορίθμου (βήμα 11). Το νέο κέντρο ορίζεται ως το τρέχον σημείο εκκίνησης του ενεργοποιητή (βήμα 12), ενώ στο βήμα 13 αυξάνεται ο δείκτης καταμέτρησης των συστάδων που έχει επισκεφτεί (num_visited) ο ενεργοποιητής. Τα βήματα 7 - 14 εκτελούνται επαναληπτικά μέχρι ο ενεργοποιητής να επισκεφτεί όλα τα κέντρα συστάδων του αραιά συνδεδεμένου WSN. Στο βήμα 15, ο ενεργοποιητής έχει επισκεφτεί όλα τα κέντρα του συνόλου S με τη σειρά που καθορίζει το εξαγόμενο μονοπάτι P. Στη συνέχεια, ο ενεργοποιητής επιστρέφει στο αρχικό του σημείο εκκίνησης (βήμα 16). Ο χρόνος που απαιτείται για να μετακινηθεί ο ενεργοποιητής προς το αρχικό σημείο εκκίνησης, προστίθεται στον παρερχόμενο χρόνο του αλγορίθμου (βήμα 18). Αν ο παρερχόμενος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι μικρότερος της διάρκειας προσομοίωσης, τότε ο ενεργοποιητής εκτελεί ξανά τον εν λόγω αλγόριθμο από την αρχή, παράγοντας εκ νέου το μονοπάτι επίσκεψης των συστάδων P. Σε διαφορετική περίπτωση, ο ενεργοποιητής έχει επισκεφτεί τα κέντρα όλων των συστάδων και επιστρέφει στο αρχικό του σημείο εκκίνησης.

Στιγμιότυπο εκτέλεσης

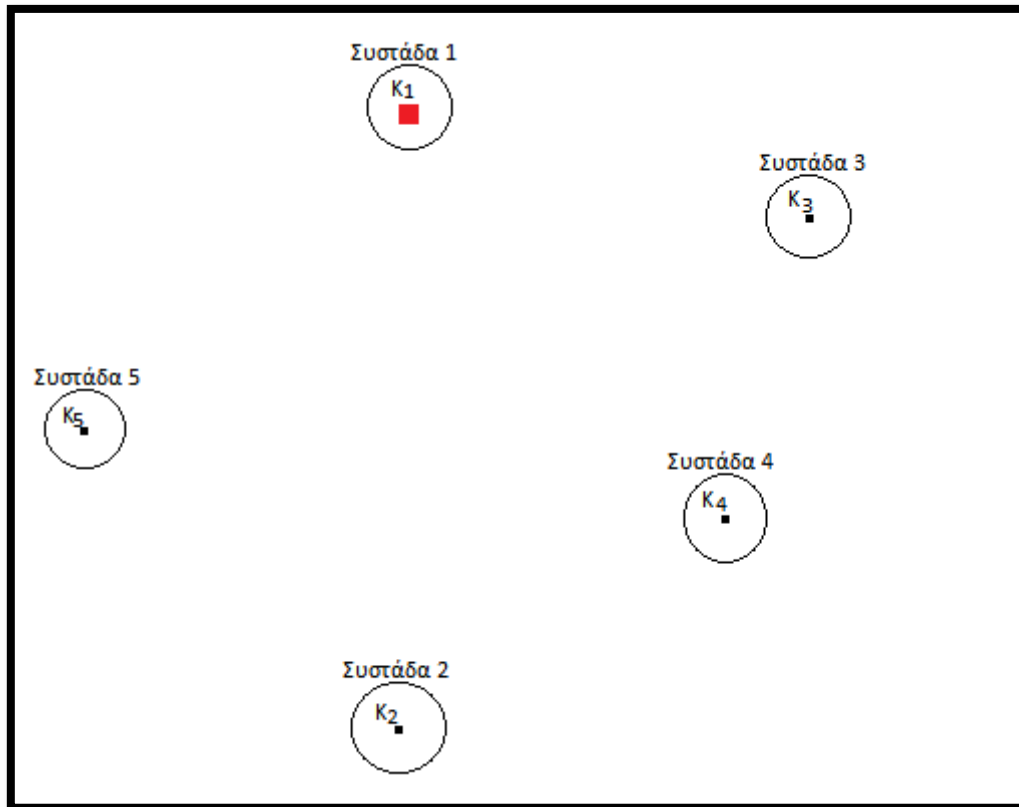
Ας δούμε ένα στιγμιότυπο εκτέλεσης του αλγορίθμου MM1. Το αραιά συνδεδεμένο WSN στο οποίο θα εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο, αποτελείται από πέντε συστάδες αισθητήρων (Συστάδα 1 έως Συστάδα 5) και έναν κινούμενο ενεργοποιητή. Τα σημεία επίσκεψης του ενεργοποιητή είναι τα κέντρα των συστάδων αισθητήρων $S = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}$. Για λόγους καλύτερης παρουσίασης, στις εικόνες που ακολουθούν, απεικονίζουμε μόνο τα κέντρα των συστάδων των αισθητήρων παραλείποντας τους αντίστοιχους αισθητήρες. Υποθέτουμε ότι το αρχικό σημείο εκκίνησης του ενεργοποιητή είναι το κέντρο K_1 . Υποθέτουμε ότι ο αλγόριθμος εκτελείται από τον ενεργοποιητή μία φορά στα χρονικά πλαίσια μίας προσομοίωσης. Η αρχική εικόνα του δικτύου, φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 4.3: Αρχική εικόνα δικτύου.

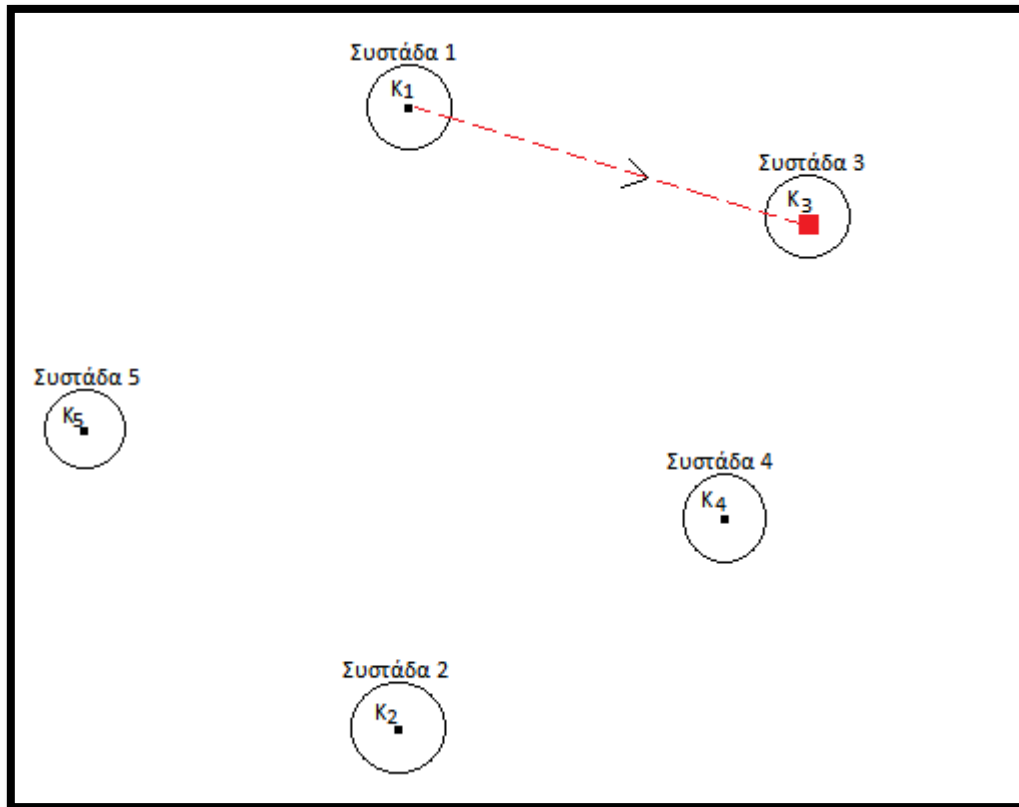
Υποθέτουμε ότι ο ενεργοποιητής υπολογίζει την απόστασή του από τα κέντρα των συστάδων χρησιμοποιώντας τον τύπο της **ευκλείδειας απόστασης**.

Ο ενεργοποιητής εκτελεί τον αλγόριθμο MM1 για την εύρεση του μονοπατιού P, το οποίο αποτελεί τη σειρά επίσκεψης των κέντρων των συστάδων αισθητήρων του δικτύου. Αρχικά, στο 1^ο βήμα μεταβαίνει στο αρχικό σημείο εκκίνησης K₁. Συνεπώς $P = \{K_1\}$. Η κατάσταση αυτή, απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



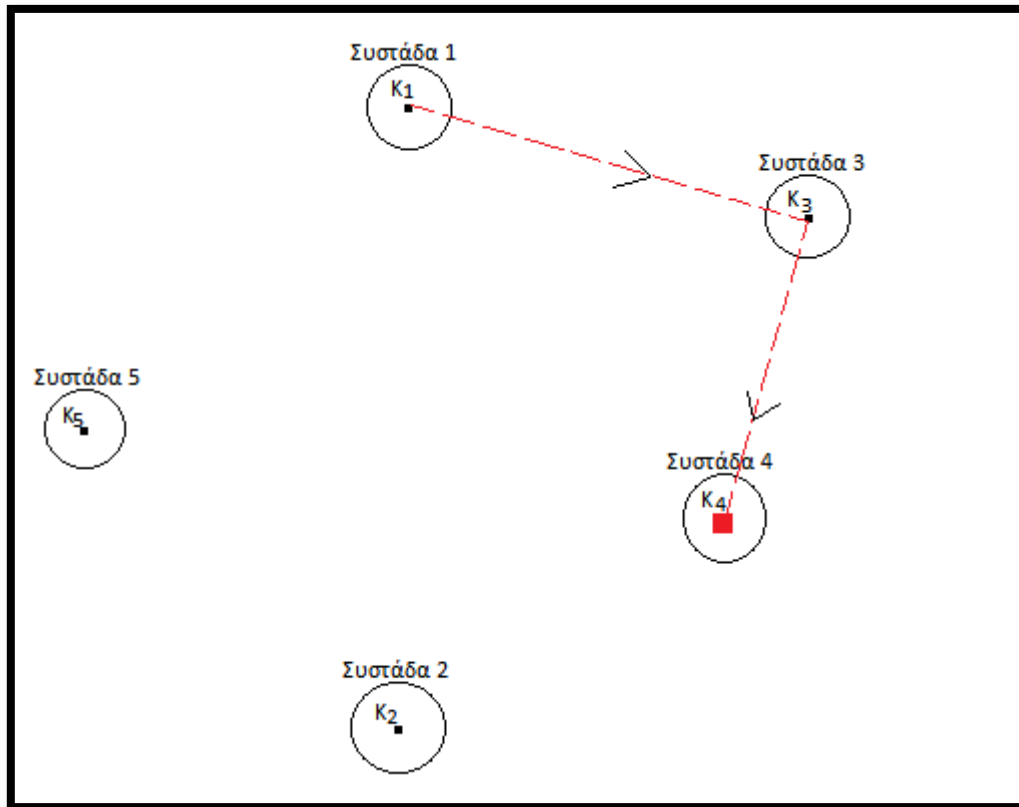
Εικόνα 4.4: 1^{ος} προορισμός ενεργοποιητή: K_1 .

Στο 2^ο βήμα, από το σημείο K_1 , ο ενεργοποιητής υπολογίζει τις αποστάσεις προς όλα τα υπόλοιπα κέντρα συστάδων που δεν έχει επισκεφτεί ακόμα, και επιλέγει να μεταβεί σε αυτό από το οποίο απέχει τη μικρότερη απόσταση. Με άλλα λόγια, υπολογίζει τη συνάρτηση $\min = \{\text{dist}K_1K_3, \text{dist}K_1K_4, \text{dist}K_1K_2, \text{dist}K_1K_5\} = \text{dist}K_1K_3$. Συνεπώς, αποφασίζει να μεταβεί στο κέντρο K_3 . Το εξαγόμενο μονοπάτι ισούται με $P = \{K_1, K_3\}$. Στην εικόνα που ακολουθεί, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η διαδρομή που ακολουθεί ο ενεργοποιητής.



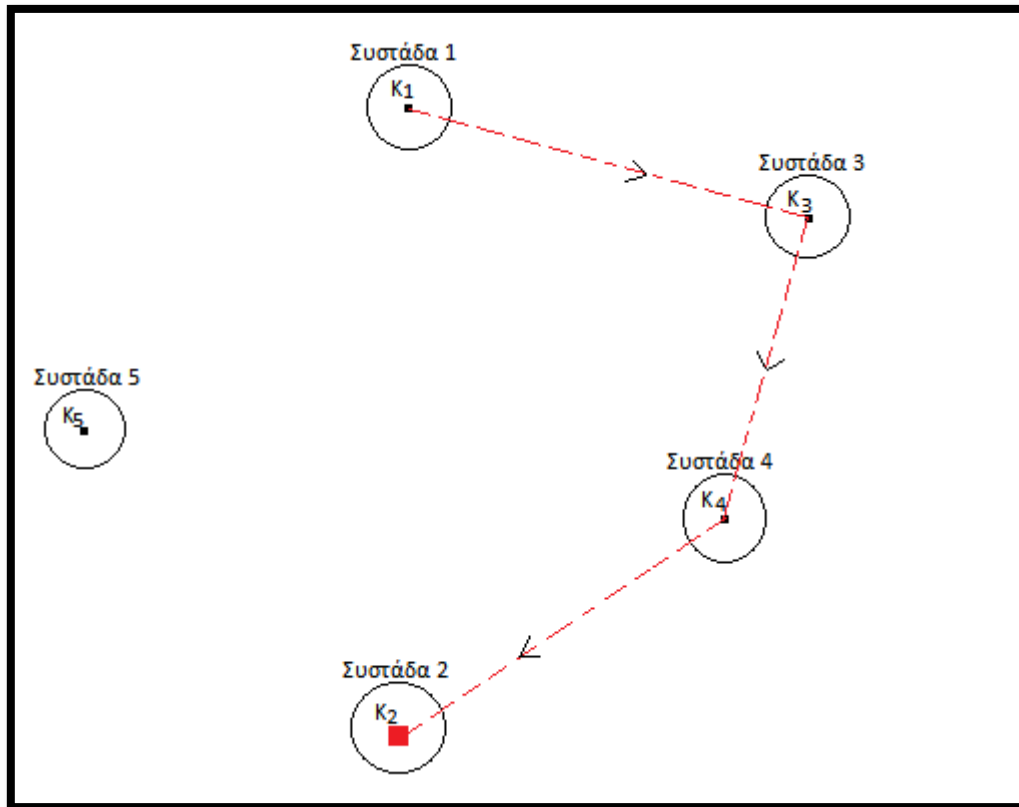
Εικόνα 4.5: 2^{ος} προσρισμός ενεργοποιητή: K_3 .

Στο 3^ο βήμα, από το σημείο K_3 , ο ενεργοποιητής υπολογίζει τις αποστάσεις προς όλα τα υπόλοιπα κέντρα συστάδων που δεν έχει επισκεφτεί ακόμα, και επιλέγει να μεταβεί σε αυτό από το οποίο απέχει τη μικρότερη απόσταση. Με άλλα λόγια, υπολογίζει τη συνάρτηση $\min = \{\text{dist}K_3K_4, \text{dist}K_3K_2, \text{dist}K_3K_5\} = \text{dist}K_3K_4$. Συνεπώς, αποφασίζει να μεταβεί στο κέντρο K_4 . Το εξαγόμενο μονοπάτι ισούται με $P = \{K_1, K_3, K_4\}$. Στην εικόνα που ακολουθεί, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η διαδρομή που ακολουθεί ο ενεργοποιητής.



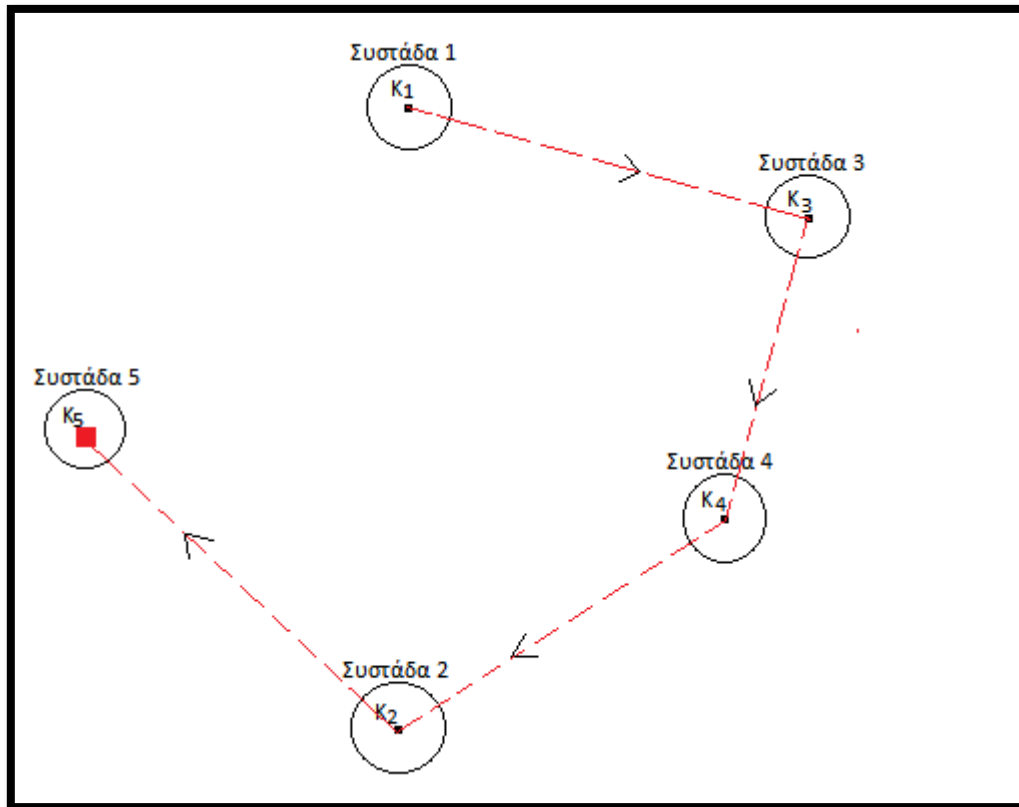
Εικόνα 4.6: 3^{ος} προορισμός ενεργοποιητή: K_4 .

Στο 4^ο βήμα, από το σημείο K_4 , ο ενεργοποιητής υπολογίζει τις αποστάσεις προς όλα τα υπόλοιπα κέντρα συστάδων που δεν έχει επισκεφτεί ακόμα, και επιλέγει να μεταβεί σε αυτό από το οποίο απέχει τη μικρότερη απόσταση. Με άλλα λόγια, υπολογίζει τη συνάρτηση $\min = \{\text{dist}K_4K_2, \text{dist}K_4K_5\} = \text{dist}K_4K_2$. Συνεπώς, αποφασίζει να μεταβεί στο κέντρο K_2 . Το εξαγόμενο μονοπάτι ισούται με $P = \{K_1, K_3, K_4, K_2\}$. Στην εικόνα που ακολουθεί, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η διαδρομή που ακολουθεί ο ενεργοποιητής.



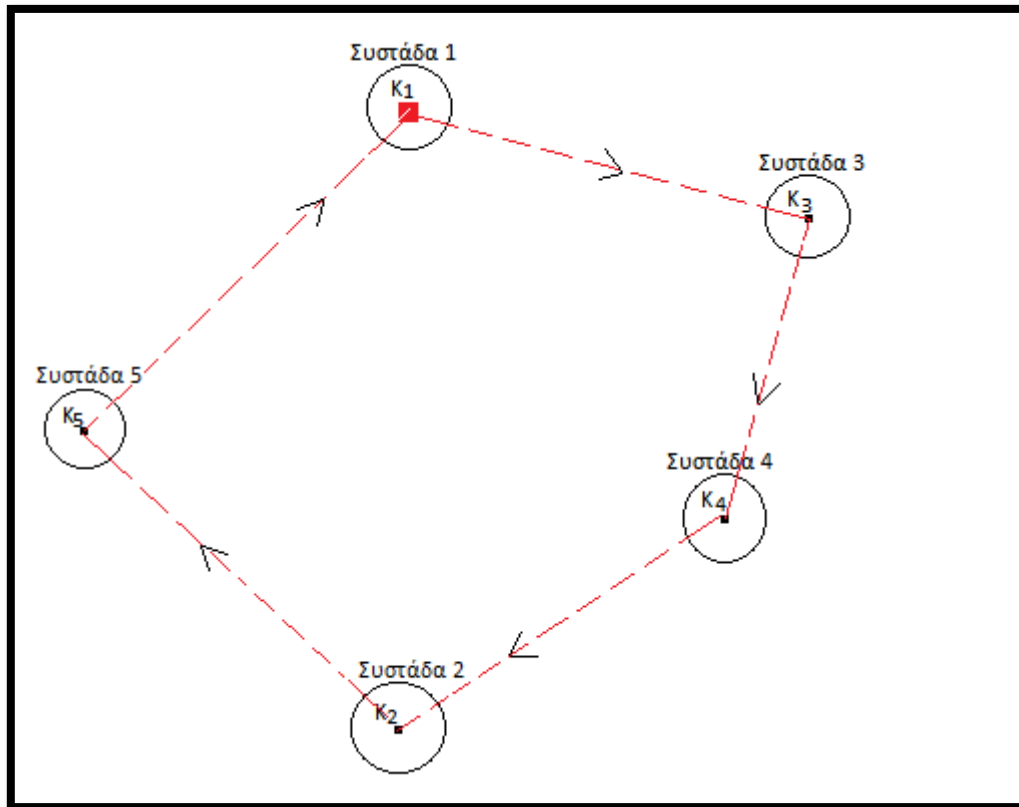
Εικόνα 4.7: 4^{ος} προορισμός ενεργοποιητή: K_2 .

Στο 5^ο βήμα, ο ενεργοποιητής επιλέγει να επισκεφτεί το τελευταίο εναπομείναν κέντρο K_5 . Συνεπώς, το εξαγόμενο μονοπάτι ισούται με $P = \{K_1, K_3, K_4, K_2, K_5\}$. Στην εικόνα που ακολουθεί, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η διαδρομή που ακολουθεί ο ενεργοποιητής.



Εικόνα 4.8: 5^{ος} προορισμός ενεργοποιητή: K_5 .

Τέλος, στο 6^ο βήμα, ο ενεργοποιητής επιστρέφει στο αρχικό σημείο εκκίνησης K_1 . Συνεπώς, το τελικό εξαγόμενο μονοπάτι που ακολουθεί ο ενεργοποιητής, ισούται με $P = \{K_1, K_3, K_4, K_2, K_5, K_1\}$. Στην εικόνα που ακολουθεί, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η διαδρομή που ακολουθεί ο ενεργοποιητής, με τελικό προορισμό το αρχικό σημείο εκκίνησης K_1 .



Εικόνα 4.9: Επιστροφή ενεργοποιητή στο αρχικό σημείο εκκίνησης K_1 .

4.2.2 Στατικός αλγόριθμος MM2

Ο δεύτερος στατικός αλγόριθμος διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών ενός αραιά συνδεδεμένου WSN που θα παρουσιάσουμε, ονομάζεται **MM2** (Mobility Model 2) [10].

Όπως έγινε κατανοητό από τον προηγούμενο αλγόριθμο, τα κέντρα των συστάδων αισθητήρων είναι σημεία του δικτύου με συντεταγμένες (x, y) . Τα κέντρα αυτά, αποτελούν τα στοιχεία του συνόλου S (βλ. ενότητα 4.2). Ο αλγόριθμος της παρούσας ενότητας, εξετάζει τη συντεταγμένη x των κέντρων των συστάδων του δικτύου. Ειδικότερα, τα κέντρα τοποθετούνται σε μία λίστα L , ξεκινώντας από αυτό με τη μικρότερη τιμή x συντεταγμένης. Το επόμενο κέντρο της λίστας L , είναι αυτό με την **αμέσως** μεγαλύτερη τιμή x συντεταγμένης σε σχέση με το τελευταίο στοιχείο της λίστας. Συνεπώς, όλα τα κέντρα συστάδων του δικτύου, τοποθετούνται στη λίστα L κατά **αύξουσα** σειρά, με βάση την τιμή της συντεταγμένης x .

Αν ο ενεργοποιητής του δικτύου ακολουθήσει τη λίστα L κατά την επίσκεψη των συστάδων, τότε θα σαρώσει τις συστάδες του WSN από τα αριστερά προς τα δεξιά. Η θέση όμως του ενεργοποιητή πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου μπορεί να είναι οπουδήποτε μέσα στο δίκτυο. Έτσι, εντοπίζει το πλησιέστερο σημείο της λίστας L από την τρέχουσα θέση του, και το θέτει ως αρχικό σημείο εκκίνησης. Στη συνέχεια, επισκέπτεται τα σημεία της λίστας L , είτε σαρώνοντας τη λίστα προς τα πίσω (backwards) είτε προς τα μπροστά (forward). Στο σημείο αυτό, αξίζει να επισημάνουμε ότι με τον αλγόριθμο MM2, ο ενεργοποιητής μπορεί να επισκεφτεί ορισμένα κέντρα συστάδων, παραπάνω από μία φορά προτού επισκεφτεί όλα τα κέντρα μία φορά. Κάτι τέτοιο, δε συμβαίνει στον αλγόριθμο MM1 [10].

Ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου MM2, ο οποίος εκτελείται από τον ενεργοποιητή του δικτύου, είναι ο παρακάτω [10]:

| |
|------------------------------------|
| Ψευδοκώδικας για τον αλγόριθμο MM2 |
|------------------------------------|

1. elapsed_time=0; // παρερχόμενος χρόνος

// Δημιουργία λίστας L

2. Βρες το κέντρο συστάδας του συνόλου S με τη μικρότερη τιμή x συντεταγμένης;
3. Τοποθέτησε το εν λόγω κέντρο στη λίστα L και σημείωσε το ως visited στο S;
4. num_visited = 1;
5. if (num_visited < total_num_clusters) {
6. Βρες το επόμενο κέντρο συστάδας με την αμέσως μεγαλύτερη τιμή x συντεταγμένης;
7. Τοποθέτησε το εν λόγω κέντρο στη λίστα L και σημείωσε το ως visited στο S;
8. num_visited ++;
9. }

// Εξαγωγή μονοπατιού P

// Ως αρχικό σημείο εκκίνησης, ορίζεται το κέντρο συστάδας της λίστας L που βρίσκεται

// πλησιέστερα στη τρέχουσα θέση του ενεργοποιητή.

10. Σάρωσε τη λίστα L για την εύρεση του αρχικού σημείου εκκίνησης;
11. Πρόσθεσε το σημείο εκκίνησης στο P;
12. sp = starting point;
13. elapsed_time=0;

// Εύρεση του επόμενου κέντρου συστάδας που θα επισκεφτεί ο ενεργοποιητής

14. backwards = FALSE;
15. if (elapsed_time < sim_time) {
16. if (start of list) {
17. forward = TRUE;
18. backwards = FALSE;
19. }
20. else if (not end of list and backwards == FALSE) {
21. forward = TRUE;
22. else { // Ο ενεργοποιητής βρίσκεται στο τέλος της λίστας L ή σαρώνει ήδη τη λίστα L προς τα πίσω
23. backwards = TRUE;
24. forward = FALSE;
25. }
26. if (forward == TRUE) {
27. Σάρωσε τη λίστα L προς τα μπροστά;
28. else
29. Σάρωσε τη λίστα L προς τα πίσω;
30. m = επόμενο στοιχείο της λίστας L; /* Με m συμβολίζουμε το επόμενο κέντρο συστάδας προς επίσκεψη */
31. Πρόσθεσε το m στο μονοπάτι P;

- ```

32. dist = απόσταση μεταξύ sp και m;
33. elapsed_time += $\frac{dist}{actor_speed}$;
34. sp = m; // ορισμός m ως νέου σημείου εκκίνησης.
35. }

```

Ας εξετάσουμε βήμα προς βήμα τον παραπάνω αλγόριθμο. Αρχικά, στο βήμα 1 ο παρεχόμενος χρόνος (elapsed\_time) του αλγορίθμου ισούται με μηδέν, μιας και από το σημείο αυτό και μετά ξεκινά η εκτέλεση του αλγορίθμου από τον ενεργοποιητή του δικτύου. Στα βήματα 2 – 9, ο ενεργοποιητής εξάγει τη λίστα L με τα κέντρα των συστάδων αισθητήρων του δικτύου. Στα βήματα 10 – 13, ο ενεργοποιητής εντοπίζει το κέντρο συστάδας εκείνο το οποίο βρίσκεται πλησιέστερα στην τρέχουσα θέση του. Το κέντρο αυτό, αποτελεί και το αρχικό σημείο εκκίνησης του ενεργοποιητή. Στα βήματα 15 – 35, ο ενεργοποιητής, επαναληπτικά, εξάγει το μονοπάτι επίσκεψης P στα κέντρα των συστάδων αισθητήρων του WSAN. Ειδικότερα, στο βήμα 16 ελέγχεται το κατά πόσο ο ενεργοποιητής βρίσκεται στο αρχικό σημείο της λίστας L. Αν η συνθήκη είναι αληθής, τότε ο ενεργοποιητής πρέπει να σαρώσει τη λίστα L προς τα μπροστά (βήμα 17: forward = TRUE) και να επισκεφτεί το αμέσως επόμενο κέντρο συστάδας της λίστας L. Στο βήμα 20, ελέγχεται το κατά πόσο ο ενεργοποιητής βρίσκεται σε ένα ενδιάμεσο σημείο της λίστας L. Αν η συνθήκη είναι αληθής, τότε ο ενεργοποιητής σαρώνει και πάλι τη λίστα L προς τα μπροστά (βήμα 21: forward = TRUE). Διαφορετικά, ο ενεργοποιητής είτε βρίσκεται στο τέλος της λίστας L (βήμα 22), με αποτέλεσμα να πρέπει να σαρώσει τη λίστα L προς τα πίσω (από το τρέχον σημείο μεταβαίνει στο αμέσως προηγούμενο σημείο της λίστας L) (βήμα 23: backwards = TRUE), είτε ήδη, από προηγούμενη εκτέλεση, έχει ξεκινήσει την backwards σάρωση, με αποτέλεσμα να ισχύει και πάλι η συνθήκη backwards = TRUE. Τέλος, στα βήματα 26 – 35, ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής forward, ο ενεργοποιητής επισκέπτεται το κατάλληλο κέντρο συστάδας της λίστας L, και θέτει το νέο κέντρο ως σημείο εκκίνησης. Τα βήματα 15 – 35 εκτελούνται επαναληπτικά έως ότου λήξει το χρονικό διάστημα της προκαθορισμένης προσομοίωσης.

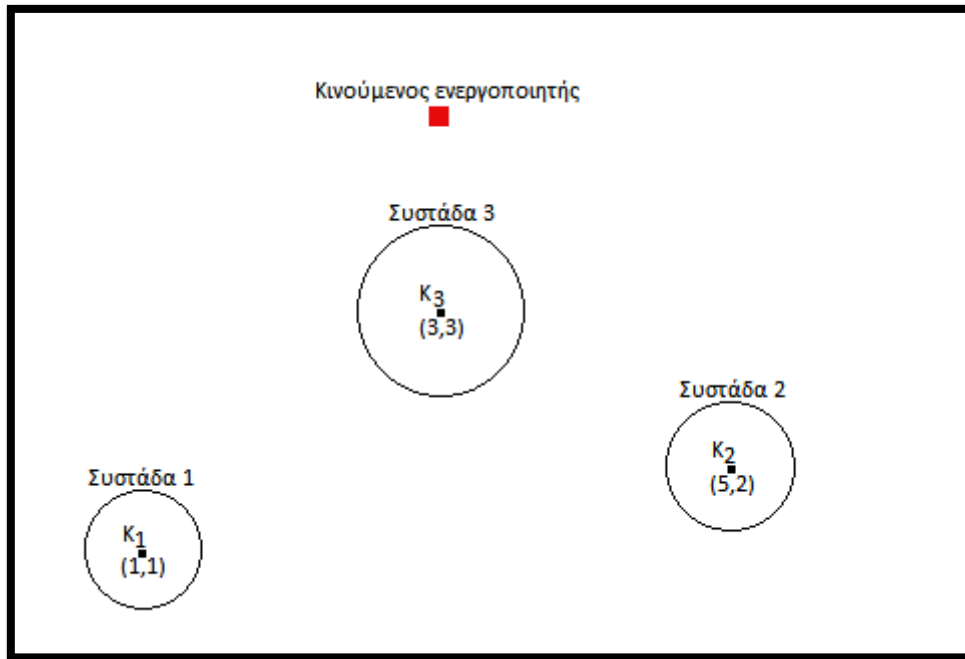
### Στιγμιότυπο εκτέλεσης

Ας δούμε ένα στιγμιότυπο εκτέλεσης του αλγορίθμου MM2. Το αραιά συνδεδεμένο WSAN στο οποίο θα εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο, αποτελείται από τρεις συστάδες αισθητήρων (Συστάδα 1 έως Συστάδα 3) και έναν κινούμενο ενεργοποιητή. Τα σημεία επίσκεψης του ενεργοποιητή είναι τα κέντρα των συστάδων αισθητήρων  $S = \{K_1, K_2, K_3\}$ . Για λόγους καλύτερης παρουσίασης, στις εικόνες που ακολουθούν, απεικονίζουμε μόνο τα κέντρα των συστάδων των αισθητήρων παραλείποντας τους αντίστοιχους αισθητήρες. Υποθέτουμε ότι ο αλγόριθμος εκτελείται από τον ενεργοποιητή μία φορά στα χρονικά πλαίσια μίας προσομοίωσης επισκεπτόμενος όλες τις συστάδες.

Οι συντεταγμένες των κέντρων των συστάδων αισθητήρων του δικτύου, υποθέτουμε πως είναι οι παρακάτω:

1.  $K_1 = (1,1)$ .
2.  $K_2 = (5,2)$ .
3.  $K_3 = (3,3)$ .

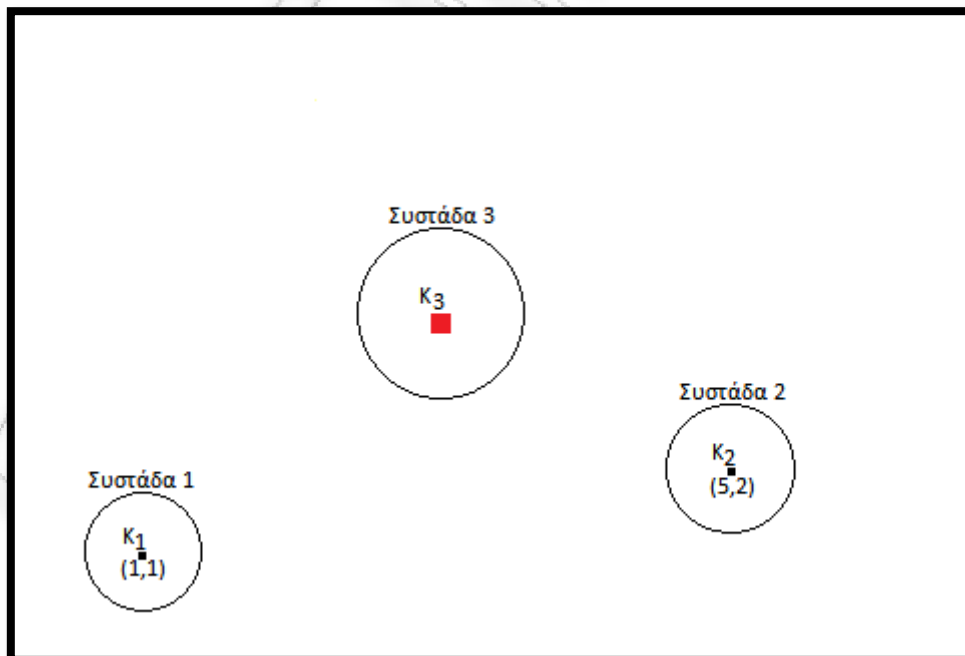
Η αρχική εικόνα του αραιά συνδεδεμένου WSAN, στην οποία απεικονίζεται και η τρέχουσα θέση του κινούμενου ενεργοποιητή, φαίνεται παρακάτω:



**Εικόνα 4.10: Αρχική εικόνα δικτύου.**

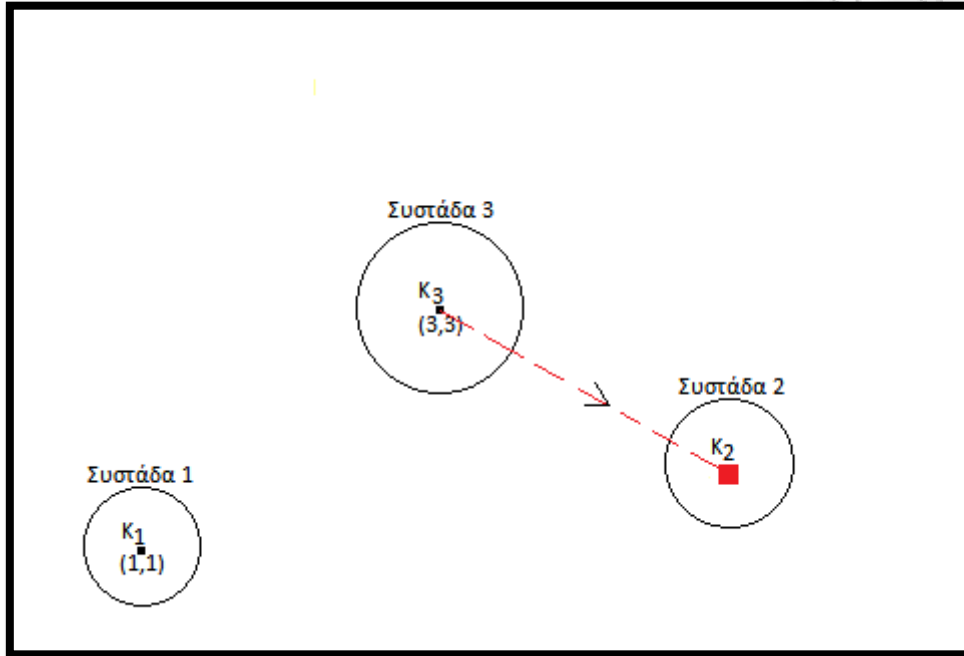
Ο ενεργοποιητής του δικτύου, ξεκινώντας την εκτέλεση του αλγορίθμου MM2, σε πρώτη φάση υπολογίζει τη λίστα  $L$ , με βάση την τιμή της συντεταγμένης  $x$  των κέντρων  $K_1, K_2, K_3$ . Συνεπώς, η λίστα διαμορφώνεται ως εξής:  $L = \{K_1, K_3, K_2\}$ .

Στη συνέχεια, από την εικονιζόμενη τρέχουσα θέση του, ο ενεργοποιητής υπολογίζει το αρχικό του σημείο εκκίνησης. Το σημείο αυτό είναι εκείνο που βρίσκεται πλησιέστερα στην τρέχουσα θέση του. Συνεπώς, το αρχικό σημείο εκκίνησης του ενεργοποιητή είναι το κέντρο  $K_3$ . Άρα, το μέχρι στιγμής εξαγόμενο μονοπάτι που ακολουθεί ο ενεργοποιητής, ισούται με  $P = \{K_3\}$ . Η κατάσταση αυτή, απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



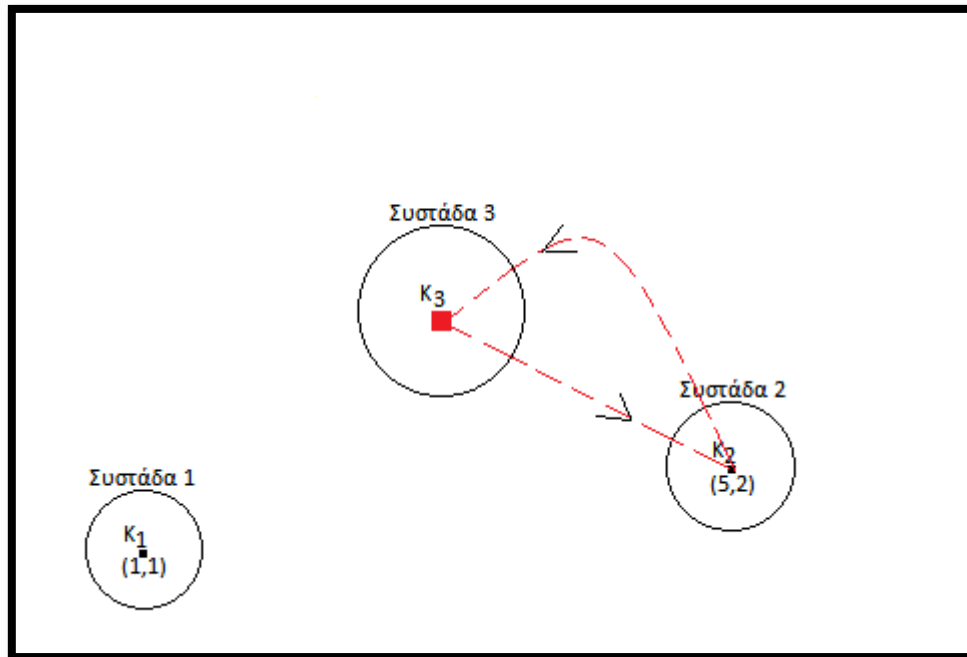
**Εικόνα 4.11: 1<sup>ος</sup> προορισμός ενεργοποιητή:  $K_3$ .**

Πλέον ο ενεργοποιητής βρίσκεται στο κέντρο  $K_3$ . Επειδή το σημείο αυτό βρίσκεται στο κέντρο της λίστας  $L = \{K_1, K_3, K_2\}$ , ο ενεργοποιητής αποφασίζει να σαρώσει την εν λόγω λίστα προς τα **μπροστά** (forward = TRUE). Συνεπώς, το επόμενο κέντρο συστάδας προς επίσκεψη, είναι το  $K_2$ . Άρα, το μέχρι στιγμής εξαγόμενο μονοπάτι που ακολουθεί ο ενεργοποιητής, ισούται με  $P = \{K_3, K_2\}$ . Στην εικόνα που ακολουθεί, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η διαδρομή που ακολουθεί ο ενεργοποιητής.



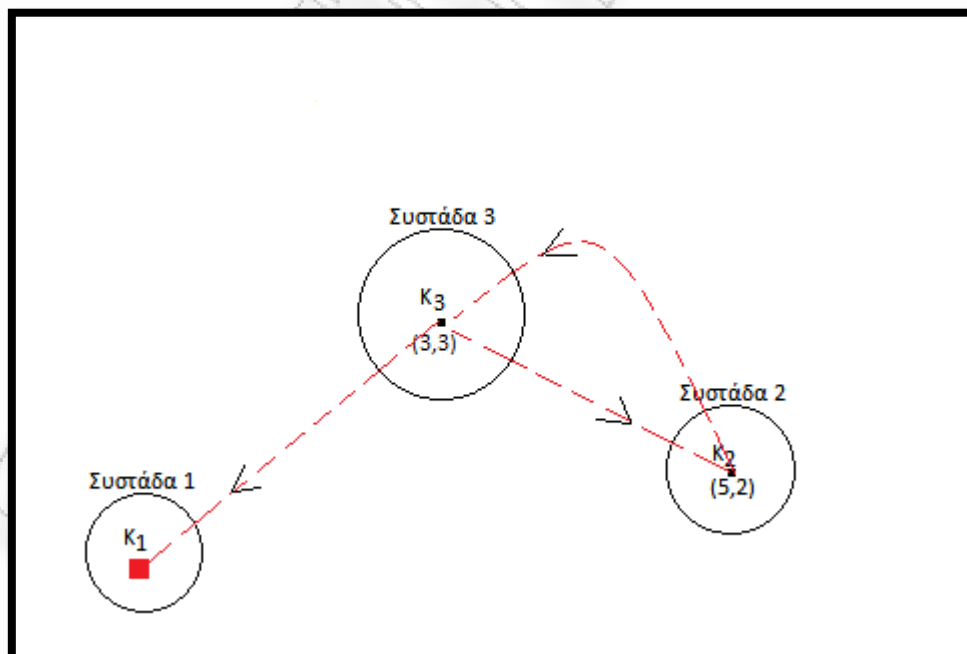
**Εικόνα 4.12: 2<sup>ος</sup> προορισμός ενεργοποιητή:  $K_2$ .**

Πλέον ο ενεργοποιητής βρίσκεται στο κέντρο  $K_2$ . Επειδή το σημείο αυτό είναι το τελευταίο της λίστας  $L = \{K_1, K_3, K_2\}$ , ο ενεργοποιητής αποφασίζει να σαρώσει την εν λόγω λίστα προς τα **πίσω** (backwards = TRUE). Συνεπώς, το επόμενο κέντρο συστάδας προς επίσκεψη, είναι και πάλι το  $K_3$ . Άρα, το μέχρι στιγμής εξαγόμενο μονοπάτι που ακολουθεί ο ενεργοποιητής, ισούται με  $P = \{K_3, K_2, K_3\}$ . Στην εικόνα που ακολουθεί, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η διαδρομή που ακολουθεί ο ενεργοποιητής.



**Εικόνα 4.13: 3<sup>ος</sup> προορισμός ενεργοποιητή:  $K_3$ .**

Πλέον ο ενεργοποιητής βρίσκεται στο κέντρο  $K_3$ . Επειδή ήδη από το προηγούμενο βήμα το αλγόριθμου η μεταβλητή backwards ισούται με TRUE, ο ενεργοποιητής και σε αυτό το βήμα θα σαρώσει τη λίστα L προς τα πίσω. Με άλλα λόγια, σύμφωνα με το βήμα 22 του αλγορίθμου, επειδή ήδη ο ενεργοποιητής από το προηγούμενο βήμα σαρώνει τη λίστα L προς τα πίσω, το ίδιο θα συνεχίσει να κάνει και σε αυτό το βήμα (backwards = TRUE). Συνεπώς, το επόμενο κέντρο συστάδας προς επίσκεψη, είναι το  $K_1$ . Άρα, το **τελικό** εξαγόμενο που ακολουθεί ο ενεργοποιητής, ισούται με  $P = \{K_3, K_2, K_3, K_1\}$ . Στην εικόνα που ακολουθεί, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η διαδρομή που ακολουθεί ο ενεργοποιητής.



**Εικόνα 4.14: Τελικός προορισμός ενεργοποιητή:  $K_1$ .**

Ο αλγόριθμος MM2, υποθέτουμε ότι εκτελείται από τον εν λόγω ενεργοποιητή **μία** φορά, παράγοντας το τελικό μονοπάτι  $P = \{K_3, K_2, K_3, K_1\}$ .

### 4.3 Παρουσίαση δυναμικών αλγορίθμων

Στην παρούσα ενότητα, θα παρουσιάσουμε ένα δυναμικό αλγόριθμο (μοντέλο κινητικότητας) διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών ενός αραιά συνδεδεμένου WSN που προτείνεται στη βιβλιογραφία. Εν συνεχεία, θα προταθεί ένας νέος αλγόριθμος αυτής της κατηγορίας.

#### 4.3.1 Δυναμικός αλγόριθμος MM3

Ο δυναμικός αλγόριθμος διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών ενός αραιά συνδεδεμένου WSN που θα παρουσιάσουμε, ονομάζεται **MM3** (Mobility Model 3) [10].

Στον αλγόριθμο αυτό καταβάλλεται προσπάθεια, με χρήση στατιστικών μοντέλων, να **προβλέπεται** το πλήθος των περιστατικών που θα ανιχνευθούν αν ο ενεργοποιητής επισκεφτεί μία συστάδα αισθητήρων  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ . Με  $E_a^i(t)$  αναπαριστούμε ακριβώς αυτή τη πρόβλεψη για τη συστάδα  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ .

Πιο συγκεκριμένα, ο ενεργοποιητής του δικτύου διατηρεί μία μεταβλητή  $E_a^i(t)$  για κάθε συστάδα αισθητήρων  $i$  του δικτύου. Οι μεταβλητές  $E_a^i(t)$  ανανεώνονται περιοδικά από τον ενεργοποιητή του δικτύου μέσω κατάλληλων εξισώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητή  $E_a^i(t)$  ισούται με [10]:

$$E_a^i(t) = \begin{cases} r * \frac{A_c^i}{A_t} * (t - t_u^i), & t_u^i \leq t < t_u^i + t_d \\ r * \frac{A_c^i}{A_t} * t_d, & t \geq t_u^i + t_d \end{cases}$$

όπου με  $r$  συμβολίζουμε το ρυθμό εμφάνισης περιστατικών, με  $A_c^i$  την περιοχή της συστάδας  $i$ , με  $A_t$  την συνολική περιοχή του δικτύου, με  $t_u^i$  τη χρονική στιγμή που ο ενεργοποιητής επισκέφτηκε τη συστάδα  $i$  για τελευταία φορά και με  $t_d$  τη χρονική διάρκεια ενός περιστατικού. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι οι παραπάνω παράμετροι είναι γνωστές κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων.

Στη συνέχεια ο ενεργοποιητής, και αφού πρώτα υπολογίσει τις μεταβλητές  $E_a^i(t)$  για κάθε συστάδα  $i$  του δικτύου, επιχειρεί να μεγιστοποιήσει τα ανιχνεύσιμα περιστατικά, επισκεπτόμενος πρώτα τις συστάδες με μεγάλες τιμές  $E_a^i(t)$  [10].

Η παραπάνω τεχνική, χρησιμοποιεί στην ουσία ένα μοντέλο πρόβλεψης του πλήθους των περιστατικών που θα παρουσιαστούν σε μία συστάδα αισθητήρων στο μέλλον, και θα ανιχνευθούν από τον ενεργοποιητή του δικτύου. Η παράθεση της τεχνικής έγινε με σύντομο και περιγραφικό τρόπο, έτσι ώστε να μπορέσει ο αναγνώστης να καταλάβει τη φιλοσοφία των δυναμικών αλγορίθμων, και να κατανοήσει καλύτερα την προτεινόμενη τεχνική που θα παραθέσουμε αμέσως μετά. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον αλγόριθμο MM3, ο αναγνώστης ενθαρρύνεται όπως ανατρέξει στην εργασία [10].

#### 4.3.2 Προτεινόμενος δυναμικός αλγόριθμος

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε ένα **νέο** δυναμικό αλγόριθμο διαχείρισης της κινητικότητας των ενεργοποιητών ενός αραιά συνδεδεμένου WSN. Ο **προτεινόμενος** αλγόριθμος ονομάζεται **δυναμικός αλγόριθμος με μνήμη**.

Ο εν λόγω αλγόριθμος, στηρίζεται στην εξής βασική φιλοσοφία: Ο ενεργοποιητής του WSN, επιλέγει να επισκέπτεται πρώτα συστάδες αισθητήρων στις οποίες στο παρελθόν έχει **εντοπίσει** τα περισσότερα συμβάντα. Η λογική πίσω από την παραπάνω φιλοσοφία, έγκειται στο ότι οι περιοχές ενός WSN που στο παρελθόν παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά συμβάντων, είναι πολύ πιθανό να παρουσιάζουν ανάλογα ποσοστά εμφάνισης περιστατικών και στο μέλλον. Συνεπώς, ο ενεργοποιητής λαμβάνοντας υπόψη την προϊστορία περιστατικών των συστάδων αισθητήρων του δικτύου, επιλέγει να επισκεφτεί στο μέλλον, συστάδες με μεγάλη προϊστορία καταγεγραμμένων περιστατικών. Επειδή ακριβώς ο προτεινόμενος αλγόριθμος, χρησιμοποιεί την προϊστορία καταγεγραμμένων περιστατικών στις συστάδες αισθητήρων του δικτύου, ονομάστηκε δυναμικός αλγόριθμος με **μνήμη**.

Ας πάρουμε για παράδειγμα ένας αραιά συνδεδεμένο WSN το οποίο εφαρμόζεται σε μία αγροτική έκταση. Οι συστάδες των αισθητήρων καταγράφουν το επίπεδο του pH στο έδαφος, ενώ ο ενεργοποιητής κινείται περιοδικά στο χώρο για να ενημερώνεται σχετικά με τα επίπεδα του pH των συστάδων και αναλόγως να δρα. Οι περιοχές του δικτύου με υψηλά καταγεγραμμένα ποσοστά pH, είναι πιθανό να παρουσιάσουν ανάλογη συμπεριφορά και στο μέλλον. Συνεπώς, θα ήταν χρήσιμο ο ενεργοποιητής να επισκέπτεται πρώτα τις περιοχές του δικτύου, που στο παρελθόν είχαν παρουσιάσει υψηλά ποσοστά pH.

Καταυτόν τον τρόπο, ο ενεργοποιητής θα εντοπίζει και θα αντιμετωπίζει έγκαιρα και πιο γρήγορα την αύξηση του επιπέδου pH στο υπέδαφος της αγροτικής περιοχής.

### Παρουσίαση αλγορίθμου

Κατά την παρουσίαση του δυναμικού αλγορίθμου με μνήμη, λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω υποθέσεις:

1. Το αραιά συνδεδεμένο WSN στο οποίο εφαρμόζεται ο αλγόριθμος, αποτελείται από αισθητήρες και **έναν** κινούμενο ενεργοποιητή.
2. Οι αισθητήρες οργανώνονται σε συστάδες. Για τον καθορισμό των συστάδων χρησιμοποιείται οποιοσδήποτε αλγόριθμος συσταδοποίησης (βλ. ενότητα 3.1.2). Ο ενεργοποιητής του δικτύου είναι γνώστης των συστάδων των αισθητήρων.
3. Ο ενεργοποιητής είναι σε θέση να γνωρίζει την τρέχουσα θέση (x, y) του κάθε αισθητήρα στο πεδίο του WSN.
4. Οι αισθητήρες κάθε συστάδας, αποστέλλουν τις μετρήσεις του σε ένα συγκεκριμένο αισθητήρα της συστάδας. Ο εν λόγω αισθητήρας ονομάζεται Cluster Head (CH), και καθορίζεται μέσω αλγορίθμου εκλογών που εκτελούν οι αισθητήρες σε κάθε συστάδα.
5. Ο ενεργοποιητής του δικτύου επισκέπτεται τις συστάδες του δικτύου, ρωτώντας τα αντίστοιχα CHs για τυχόν περιστατικά.
6. Οποιαδήποτε συστάδα αισθητήρων του δικτύου, μπορεί να επιλεγεί ως αρχικό σημείο εκκίνησης (starting point) του ενεργοποιητή. Στη συνέχεια, το μονοπάτι επίσκεψης P στις συστάδες αισθητήρων του δικτύου, καθορίζεται από τον δυναμικό αλγόριθμο με μνήμη που θα χρησιμοποιηθεί.

Για τον καθορισμό του μονοπατιού P, ο δυναμικός αλγόριθμος με μνήμη χρησιμοποιεί τα παρακάτω βήματα:

1. Το πρώτο πέρασμα του ενεργοποιητή από τις συστάδες αισθητήρων του δικτύου, πραγματοποιείται αποκλειστικά με βάση την απόσταση του από τις εναπομείναντες συστάδες. Αρχικά, ο ενεργοποιητής επισκέπτεται **τυχαία** μία συστάδα. Η επόμενη συστάδα προς επίσκεψη είναι αυτή που απέχει τη **μικρότερη** δυνατή απόσταση από την τρέχουσα θέση του. Καταυτόν τον τρόπο, ο ενεργοποιητής σαρώνει στο πρώτο του πέρασμα όλες τις συστάδες. Για τον υπολογισμό των αποστάσεων, χρησιμοποιείται ο τύπος της **ευκλείδειας απόστασης**.
2. Κατά το πρώτο πέρασμα του, ο ενεργοποιητής καταγράφει σε κατάλληλες μεταβλητές (μία μεταβλητή για κάθε συστάδα – μεταβλητή καταμέτρησης περιστατικών) το πλήθος των περιστατικών το οποίο εντόπισε σε κάθε συστάδα ξεχωριστά.
3. Στο τέλος του πρώτου περάσματος, ο ενεργοποιητής κατατάσσει τις συστάδες κατά φθίνουσα σειρά, με βάση τις τιμές των παραπάνω μεταβλητών. Συνεπώς, στο επόμενο πέρασμά του για την εξαγωγή του μονοπατιού P, ο ενεργοποιητής επισκέπτεται τις συστάδες ξεκινώντας από αυτή με τη μεγαλύτερη τιμή καταγεγραμμένων περιστατικών, συνεχίζοντας σε αυτή με την αμέσως μικρότερη κοκ.
4. Αν δύο ή και παραπάνω συστάδες έχουν την ίδια τιμή στην μεταβλητή καταμέτρησης περιστατικών, τότε ο ενεργοποιητής επισκέπτεται πρώτα την **πλησιέστερη** σε αυτόν συστάδα.
5. Κατά το πέρασμά του από τις συστάδες, ο ενεργοποιητής ενημερώνει περιοδικά τις μεταβλητές καταμέτρησης συστάδας, για να αποφασίσει πως θα κινηθεί στα μελλοντικά του περάσματα.
6. Η διαδικασία συνεχίζεται όσο ο ενεργοποιητής διαθέτει υπολειπόμενο απόθεμα ενέργειας.

Ο ψευδοκώδικας του δυναμικού αλγορίθμου με μνήμη, ο οποίος εκτελείται από τον ενεργοποιητή του δικτύου, είναι ο παρακάτω:

*Ψευδοκώδικας δυναμικού αλγορίθμου με μνήμη*

- ```

1. while (energy_level_of_actor>0) {
    // Αρχικό σάρωμα συστάδων με βάση την ευκλείδεια απόσταση
2.     current_position = αρχικό σημείο εκκίνησης;
    // Πρώτα το CH της συστάδας για τυχόν περιστατικά
3.     if (events == true) {
4.         detected_events[clusterid] = πλήθος events στη συστάδα;

```

```

5.    }
6.    Βρες τις ευκλείδειες αποστάσεις σου προς όλες τις συστάδες που δεν έχεις επισκεφτεί
    ακόμα;
7.    Επισκέψου αυτή που απέχει τη μικρότερη απόσταση από την τρέχουσα θέση σου;
8.    current_position = νέα συστάδα;
9.    if (events == true) {
10.           detected_events[clusterid] = πλήθος events στη συστάδα;
11.    }
12.    Επανάλαβε τα βήματα 6 – 11 μέχρι να επισκεφτείς όλες τις συστάδες;

    /* Επόμενο σάρωμα των συστάδων με βάση τις τιμές των μεταβλητών
    detected_events[clusterid] */
13.    Ταξινόμησε τις μεταβλητές detected_events[clusterid] σε μία λίστα
    Route [number of clusters] κατά φθίνουσα σειρά;
14.    Επισκέψου τις συστάδες με τη σειρά που εμφανίζονται στη λίστα Route[];
15.    Αν υπάρχουν συστάδες με ίδια τιμή στις μεταβλητές detected_events[clusterid]
    χρησιμοποίησε ευκλείδεια απόσταση, επισκεπτόμενος πρώτα τη πλησιέστερη συστάδα;
16.    Για κάθε συστάδα, ενημέρωσε την αντίστοιχη μεταβλητή detected_events[clusterid];
17.    Επανάλαβε τα βήματα 14 – 16 μέχρι να επισκεφτείς όλες τις συστάδες του δικτύου;
18.    Επανάλαβε τα βήματα 13 – 17 όσο διαθέτεις αποθέματα ενέργειας;
19. }

```

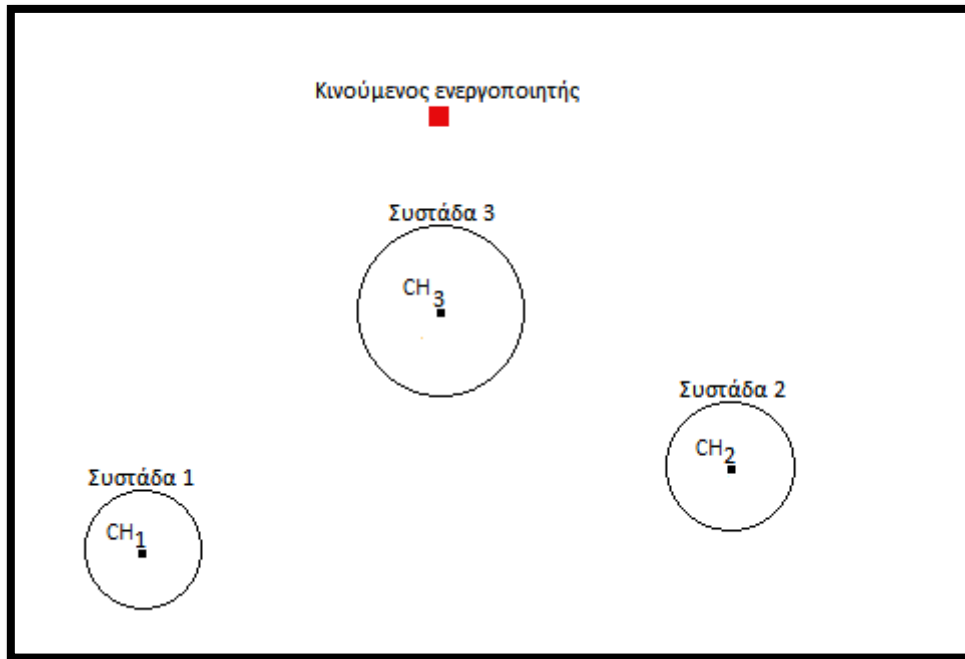
Η **διαφορά** του δυναμικού αλγορίθμου με μνήμη σε σύγκριση με τον δυναμικό αλγόριθμο MM3, είναι η εξής:

- Στον δυναμικό αλγόριθμο με μνήμη ο ενεργοποιητής του δικτύου επισκέπτεται πρώτα τις συστάδες στις οποίες στο παρελθόν εντόπισε τα περισσότερα περιστατικά.
- Αντιθέτως, στον δυναμικό αλγόριθμο MM3 ο ενεργοποιητής επιχειρεί να **προβλέψει** το πλήθος των περιστατικών που θα εντοπίσει αν επισκεφτεί μία συστάδα τη χρονική στιγμή t . Στη συνέχεια, επισκέπτεται πρώτα τις συστάδες με μεγάλες τιμές προβλεπόμενων περιστατικών $E_d^i(t)$.

Στιγμιότυπο εκτέλεσης

Ας δούμε ένα στιγμιότυπο εκτέλεσης του δυναμικού αλγορίθμου με μνήμη. Το αραιά συνδεδεμένο WSAW στο οποίο θα εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο, αποτελείται από τρεις συστάδες αισθητήρων (Συστάδα 1 έως Συστάδα 3) και έναν κινούμενο ενεργοποιητή. Για λόγους καλύτερης παρουσίασης, στις εικόνες που ακολουθούν, απεικονίζουμε μόνο τα Cluster Heads (CHs) των συστάδων των αισθητήρων παραλείποντας τους αντίστοιχους αισθητήρες.

Η αρχική εικόνα του δικτύου, φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 4.15: Αρχική εικόνα δικτύου.

Ξεκινώντας την εκτέλεση του αλγορίθμου, ο ενεργοποιητής του δικτύου επισκέπτεται αρχικά (τυχαία επιλογή) τη Συστάδα 3. Ας υποθέσουμε ότι στη Συστάδα 3, ανιχνεύει 3 περιστατικά, συνεπώς θέτει τη μεταβλητή $detected_events[Συστάδα\ 3]=3$. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον τύπο της ευκλείδειας απόστασης, επισκέπτεται τη Συστάδα 2 μιας και απέχει τη μικρότερη απόσταση από την τρέχουσα θέση του. Ας υποθέσουμε ότι στη Συστάδα 2 ανιχνεύει 5 περιστατικά, συνεπώς θέτει τη μεταβλητή $detected_events[Συστάδα\ 2]=5$. Η τελευταία Συστάδα προς επίσκεψη κατά το πρώτο σάρωμα είναι η Συστάδα 1. Ας υποθέσουμε ότι στη Συστάδα 1 ανιχνεύει 2 περιστατικά, συνεπώς θέτει τη μεταβλητή $detected_events[Συστάδα\ 1]=2$.

Ο ενεργοποιητής σάρωσε για πρώτη φορά τις συστάδες του δικτύου με βάση την ευκλείδεια απόσταση. Το μονοπάτι επίσκεψης που ακολουθήθηκε είναι: $P = \{Συστάδα\ 3, Συστάδα\ 2, Συστάδα\ 1\}$. Στη συνέχεια, ταξινομεί τις μεταβλητές $detected_events[clusterid]$ κατά φθίνουσα σειρά στη λίστα $Route[]$. Συνεπώς, η λίστα ισούται με: $Route = \{Συστάδα\ 2, Συστάδα\ 3, Συστάδα\ 1\}$.

Συνεπώς, στο 2^ο του σάρωμα, ο ενεργοποιητής ακολουθεί το μονοπάτι $P = \{Συστάδα\ 2, Συστάδα\ 3, Συστάδα\ 1\}$, επισκεπτόμενος πρώτα τη Συστάδα 2 που στο 1^ο πέρασμα παρουσίασε το μεγαλύτερο πλήθος καταγεγραμμένων περιστατικών. Η διαδικασία συνεχίζεται για όσο ο ενεργοποιητής διαθέτει αποθέματα ενέργειας.

4.4 Κινητικότητα στα WSNS

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε ένα μηχανισμό διαχείρισης της κινητικότητας ενός κινούμενου παρατηρητή (mobile observer) ο οποίος είναι κατάλληλος για **ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs)**. Ο μηχανισμός ονομάζεται SenCar: An Energy – Efficient Data Gathering Mechanism for Large – Scale Multihop Sensor Networks [12].

Το δίκτυο αισθητήρων, αποτελείται από στατικούς αισθητήρες οι οποίοι πραγματοποιούν μετρήσεις εντός του πεδίου παρατήρησης. Ένας κινούμενος παρατηρητής, ο οποίος μπορεί να είναι ένα ρομπότ (robot) με υψηλά αποθέματα ενέργειας και μεγάλη εμβέλεια μετάδοσης, σαρώνει περιοδικά όλο το δίκτυο αισθητήρων, συλλέγει τις μετρήσεις των αισθητήρων καθώς κινείται στο χώρο και τελικά τις αποθηκεύει στο κέντρο επεξεργασίας δεδομένων του δικτύου (data processing center) στο τέλος της περιήγησής του. Ο κινούμενος αυτός παρατηρητής ονομάζεται SenCar.

Όταν ο κινούμενος παρατηρητής πλησιάζει κοντά σε κάποιον αισθητήρα, τότε ο τελευταίος αποστέλλει απευθείας (1 hop) τις μετρήσεις του. Σε περίπτωση που κάποιος αισθητήρας, λόγω χαμηλής εμβέλειας μετάδοσης, δε μπορέσει να αποστείλει απευθείας στον κινούμενο παρατηρητή τις μετρήσεις του, τότε χρησιμοποιεί ενδιάμεση δρομολόγηση, αποστέλλοντας τα πακέτα του σε κάποιον ενδιάμεσο αισθητήρα.

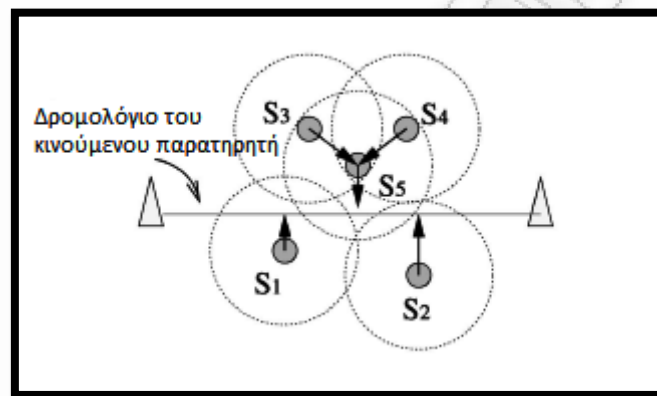
Το γεγονός αυτό, μπορεί να προκαλέσει τη γρήγορη εξασθένηση των ενδιάμεσων αισθητήρων – δρομολογητών, με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου ζωής του δικτύου (network lifetime).

Ο μηχανισμός SenCar, αποσκοπεί στην εξεύρεση ενός κατάλληλου δρομολογίου που πρέπει να ακολουθήσει ο κινούμενος παρατηρητής κατά την επίσκεψή του στους αισθητήρες του δικτύου, το οποίο θα μεγιστοποιεί τον χρόνο ζωής του δικτύου εξισορροπώντας την κίνηση που διέρχεται από τους αισθητήρες [12].

Ο εν λόγω μηχανισμός, θα μπορούσε κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί και στα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές. Ο κινούμενος παρατηρητής θα είναι ο **ενεργοποιητής** του δικτύου, ο οποίος θα περιφέρεται εντός του πεδίου παρατήρησης, θα συλλέγει δεδομένα από τους αισθητήρες και τελικά θα δρα επί των φαινομένων που παρατηρεί.

4.4.1 Αναλυτική παρουσίαση μηχανισμού SenCar

Όπως προαναφέραμε, το WSN αποτελείται από στατικούς αισθητήρες και έναν κινούμενο παρατηρητή (κινούμενος σταθμός βάσης). Ένα τέτοιο δίκτυο, με πέντε αισθητήρες και έναν κινούμενο παρατηρητή, ο οποίος αρχικά κινείται πάνω σε μία νοητή ευθεία γραμμή, παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί:

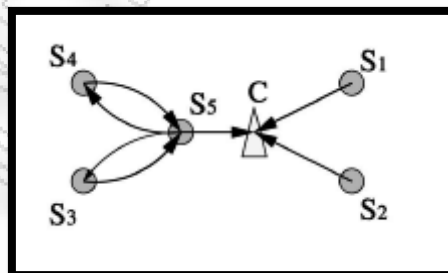


Εικόνα 4.16: Στιγμιότυπο δικτύου [12].

Το παραπάνω δίκτυο μοντελοποιείται ως ένας κατευθυνόμενος γράφος $G(S, c, A)$.

- S : Το σύνολο των αισθητήρων του δικτύου.
- c : Ο κινούμενος παρατηρητής του δικτύου.
- A : Το σύνολο των ακμών του γραφήματος.
 - Υπάρχει η ακμή (s_i, s_j) όταν ο κόμβος s_i μπορεί να στείλει δεδομένα κατευθείαν στον κόμβο s_j .
 - Υπάρχει η ακμή (s_i, c) όταν ο κόμβος s_i μπορεί να στείλει δεδομένα κατευθείαν στον κινούμενο παρατηρητή c σε κάποιο σημείο της διαδρομής του.

Ο κατευθυνόμενος γράφος G του δικτύου της εικόνας 4.16, παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



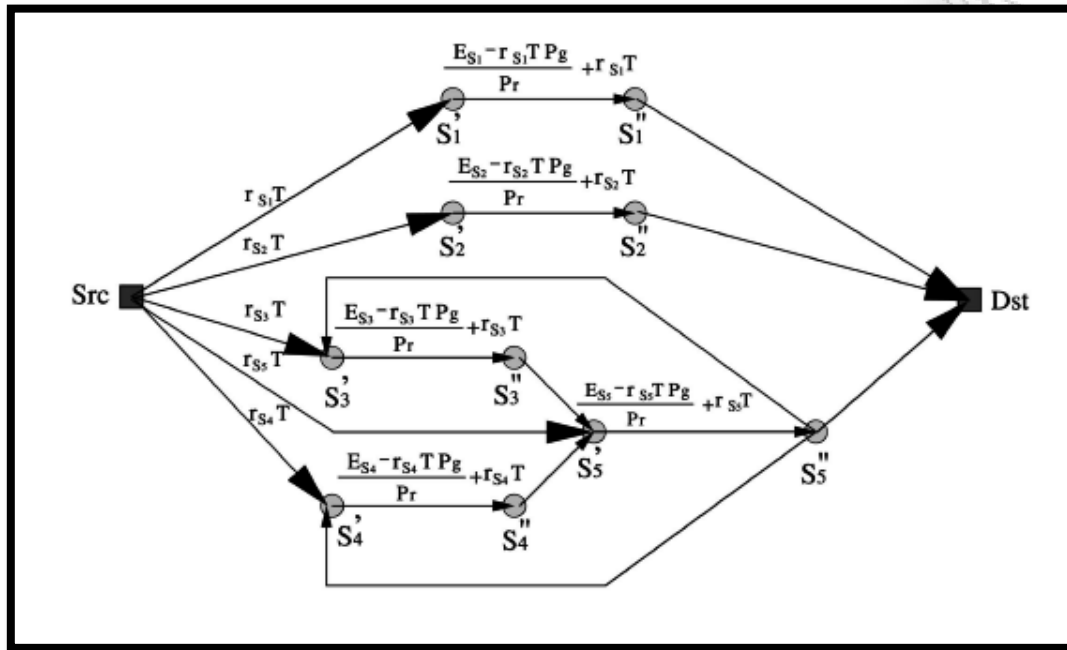
Εικόνα 4.17: Κατευθυνόμενος γράφος G [12].

Εύρεση μέγιστου χρόνου ζωής του δικτύου

Όπως αναφέραμε και στην αρχή της ενότητας 4.4, ορισμένοι αισθητήρες είναι επιφορτισμένοι να δρομολογούν τα πακέτα άλλων αισθητήρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη γρήγορη εξασθένηση αυτών των κόμβων. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου και την μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του δικτύου, πρέπει να γίνει μία εξισορρόπηση της κίνησης (load balancing) που διέρχεται από τους

αισθητήρες. Ο μηχανισμός SenCar, μοντελοποιεί το πρόβλημα της μεγιστοποίησης του χρόνου ζωής του δικτύου, σαν ένα πρόβλημα **ευρέσεως της μέγιστης ροής του δικτύου** (network flow problem) [12].

Αρχικά, κατασκευάζεται ο γράφος ροής του δικτύου (network flow graph). Για το δίκτυο της εικόνας 4.16, ο γράφος ροής φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 4.18: Γράφος ροής του δικτύου [12].

Στον παραπάνω γράφο, με

- E_{s_i} συμβολίζουμε την αρχική ενέργεια του κόμβου s_i .
- r_{s_i} συμβολίζουμε το ρυθμό παραγωγής δεδομένων στον κόμβο s_i .
- P_g συμβολίζουμε την ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή δεδομένων/bit.
- P_r συμβολίζουμε την ενέργεια που καταναλώνεται για την μετάδοση δεδομένων/bit.
- T συμβολίζουμε το μέγιστο χρόνο ζωής του δικτύου.
- Οι ακμές χωρίς αναγραφόμενη τιμή, έχουν άπειρη χωρητικότητα.

Η εύρεση του μέγιστου χρόνου ζωής του δικτύου, μοντελοποιείται σαν ένα πρόβλημα ευρέσεως της μέγιστης ροής του δικτύου, και επιλύεται μέσω του αλγορίθμου **Ford – Fulkerson** [12].

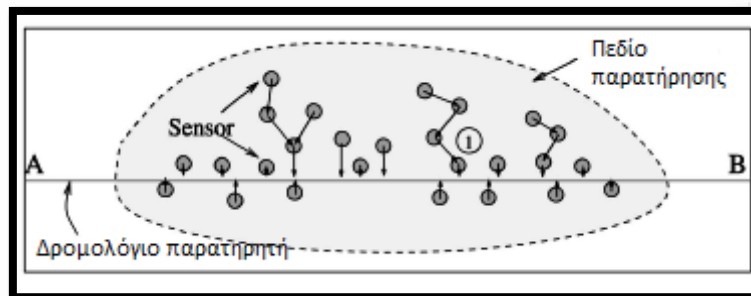
Ειδικότερα, στην εικόνα 4.18, με $(r_{s_i} T)$ συμβολίζουμε τη ροή που παράγεται από τον αισθητήρα s_i μέσα σε χρόνο T . Για την παραγωγή αυτής της ροής, ο αισθητήρας s_i δαπανά $(r_{s_i} T P_g)$ μονάδες ενέργειας. Η μέγιστη ροή που μπορεί να μεταδώσει ο αισθητήρας s_i μέσα σε χρονικό διάστημα T ισούται με $\frac{E_{s_i} - (r_{s_i} T P_g)}{P_r}$. Συνεπώς, μέσα σε χρονικό διάστημα T ο αισθητήρας s_i μπορεί συνολικά να παράγει και να μεταδώσει $\frac{E_{s_i} - (r_{s_i} T P_g)}{P_r} + r_{s_i} T$ μονάδες ροής. Όταν η μέγιστη ροή ισούται με $\sum_{s_i \in S} r_{s_i} T$, τότε η κίνηση που παράγεται στο δίκτυο μέσα σε χρονικό διάστημα T από τους αισθητήρες, λαμβάνεται εξολοκλήρου από τον κινούμενο παρατηρητή. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι όλοι οι αισθητήρες του δικτύου είναι **ζωντανοί** μέχρι το χρόνο T [12].

Στη συνέχεια, αυξάνουμε διαρκώς την τιμή του χρόνου T και τρέχουμε εκ νέου τον αλγόριθμο Ford – Fulkerson μέχρις ότου η μέγιστη ροή να γίνει μικρότερη από τη συνολικά παραγόμενη ροή $\sum_{s_i \in S} r_{s_i} T$, γεγονός που μαρτυρά ότι κάποιος αισθητήρας έχει πεθάνει νωρίτερα από χρόνο T . Τελικά, η τιμή T , όπως αυτή διαμορφώθηκε πριν το τελευταίο τρέξιμο του αλγορίθμου Ford – Fulkerson, αποτελεί το μέγιστο χρόνο ζωής του δικτύου [12].

Καθορισμός δρομολογίου κινούμενου παρατηρητή

Στο σημείο αυτό, θα παρουσιάσουμε την μεθοδολογία με την οποία ο μηχανισμός SenCar μεγιστοποιεί το χρόνο ζωής του δικτύου μέσω του καθορισμού κατάλληλου δρομολογίου για τον κινούμενο παρατηρητή.

Αρχικά, το δρομολόγιο που ακολουθεί ο κινούμενος παρατηρητής είναι μία τυχαία ευθεία γραμμή η οποία διασχίζει κατά μήκος το πεδίο παρατήρησης του δικτύου. Η κατάσταση αυτή, απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



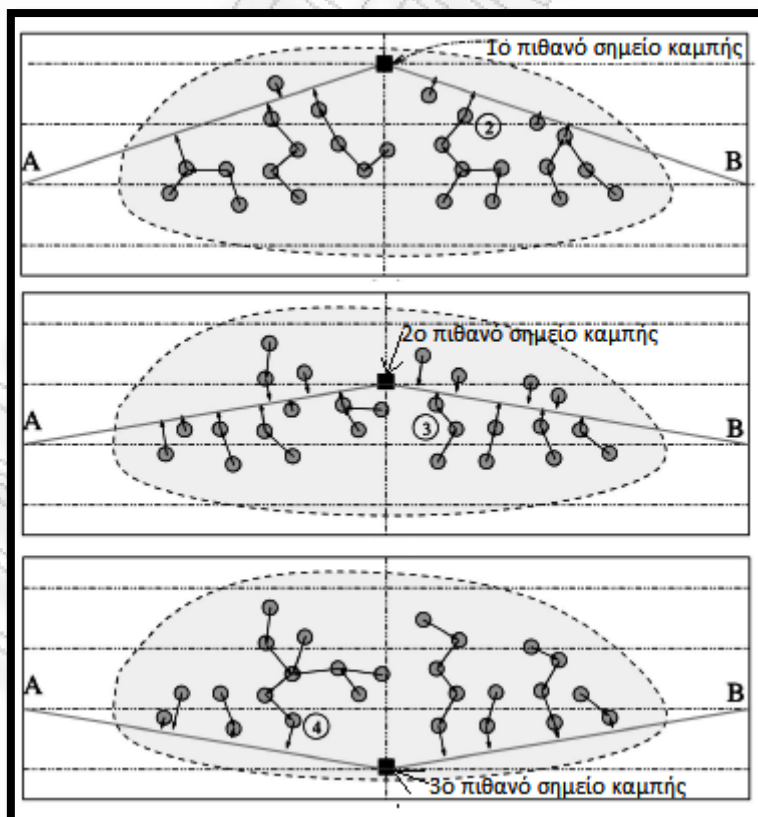
Εικόνα 4.19: Αρχικό δρομολόγιο παρατηρητή [12].

Το παραπάνω δρομολόγιο δεν εξασφαλίζει μέγιστη διάρκεια ζωής για τους αισθητήρες του δικτύου. Συνεπώς, ο μηχανισμός SenCar, επιχειρεί να τροποποιήσει την ευθεία διαδρομή που ακολουθεί ο παρατηρητής. Ειδικότερα, επιχειρείται η ευθεία να μετατραπεί σε μία διαδρομή αποτελούμενη από $t+1$ συνδεδεμένα ευθύγραμμα τμήματα μεταξύ του σημείου A και B. Ουσιαστικά, ο κινούμενος παρατηρητής πρέπει να **στρίψει** t φορές προτού φτάσει στο τελικό σημείο B της διαδρομής του.

Για την εύρεση των t σημείων καμπής, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

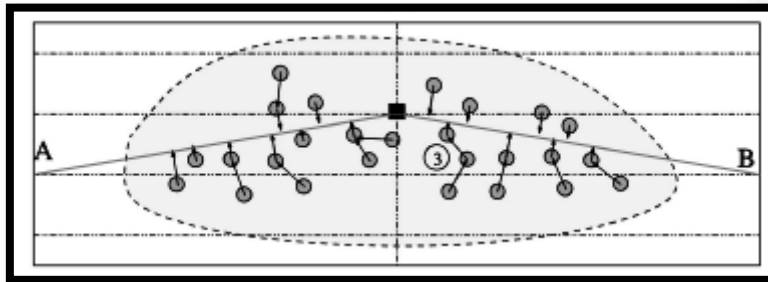
1. Το πρώτο σημείο καμπής θα τοποθετηθεί πάνω στη μεσοκάθετο του ευθύγραμμου τμήματος AB.
2. Δοκιμάζονται διάφορες πιθανές θέσεις πάνω στη μεσοκάθετο.
3. Σε κάθε πιθανή θέση, υπολογίζεται ο μέγιστος χρόνος ζωής του δικτύου με εφαρμογή του αλγορίθμου Ford – Fulkerson που περιγράψαμε παραπάνω.
4. Η θέση που επιφέρει το μέγιστο χρόνο ζωής στο δίκτυο, αποτελεί το πρώτο σημείο καμπής.

Για το δίκτυο της εικόνας 4.19, τα τρία πιθανά σημεία καμπής φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί:



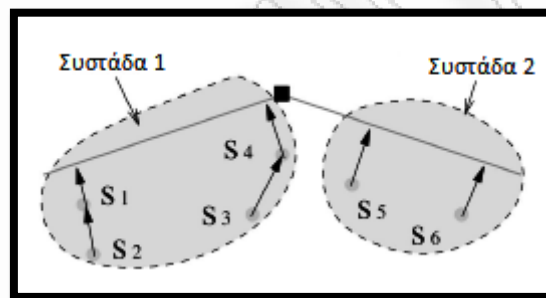
Εικόνα 4.20: Πιθανά σημεία καμπής [12].

Κατόπιν εφαρμογής του αλγορίθμου Ford – Fulkerson, προκύπτει ότι η πλέον συμφέρουσα επιλογή, η οποία μεγιστοποιεί τη διάρκεια ζωής του δικτύου, είναι η δεύτερη όπως αυτές απεικονίζονται στην παραπάνω εικόνα. Άρα, το αρχικό ευθύγραμμο τμήμα AB, σπάει σε δύο τμήματα, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



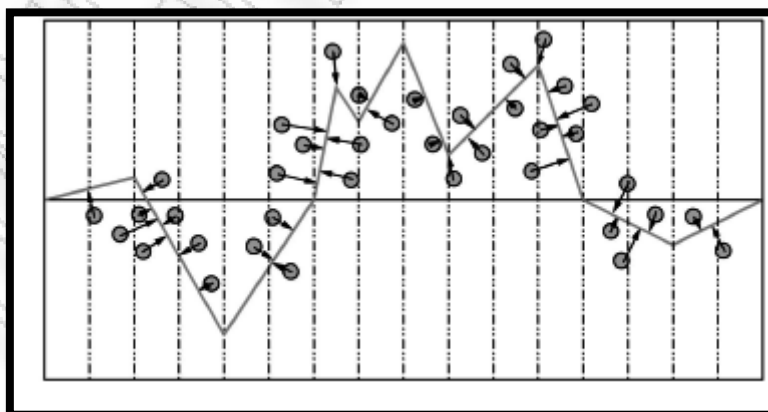
Εικόνα 4.21: Πρώτο σημείο καμψής [12].

Στη συνέχεια, οι αισθητήρες του δικτύου οργανώνονται σε δύο συστάδες, ανάλογα σε ποιό από τα δύο ευθύγραμμα τμήματα είναι πλησιέστερα. Οι αισθητήρες που βρίσκονται στη μία συστάδα στέλνουν τα δεδομένα τους στον παρατηρητή προτού αυτός στρίψει, ενώ οι αισθητήρες της άλλης ομάδας τα στέλνουν αφότου ο παρατηρητής στρίψει. Για τη δημιουργία των συστάδων των αισθητήρων, με κριτήριο την απόστασή τους από τα δύο παραπάνω ευθύγραμμα τμήματα, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος **Dijkstra** [12]. Αμέσως μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Dijkstra στο δίκτυο της εικόνας 4.21, δημιουργούνται οι παρακάτω δύο συστάδες αισθητήρων:



Εικόνα 4.22: Συσταδοποίηση αισθητήρων [12].

Η μεθοδολογία αυτής της ενότητας εφαρμόζεται αναδρομικά σε κάθε ένα από τα δύο εικονιζόμενα ευθύγραμμα τμήματα. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται μέχρις ότου υπολογιστούν τα *t* επιθυμητά σημεία καμψής στη διαδρομή που θα ακολουθήσει ο παρατηρητής. Το τελικό εξαγόμενο δρομολόγιο του κινούμενου παρατηρητή, μετά την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας τρεις φορές, περιλαμβάνει 15 σημεία καμψής, και απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 4.23: Τελικό δρομολόγιο παρατηρητή [12].

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Κεφάλαιο 5. Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές, οι αισθητήρες του δικτύου, ανιχνεύουν τα διάφορα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στο πεδίο παρατήρησης, και στη συνέχεια αποστέλλουν τις μετρήσεις τους στους ενεργοποιητές. Οι ενεργοποιητές με τη σειρά τους, λαμβάνουν τα μηνύματα των αισθητήρων, επικοινωνούν μεταξύ τους για να συντονίσουν τη δράση τους και εν κατακλείδι δρουν επί των παρατηρημένων συμβάντων.

Η επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, πρέπει να υπόκειται σε μικρές χρονικές καθυστερήσεις (delays), να είναι συμφέρουσα από άποψη κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και αξιόπιστη. Όλες αυτές οι παράμετροι συνθέτουν τη πρόκληση του **συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών (sensor – actor coordination)**. Η εν λόγω πρόκληση, εντάσσεται στην κατηγορία «**Συντονισμός**» του επιπέδου δικτύου της TCP/IP στοίβας πρωτοκόλλων (βλ. ενότητα 2.3.3), και θα αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου.

Ειδικότερα, καταβάλλεται προσπάθεια να παρουσιασθούν με σαφή και κατανοητό τρόπο τα σημαντικότερα **πρωτόκολλα** αυτής της κατηγορίας. Πιο συγκεκριμένα, στις ενότητες που ακολουθούν, θα αναλυθούν πρωτόκολλα συντονισμού αισθητήρων – ενεργοποιητών ενός WSN, που έχουν ως στόχο την εξασφάλιση των παραπάνω παραμέτρων που αναφέραμε.

5.1 Διάφοροι ορισμοί

Ο **συντονισμός (coordination)** μεταξύ των κόμβων ενός WSN αποτελεί ίσως τη μεγαλύτερη πρόκληση που απασχολεί τους ερευνητές αυτής της κατηγορίας δικτύων. Όπως προαναφέραμε και στο 2^ο κεφάλαιο – ενότητα 2.3.3, ο συντονισμός σε ένα WSN εμφανίζεται με τις παρακάτω μορφές:

1. Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων (sensor – sensor coordination).
2. Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών (sensor – actor coordination).
3. Συντονισμός μεταξύ ενεργοποιητών (actor – actor coordination).

Στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, αναφέραμε τις βασικές προκλήσεις και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε μίας από τις παραπάνω μορφές συντονισμού σε ένα WSN. Σειρά έχει η παράθεση των μηχανισμών που επιτυγχάνουν το συντονισμό μεταξύ των κόμβων του WSN. Πιο συγκεκριμένα, το παρόν κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην παρουσίαση κατάλληλων **πρωτοκόλλων/μηχανισμών** που στοχεύουν στην επίλυση του προβλήματος του **συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών**.

Πριν όμως παρουσιάσουμε με λεπτομέρεια τα διάφορα πρωτόκολλα συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, κρίνεται απαραίτητη η παράθεση διάφορων ορισμών που θα διευκολύνουν τον αναγνώστη στην καλύτερη παρακολούθηση και κατανόηση του συγκεκριμένου κεφαλαίου.

5.1.1 Ορισμός συντονισμού μεταξύ αισθητήρων

Όπως προαναφέραμε και στο 2^ο κεφάλαιο – ενότητα 2.3.1, οι αισθητήρες ενός WSN συντονίζονται μεταξύ τους για τη δημιουργία ομάδων/συστάδων (clusters) αισθητήρων. Για τη συσταδοποίηση των αισθητήρων, χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι συσταδοποίησης (βλ. ενότητα 3.1.2) οι οποίοι ως επί το πλείστον εκτελούνται κατανεμημένα από όλους τους αισθητήρες του δικτύου.

Πέρα όμως από τη σύσταση των ομάδων αισθητήρων, οι αισθητήρες συντονίζονται μεταξύ τους για την εκλογή **αρχηγών (Cluster Heads)** σε κάθε ομάδα. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι, το ρόλο του αρχηγού σε μία συστάδα αισθητήρων μπορεί να τον διατελέσει είτε κάποιος αισθητήρας, ο οποίος θα αναλάβει το ρόλο της συλλογής δεδομένων από όλους τους αισθητήρες της συστάδας, είτε ένας ενεργοποιητής ο οποίος θα συλλέγει τα δεδομένα των αισθητήρων και εν συνεχεία θα δρα εντός της συστάδας του. Για την εκλογή αρχηγού, χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι εκλογών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, και εκτελούνται κατανεμημένα από όλους τους αισθητήρες κάθε συστάδας του δικτύου.

Η πρόκληση του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων δε θα μας απασχολήσει περαιτέρω στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στο ότι η εν λόγω πρόκληση επιλύεται με ήδη υπάρχοντες αλγορίθμους συσταδοποίησης και εκλογών που χρησιμοποιούνται στο χώρο της επιστήμης των υπολογιστών. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την πρόκληση του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων, ο αναγνώστης ενθαρρύνεται όπως ανατρέξει στην ενότητα 2.3.3.1 του 2^{ου} κεφαλαίου.

5.1.2 Ορισμός συντονισμού αισθητήρων – ενεργοποιητών

Αφού οι αισθητήρες εντοπίσουν τα διάφορα συμβάντα εντός του πεδίου παρατήρησης του WSN, στη συνέχεια αποστέλλουν τις μετρήσεις τους στους ενεργοποιητές του δικτύου. Η επικοινωνία αυτή μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών αποτελεί την πρόκληση του συντονισμού μεταξύ των δύο αυτών πλευρών (βλ. ενότητα 2.3.3.2). Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι η επικοινωνία αυτή μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, μπορεί να είναι είτε από σημείο σε σημείο (point to point – 1 hop), είτε να μεσολαβούν ενδιάμεσοι κόμβοι (αισθητήρες) μεταξύ του κόμβου αποστολής (αισθητήρας) και του κόμβου προορισμού (ενεργοποιητής).

Ένας ορισμός ο οποίος περιγράφει με συνοπτικό τρόπο την πρόκληση του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, είναι ο παρακάτω:

“Ο συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών ενός WSN, αποτελεί τη διαδικασία εύρεσης μονοπατιών μετάδοσης δεδομένων (data paths) μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών” [5].

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, ο συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών δεν είναι τίποτα άλλο παρά μόνο η κατάλληλη επιλογή ενεργοποιητών στους οποίους θα αποστείλουν τις μετρήσεις τους οι αισθητήρες του δικτύου. Ουσιαστικά, η πρόκληση του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών ταυτίζεται με την **δρομολόγηση (routing)** των δεδομένων από τους αισθητήρες που ανιχνεύουν τα διάφορα συμβάντα στο δίκτυο, προς τους ενεργοποιητές. Λέγοντας

κατάλληλη επιλογή ενεργοποιητών, εννοούμε ότι η επικοινωνία μεταξύ του αισθητήρα και του επιλεγμένου ενεργοποιητή θα πρέπει να πληροί τα παρακάτω βασικά κριτήρια:

1. Αρχικά, η επικοινωνία του αισθητήρα με τον ενεργοποιητή θα πρέπει να είναι συμφέρουσα από άποψη **κατανάλωσης ενέργειας**. Με άλλα λόγια, το **μονοπάτι (path)** που ακολουθούν τα δεδομένα μεταξύ αισθητήρα και ενεργοποιητή, θα πρέπει να εξασφαλίζει όσο το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση ενέργεια.
2. Τα συμβάντα που εντοπίζει ένας αισθητήρας του δικτύου, θα πρέπει να λαμβάνονται από τον κατάλληλο ενεργοποιητή εντός αποδεκτού χρονικού διαστήματος. Ουσιαστικά, η επικοινωνία αισθητήρα – ενεργοποιητή θα πρέπει να υπόκειται σε μικρές **χρονικές καθυστερήσεις (delays)**. Δηλαδή, η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση (end to end delay) στο μονοπάτι μεταξύ αισθητήρα και ενεργοποιητή, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, τα συλλεγόμενα δεδομένα των αισθητήρων θα φτάνουν στους ενεργοποιητές του δικτύου εγκαίρως, γεγονός που αυξάνει την **αξιοπιστία** του WSN, μιας και οι τελευταίοι θα έχουν τη δυνατότητα άμεσης και αποτελεσματικής επέμβασης επί των παρατηρημένων φαινομένων.

Τα παραπάνω βασικά κριτήρια κατά τον συντονισμό αισθητήρων – ενεργοποιητών, εξασφαλίζονται από διάφορα πρωτόκολλα που παρατίθενται στη βιβλιογραφία. Από την επόμενη ενότητα, επιχειρείται η παρουσίαση των πρωτοκόλλων επίτευξης συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, μέσα από την παράθεση των αντίστοιχων αλγορίθμων.

5.2 Το πρωτόκολλο DEPR

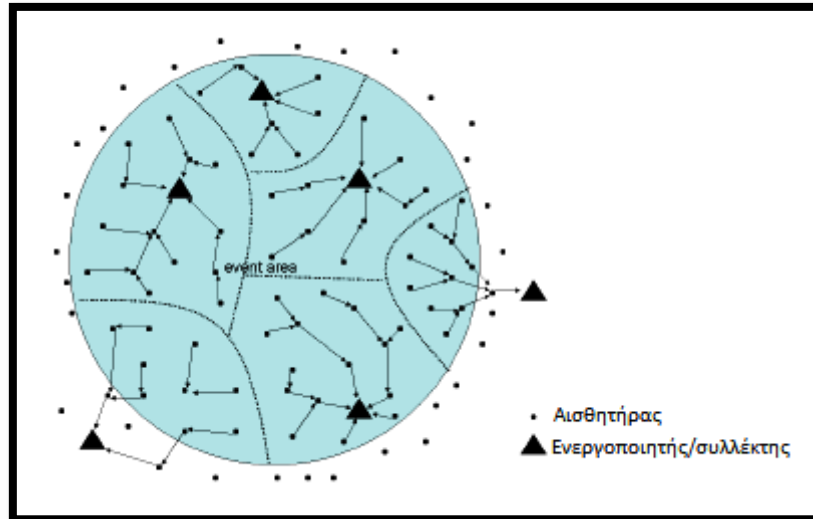
Θα ξεκινήσουμε την παράθεση των πρωτοκόλλων που εξασφαλίζουν το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, παρουσιάζοντας αρχικά την εργασία με τίτλο **“Communication and Coordination in Wireless Sensor and Actor Networks”** [13].

Στην εν λόγω εργασία, επιχειρείται η εξασφάλιση του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, μέσω της στρατηγικής της **τμηματοποίησης του πεδίου παρατήρησης καθοδηγούμενης από τα περιστατικά (event – driven partitioning)**. Πιο συγκεκριμένα, η ένταξη των αισθητήρων του WSN σε ομάδες (clusters), γίνεται με βάση τη θέση εμφάνισης των περιστατικών (events). Μόνο οι αισθητήρες που βρίσκονται εντός της περιοχής εμφάνισης περιστατικών (event area) εντάσσονται σε ομάδες. Αυτή η κατανεμημένη τμηματοποίηση του πεδίου παρατήρησης, ενεργοποιείται **δυναμικά** κάθε φορά που παρατηρείται ένα περιστατικό εντός του πεδίου παρατήρησης του WSN [13].

Κάθε μία ομάδα αισθητήρων, διαθέτει ένα ξεχωριστό **δένδρο μετάδοσης ή συνάθροισης δεδομένων (data – delivery/aggregation tree)**. Όπως η δημιουργία συστάδων αισθητήρων λαμβάνει χώρα δυναμικά ανάλογα με την εμφάνιση των περιστατικών, έτσι ακριβώς συμβαίνει και με την κατασκευή των αντίστοιχων δένδρων δεδομένων (στο εξής τα δένδρα μετάδοσης/συνάθροισης δεδομένων θα αναφέρονται ως δένδρα δεδομένων για λόγους συντομίας). Κάθε δένδρο δεδομένων διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τα φύλλα του δένδρου δεδομένων αποτελούνται από **αισθητήρες** (αισθητήρες πηγές – source sensors) που ανιχνεύουν τα περιστατικά εντός της συγκεκριμένης συστάδας [13].
- Οι ενδιάμεσοι κόμβοι του δένδρου δεδομένων είναι επίσης αισθητήρες που ανιχνεύουν τα περιστατικά εντός της συγκεκριμένης συστάδας (οι υπόλοιποι αισθητήρες της ομάδας πλην των φύλλων του δένδρου) [13].
- Η ρίζα του δένδρου δεδομένων είναι ο **ενεργοποιητής** (ενεργοποιητής συλλέκτης - collector) στον οποίο αποστέλλουν τις μετρήσεις τους **όλοι** οι αισθητήρες της συστάδας [13].
- Κάθε αισθητήρας που βρίσκεται εντός της περιοχής εμφάνισης περιστατικών του WSN (αισθητήρας πηγή – source sensor) ανήκει σε **ένα** δένδρο δεδομένων, και κάθε δένδρο δεδομένων έχει ένα ξεχωριστό ενεργοποιητή ως κόμβο ρίζα [13].
- Η διαδρομή από ένα φύλλο (αισθητήρα) του δένδρου μέχρι τη ρίζα, αναπαριστά τη ροή (flow) που ακολουθούν τα δεδομένα από τον εν λόγω αισθητήρα, τους ενδιάμεσους κόμβους δρομολόγησης (αισθητήρες), μέχρι τον τελικό αποδέκτη ο οποίος είναι ο ενεργοποιητής της ομάδας (ρίζα του δένδρου δεδομένων). Με άλλα λόγια, το μονοπάτι από ένα φύλλο του δένδρου μέχρι τη ρίζα, αναπαριστά τη διαδρομή (path) που ακολουθούν τα δεδομένα ενός αισθητήρα πηγή προς τον αντίστοιχο ενεργοποιητή συλλέκτη. Συνεπώς, τα δένδρα δεδομένων δεν είναι τίποτα άλλο παρά οι διαδρομές που ακολουθούν τα δεδομένα (data paths) από τους αισθητήρες προς τους ενεργοποιητές.

Η στρατηγική της τμηματοποίησης του πεδίου παρατήρησης καθοδηγούμενης από τα περιστατικά (event – driven partitioning), απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 5.1: Event-driven partitioning με πολλαπλούς ενεργοποιητές [13].

Στην παραπάνω εικόνα, απεικονίζεται ένα WSN το οποίο είναι χωρισμένο σε έξι ομάδες αισθητήρων. Σε κάθε μία από τις έξι ομάδες, αντιστοιχεί και από ένα δένδρο δεδομένων (data - tree), του οποίου η ρίζα είναι ο αντίστοιχος ενεργοποιητής – συλλέκτης στον οποίο στέλνουν τις μετρήσεις τους οι αισθητήρες της ομάδας. Τόσο οι ομάδες αισθητήρων όσο και τα αντίστοιχα δένδρα δεδομένων, δημιουργούνται δυναμικά με βάση την εμφάνιση περιστατικών στο πεδίο παρατήρησης του WSN.

Η προαναφερθείσα στρατηγική της τμηματοποίησης του πεδίου παρατήρησης καθοδηγούμενης από τα περιστατικά (event – driven partitioning with multiple actors), αποτελεί τη προτεινόμενη λύση στο πρόβλημα του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών σε WSN, σύμφωνα με την εργασία [13]. Η **βέλτιστη (optimal)** αυτή λύση στην πρόκληση του συντονισμού αισθητήρων – ενεργοποιητών μοντελοποιείται ως ένα **γραμμικό πρόγραμμα με ακέραιες μεταβλητές (Integer Linear Program - ILP)** [13]. Ουσιαστικά, οι στόχοι του ILP είναι οι παρακάτω [13]:

1. Επιλογή του βέλτιστου υποσυνόλου ενεργοποιητών, στο οποίο θα αποστέλλουν τα δεδομένα τους οι αισθητήρες που βρίσκονται στην περιοχή εμφάνισης περιστατικών (event area).
2. Κατασκευή των δένδρων δεδομένων (data – delivery/aggregation trees) μεταξύ των αισθητήρων που βρίσκονται στην περιοχή εμφάνισης περιστατικών και των αντίστοιχων ενεργοποιητών. Τα δένδρα δεδομένων, πρέπει να εξασφαλίζουν την **ελάχιστη** δυνατή κατανάλωση ενέργειας κατά τη μετάδοση ενός περιστατικού, από έναν αισθητήρα – φύλλο του δένδρου, προς τον ενεργοποιητή – ρίζα του δένδρου. Επιπρόσθετα, οι μεταδόσεις περιστατικών πρέπει να είναι **αξιόπιστες**, γεγονός που σημαίνει ότι τα δεδομένα πρέπει να φτάνουν στους ενεργοποιητές εντός αποδεκτών χρονικών ορίων. Η έννοια της αξιοπιστίας των περιστατικών αναλύεται εκτενώς στην ενότητα που ακολουθεί.

Αποδεικνύεται όμως, πως το εν λόγω γραμμικό πρόγραμμα είναι NP – complete [13]. Συνεπώς, οι συγγραφείς της εργασίας, προτείνουν ένα καταναμημένο υπό βέλτιστο (suboptimal) πρωτόκολλο, το οποίο προσεγγίζει τη βέλτιστη λύση στο πρόβλημα του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών. Το εν λόγω πρωτόκολλο ονομάζεται **DEPR (Distributed Event – driven Partitioning and Routing protocol)** [13] και παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

5.2.1 Αναλυτική παρουσίαση πρωτοκόλλου DEPR

Πριν ξεκινήσουμε την παρουσίαση του πρωτοκόλλου DEPR, κρίνεται σκόπιμη η παράθεση των παρακάτω ορισμών, οι οποίοι θα φανούν χρήσιμοι στη συνέχεια.

Ορισμός 1: Το χρονικό όριο B, είναι το μέγιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο ένα περιστατικό που ανιχνεύεται από κάποιον αισθητήρα πρέπει να παραληφθεί από τον ανάλογο ενεργοποιητή του WSN [13].

Ορισμός 2: Ένα πακέτο δεδομένων που λαμβάνεται από τον ενεργοποιητή πέραν του χρονικού ορίου B, θεωρείται ότι έχει **λήξει (expired)** και ότι είναι **αναξιόπιστο (unreliable)**. Σε διαφορετική περίπτωση, το πακέτο είναι **αξιόπιστο (reliable)** [13].

Ορισμός 3: Η αξιοπιστία r ενός περιστατικού (event reliability r), είναι ο λόγος των αξιοπίστων πακέτων δεδομένων προς το συνολικό πλήθος πακέτων που παράγονται εντός ενός χρονικού διαστήματος απόφασης (decision interval). Το κατώφλι αξιοπιστίας r_{th} ενός περιστατικού (event reliability threshold r_{th}) είναι η ελάχιστη απαιτούμενη αξιοπιστία που πρέπει να ικανοποιεί το εκάστοτε περιστατικό, όπως ακριβώς ορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή του WSN [13].

Ορισμός 4: Ως έλλειψη αξιοπιστίας (lack of reliability) ορίζουμε τη διαφορά ($r_{th}-r$) [13].

Στόχοι πρωτοκόλλου DEPR

Το καταναεμημένο πρωτόκολλο DEPR (Distributed Event – driven Partitioning and Routing protocol), αποσκοπεί στο να **προσεγγίσει** τη βέλτιστη λύση που εξασφαλίζει το ILP, στο πρόβλημα του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών σε ένα WSN. Ειδικότερα, το πρωτόκολλο DEPR, επιδιώκει να κατασκευάσει δένδρα δεδομένων μεταξύ των αισθητήρων που βρίσκονται εντός της περιοχής εμφάνισης περιστατικών (event area) και των ενεργοποιητών συλλεκτών (actor collectors), τα οποία θα εξασφαλίζουν τα εξής [13]:

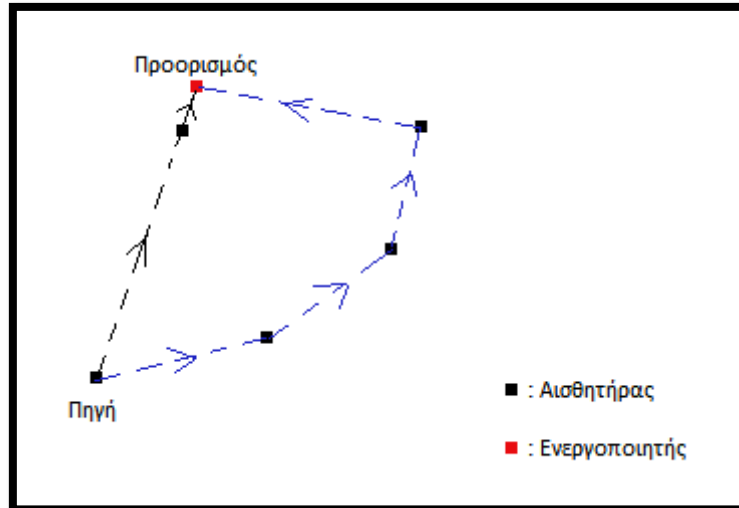
1. Η αξιοπιστία r του περιστατικού που θα λαμβάνεται από τους ενεργοποιητές συλλέκτες του δικτύου θα ικανοποιεί το κατώφλι αξιοπιστίας r_{th} ($r \geq r_{th}$).
2. Τα μονοπάτια μεταξύ των αισθητήρων και των ενεργοποιητών συλλεκτών (διαδρομές από τα φύλλα προς τις ρίζες των δένδρων δεδομένων) θα πρέπει να εξασφαλίζουν τη ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.

Εξασφάλιση στόχων DEPR

Για να εξασφαλίσει τους προαναφερθέντες στόχους, το πρωτόκολλο DEPR βασίζεται στην τεχνική της **μετάβασης καταστάσεων (state transition)**. Πιο συγκεκριμένα, κάθε αισθητήρας που βρίσκεται εντός της περιοχής εμφάνισης περιστατικών, μεταπηδά μεταξύ τεσσάρων καταστάσεων [13]:

1. **Κατάσταση αδράνειας (idle state)**. Πρόκειται για την αρχική κατάσταση ενός αισθητήρα, στην οποία παρατηρεί (sensing) το περιβάλλον για τον εντοπισμό τυχόν συμβάντων, ενώ παράλληλα αναμένει για πακέτα δεδομένων από γειτονικούς αισθητήρες.
2. **Κατάσταση εκκίνησης (start – up state)**. Ο αισθητήρας εισέρχεται στην εν λόγω κατάσταση όταν έχει εντοπίσει κάποιο συμβάν ή έχει λάβει μήνυμα από γειτονικό αισθητήρα.
3. **Κατάσταση επιτάχυνσης (speed – up state)**. Ο αισθητήρας εισέρχεται στην εν λόγω κατάσταση όταν η αξιοπιστία r των περιστατικών είναι κάτω από το κατώφλι αξιοπιστίας r_{th} . Με άλλα λόγια, τα παρατηρημένα συμβάντα φτάνουν στους ενεργοποιητές με αρκετά μεγάλη χρονική καθυστέρηση (delay). Τότε, απαιτείται τα περιστατικά να φτάνουν στους ενεργοποιητές πιο γρήγορα. Για να γίνει κάτι τέτοιο, θα πρέπει οι αισθητήρες να δρομολογούν τα πακέτα τους μέσα από συντομότερα μονοπάτια (reducing the number of hops), τα οποία όμως οδηγούν σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας.
4. **Κατάσταση συνάθροισης (aggregation state)**. Ο αισθητήρας εισέρχεται στην εν λόγω κατάσταση όταν η αξιοπιστία r των περιστατικών είναι αρκετά πάνω από το κατώφλι αξιοπιστίας r_{th} . Τότε, τα παρατηρημένα συμβάντα φτάνουν στους ενεργοποιητές με αρκετά μικρή χρονική καθυστέρηση (delay), γεγονός που επιτρέπει στους ενεργοποιητές να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, δρομολογώντας τα πακέτα τους από μονοπάτια πολλών ενδιάμεσων κόμβων (paths with multiple hops).

Η κατάσταση επιτάχυνσης ουσιαστικά μειώνει την χρονική καθυστέρηση κατά την επικοινωνία αισθητήρα – ενεργοποιητή, αλλά οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Η κατάσταση συνάθροισης επιφέρει ακριβώς την αντίστροφη κατάσταση. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τις δύο καταστάσεις, παρουσιάζουμε παρακάτω μία εικόνα, στην οποία ένας αισθητήρας πηγή έχει δύο εναλλακτικές διαδρομές για να αποστείλει τα δεδομένα του προς τον ενεργοποιητή συλλέκτη. Η διαδρομή με το μαύρο χρώμα, επιλέγεται από τον αισθητήρα στην κατάσταση επιτάχυνσης, επειδή περιέχει μόνο έναν ενδιάμεσο δρομολογητή προτού τα δεδομένα φτάσουν στον τελικό ενεργοποιητή συλλέκτη, γεγονός που εξασφαλίζει χαμηλή χρονική καθυστέρηση. Όμως, επειδή η απόσταση της πηγής και του ενδιάμεσου δρομολογητή είναι αρκετά μεγάλη, η εν λόγω διαδρομή οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας (ο αισθητήρας ουσιαστικά αποστέλλει τα δεδομένα του αυξάνοντας κατά πολύ την ισχύ αποστολής). Αντιθέτως, η διαδρομή με το μπλε χρώμα, επιλέγεται από τον αισθητήρα στην κατάσταση συνάθροισης, μιας και εξασφαλίζει χαμηλή συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια. Όμως, επειδή η εν λόγω διαδρομή περιέχει αρκετούς ενδιάμεσους κόμβους δρομολόγησης, έχουμε αύξηση της συνολικής καθυστέρησης μεταξύ πηγής και προορισμού. Κάτι τέτοιο συμβαίνει όταν ο αισθητήρας εισέρχεται στην κατάσταση συνάθροισης. Η εικόνα που μόλις αναλύσαμε παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω:



Εικόνα 5.2: Εναλλακτικές διαδρομές αποστολής δεδομένων.

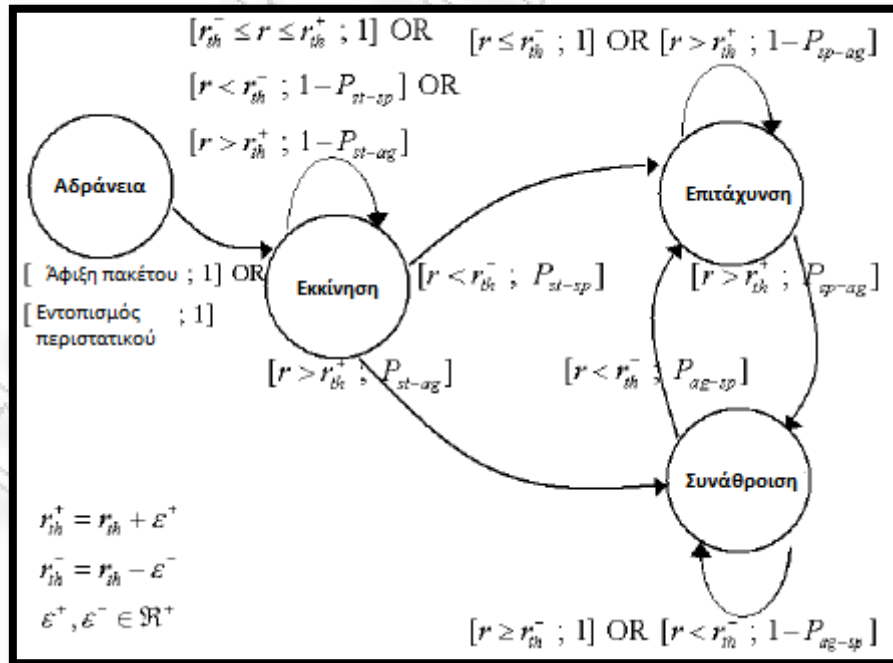
Ας δούμε όμως αναλυτικά, τις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένας αισθητήρας του WSN.

Ανάλυση καταστάσεων

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι στα πλαίσια του πρωτοκόλλου DEPR, ισχύουν οι παρακάτω συμβάσεις [13]:

1. Κάθε αισθητήρας του WSN, είναι γνώστης της θέσης του μέσα στο πεδίο παρατήρησης.
2. Κάθε αισθητήρας του WSN είναι γνώστης των θέσεων όλων των γειτονικών του αισθητήρων καθώς και των ενεργοποιητών.
3. Οι ενεργοποιητές του WSN, παραμένουν **ακίνητοι (immobile)** στο χώρο, και δρουν εντός των ορίων που καθορίζει η εμβέλεια μετάδοσής τους (action range).

Όπως προαναφέραμε, το καταναμημένο πρωτόκολλο DEPR στηρίζεται στην τεχνική της μετάβασης καταστάσεων. Οι αισθητήρες του δικτύου, μεταπηδούν μεταξύ των καταστάσεων, όπως ακριβώς παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα μεταβάσεων (transition diagram).



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα μεταβάσεων αισθητήρα [13].

Αρχικά, ο αισθητήρας i (και κάθε αισθητήρας του δικτύου) ξεκινά από την κατάσταση **αδράνειας**. Μόλις ανιχνεύσει κάποιο περιστατικό ή λάβει κάποιο πακέτο δεδομένων από γειτονικό αισθητήρα, τότε μεταβαίνει στην κατάσταση **εκκίνησης**.

Ο αισθητήρας i στην κατάσταση **εκκίνησης**, ουσιαστικά πρέπει να αποφασίσει σε ποιόν κόμβο (αισθητήρα j) θα μεταδώσει το πακέτο δεδομένων που είτε ανίχνευσε (ως αισθητήρας πηγή) είτε έλαβε (ως αισθητήρας αναμεταδότης) από γειτονικό αισθητήρα στην κατάσταση αδράνειας. Για την επιλογή αυτή, ο αισθητήρας i εκτελεί έναν κατάλληλο αλγόριθμο, ο ψευδοκώδικας του οποίου παρουσιάζεται παρακάτω [13]:

Αλγόριθμος κατάστασης εκκίνησης

1. $mincost = \infty$
2. **if** ((είμαι αισθητήρας πηγή) **or** (είμαι αισθητήρας αναμεταδότης)) **then**
3. **for** κάθε γείτονα μου u_j **do**
4. **for** κάθε ενεργοποιητή S_k **do**
5. **if** $(2E_{elec} + \beta d_{ij}^\alpha + 2E_{elec} + \beta d_{jS_k}^\alpha) < mincost$
6. $mincost = 2E_{elec} + \beta d_{ij}^\alpha + 2E_{elec} + \beta d_{jS_k}^\alpha$
7. $nexthop = u_j$
8. **end if**
9. **end for**
10. **end for**
11. **end if**
12. Ενημέρωσε τον αισθητήρα $nexthop$ ότι είναι αισθητήρας αναμεταδότης

Σύμφωνα με τον παραπάνω αλγόριθμο, ο αισθητήρας i επιλέγει να αποστείλει τα δεδομένα του σε εκείνον τον αισθητήρα j , έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το **άθροισμα** της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά την αποστολή των δεδομένων από τον αισθητήρα i στον αισθητήρα j (Καταναλισκόμενη ενέργεια: $2E_{elec} + \beta d_{ij}^\alpha$) και από τον αισθητήρα j προς τον **κοντινότερο** σε αυτόν ενεργοποιητή S_k (Καταναλισκόμενη ενέργεια: $2E_{elec} + \beta d_{jS_k}^\alpha$). Ο αισθητήρας j , παραλαμβάνει τα δεδομένα του αισθητήρα i , και αναλαμβάνει το ρόλο του αναμεταδότη (ενδιάμεσος δρομολογητής).

Εκτελώντας οι αισθητήρες του δικτύου τον παραπάνω αλγόριθμο επαναληπτικά, κατασκευάζονται τα μονοπάτια μεταξύ πηγών (αισθητήρων) και προορισμών (ενεργοποιητών). Τα εν λόγω μονοπάτια, εξασφαλίζουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρές χρονικές καθυστερήσεις [13]. Ουσιαστικά, ο παραπάνω αλγόριθμος, κατασκευάζει τα **δένδρα δεδομένων** που αναφέραμε στην ενότητα 5.2, τα οποία δεν είναι τίποτα άλλο παρά μόνο τα μονοπάτια που ακολουθούν τα δεδομένα από τις πηγές (αισθητήρες - φύλλα των δένδρων) προς τον προορισμό (ενεργοποιητής συλλέκτης - ρίζα του δένδρου). Όλοι οι αισθητήρες ενός δένδρου δεδομένων, αποστέλλουν τα δεδομένα τους στον ίδιο ενεργοποιητή συλλέκτη - ρίζα του δένδρου.

Σε κάθε χρονικό διάστημα απόφασης (decision interval), κάθε ενεργοποιητής συλλέκτης, υπολογίζει την αξιοπιστία r του περιστατικού που λαμβάνει (λόγος αξιόπιστων πακέτων που λαμβάνει προς το συνολικό πλήθος δεδομένων που παράγονται εντός του χρονικού διαστήματος απόφασης) και περιοδικά αποστέλλει την εν λόγω τιμή προς τους αισθητήρες που ανήκουν στο δένδρο δεδομένων του. Αντίστοιχα, οι αισθητήρες του δένδρου, μεταπηδούν σε επόμενη κατάσταση με βάση την τιμή της αξιοπιστίας r που λαμβάνουν από τον αντίστοιχο ενεργοποιητή τους.

Αν η λαμβανόμενη τιμή της αξιοπιστίας r του περιστατικού είναι κάτω από το λεγόμενο χαμηλό κατώφλι αξιοπιστίας r_{th}^- (όπου $r_{th}^- = r_{th} - \varepsilon^-$, με ε^- μία θετική σταθερά), δηλαδή $r < r_{th}^-$ τότε, υπάρχει ανάγκη για μείωση της συνολικής χρονικής καθυστέρησης κατά την επικοινωνία αισθητήρα - ενεργοποιητή. Συνεπώς, ο αισθητήρας εισέρχεται στην κατάσταση **επιτάχυνσης** με πιθανότητα P_{st-sp} . Η κατάσταση αυτή, φαίνεται στην εικόνα 5.3, με την μετάβαση από την κατάσταση εκκίνησης στην κατάσταση επιτάχυνσης. Αντίστοιχα, αν η λαμβανόμενη τιμή της αξιοπιστίας r του περιστατικού είναι πάνω από το λεγόμενο υψηλό κατώφλι αξιοπιστίας r_{th}^+ (όπου $r_{th}^+ = r_{th} + \varepsilon^+$, με ε^+ μία θετική σταθερά), δηλαδή $r > r_{th}^+$ τότε, υπάρχει δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας κατά την επικοινωνία αισθητήρα -

ενεργοποιητή. Συνεπώς, ο αισθητήρας εισέρχεται στην κατάσταση **συνάθροισης** με πιθανότητα P_{st-ag} . Η κατάσταση αυτή, φαίνεται στην εικόνα 5.3, με την μετάβαση από την κατάσταση εκκίνησης στην κατάσταση συνάθροισης. Τέλος, αν ο αισθητήρας δε λάβει μήνυμα με την τιμή της αξιοπιστίας r από τον αντίστοιχο ενεργοποιητή στα πλαίσια του χρονικού διαστήματος απόφασης, τότε υποθέτει ότι $r_{th}^- \leq r \leq r_{th}^+$, και παραμένει στην κατάσταση εκκίνησης. Η κατάσταση αυτή, φαίνεται στην εικόνα 5.3, με την μετάβαση από την κατάσταση εκκίνησης πάλι στην ίδια κατάσταση.

Ο αντικειμενικός στόχος της κατάστασης **επιτάχυνσης** είναι η ελαχιστοποίηση των ενδιάμεσων κόμβων δρομολόγησης / αναμετάδοσης (hops) μεταξύ του αισθητήρα πηγή και του ενεργοποιητή συλλέκτη σε ένα δένδρο δεδομένων [13]. Το καταναεμημένο πρωτόκολλο DEPR, επιτυγχάνει τον παραπάνω στόχο μέσω της εφαρμογής του **άπληστου σχήματος δρομολόγησης (Greedy Routing Scheme – GRS)**. Σύμφωνα με αυτό το σχήμα δρομολόγησης, ο κόμβος αποστολής στέλνει τα δεδομένα του σε εκείνο τον κόμβο που βρίσκεται όσο το δυνατόν **πλησιέστερα** στον κόμβο προορισμού και φυσικά είναι εντός της εμβέλειας μετάδοσής του (transmission range) [13]. Ουσιαστικά, το εν λόγω σχήμα δρομολόγησης, εξασφαλίζει τα παρακάτω [13]:

1. Ελαχιστοποιεί τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων δρομολόγησης (hops) μεταξύ αισθητήρα και ενεργοποιητή.
2. Ελαχιστοποιεί την συνολική απόσταση που διανύει το πακέτο από την πηγή προς τον προορισμό.
3. Ελαχιστοποιεί το πλήθος των μεταδόσεων του ίδιου πακέτου, μιας και όπως αναφέραμε και παραπάνω, ελαχιστοποιούνται οι ενδιάμεσοι δρομολογητές / αναμεταδότες.

Ανατρέχοντας στην εικόνα 5.2, η διαδρομή με το μαύρο χρώμα, επιλέγεται από τον αισθητήρα στην κατάσταση επιτάχυνσης, η οποία εξασφαλίζει τις παραπάνω τρεις παραμέτρους. Ο αλγόριθμος που εκτελείται από τον αισθητήρα u_i (και από κάθε άλλο αισθητήρα του WSN) στην κατάσταση επιτάχυνσης, παρουσιάζεται παρακάτω [13]:

Αλγόριθμος κατάστασης επιτάχυνσης

1. **for** κάθε κόμβο $u_j \in P_i$ **do**
2. **if** (distance(u_i, u_j) > distance($u_i, next_hop$)) **then**
3. $next_hop = u_j$
4. **end if**
5. **end for**

Στον παραπάνω αλγόριθμο, με P_i συμβολίζουμε όλους τους γείτονες u_j του αισθητήρα u_i οι οποίοι έχουν τον ενεργοποιητή του δένδρου δεδομένων σε πιο κοντινή απόσταση σε σχέση με την απόσταση που χωρίζει τον αισθητήρα u_i από τον εν λόγω ενεργοποιητή. Με $next_hop$ συμβολίζουμε τον επόμενο αισθητήρα δρομολογητή / αναμεταδότη, όπως καθορίστηκε από τον αλγόριθμο κατάστασης εκκίνησης. Τελικά, επιλέγεται ως παραλήπτης του μηνύματος, ο αισθητήρας u_j ο οποίος βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον ενεργοποιητή συλλέκτη του δένδρου δεδομένων.

Ας δούμε τώρα αναλυτικά την κατάσταση **συνάθροισης**. Ο αντικειμενικός στόχος της εν λόγω κατάστασης είναι η μείωση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας κατά την επικοινωνία αισθητήρα ενεργοποιητή [13]. Συνεπώς, ο αισθητήρας u_i επιδιώκει να αποστείλει τα δεδομένα του στον **πλησιέστερο** γειτονικό του αισθητήρα u_{min} [13]. Στο σημείο αυτό, αξίζει να επισημάνουμε ότι, ο πλησιέστερος αισθητήρας u_{min} μπορεί να ανήκει στο ίδιο ή και σε διαφορετικό δένδρο δεδομένων με αυτό του αισθητήρα u_i . Συνεπώς, προκύπτουν οι παρακάτω δύο πιθανές περιπτώσεις [13]:

1. Εάν ο αισθητήρας u_{min} ανήκει στο ίδιο δένδρο δεδομένων με τον αισθητήρα u_i τότε επιλέγεται ως επόμενος δρομολογητής / αναμεταδότης από τον u_i , μόνο αν βρίσκεται πλησιέστερα προς τον ενεργοποιητή του δένδρου δεδομένων σε σχέση με τον u_i . Κατ' αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας κατά την επικοινωνία του u_i με τον u_{min} γεγονός που έχει αντίκτυπο στην συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια του δένδρου δεδομένων.
2. Εάν ο αισθητήρας u_{min} ανήκει σε διαφορετικό δένδρο δεδομένων σε σχέση με τον αισθητήρα u_i τότε επιλέγεται ως επόμενος δρομολογητής / αναμεταδότης από τον u_i , μόνο αν ο u_i είναι

κόμβος **φύλλο** στο δικό του δένδρο δεδομένων, ενώ παράλληλα ο αισθητήρας u_{min} βρίσκεται **πλησιέστερα** προς τον ενεργοποιητή του δικού του δένδρου δεδομένων σε σχέση με τον u_i . Οι δύο αυτές προϋποθέσεις εξασφαλίζουν ότι, το δένδρο δεδομένων που προκύπτει μετά την ένταξη του αισθητήρα u_i , διαθέτει μονοπάτια από τους αισθητήρες προς τον ενεργοποιητή, τα οποία δεν περιέχουν **βρόχους (loops)**. Κάτι τέτοιο, οφείλεται στο γεγονός ότι, κάθε κόμβος πατέρας του δένδρου βρίσκεται πιο κοντά στον ενεργοποιητή συλλέκτη εν συγκρίσει με τον κόμβο παιδί του. Αντίθετα, αν ο αισθητήρας u_i δεν είναι κόμβος φύλλο στο δικό του δένδρο δεδομένων, τότε η μετάβασή του στο νέο δένδρο δεδομένων μπορεί πιθανώς να οδηγήσει σε μονοπάτια με βρόχους (στο νέο δένδρο δεδομένων), μιας και η συνθήκη του ότι ο κόμβος πατέρας πρέπει να είναι πλησιέστερα στον ενεργοποιητή από ότι ο κόμβος παιδί, μπορεί να παραβιαστεί [13].

Ο αλγόριθμος που εκτελείται από τον αισθητήρα u_i (και από κάθε άλλο αισθητήρα του WSN) στην κατάσταση συνάθροισης, παρουσιάζεται παρακάτω [13]:

Αλγόριθμος κατάστασης συνάθροισης

1. **for** κάθε γείτονα u_j **do**
2. **if** ($\text{distance}(u_i, u_j) < \text{distance}(u_i, \text{next_hop})$) **then**
3. $u_{min} = u_j$
4. **end if**
5. **end for**
6. $s = \text{actor}(u_{min})$
7. **if** ($s == \text{myactor}$) **then** // u_i και u_{min} ανήκουν στο ίδιο δένδρο δεδομένων
8. **if** ($\text{distance}(u_{min}, s) < \text{distance}(u_i, s)$) **then**
9. $\text{nexthop} = u_{min}$
10. **else**
11. Διέγραψε τον κόμβο u_{min} από τη λίστα και εκκίνησε εκ νέου τον αλγόριθμο
12. **end if**
13. **else if** *Είμαι κόμβος φύλλο* // u_i και u_{min} ανήκουν σε διαφορετικά δένδρα δεδομένων
14. $\text{nexthop} = u_{min}$
15. **else**
16. Διέγραψε τον κόμβο u_{min} από τη λίστα και εκκίνησε εκ νέου τον αλγόριθμο
17. **end if**

Τέλος, οι αισθητήρες του δικτύου μεταβαίνουν από την κατάσταση επιτάχυνσης στην κατάσταση συνάθροισης ανάλογα με την τιμή αξιοπιστίας r που λαμβάνουν περιοδικά από τους ενεργοποιητές του δικτύου. Η εν λόγω κατάσταση, απεικονίζεται στην εικόνα 5.3, με τις μεταβάσεις από την κατάσταση επιτάχυνσης στην κατάσταση συνάθροισης και αντιστρόφως. Αν κάποιος αισθητήρας, δε παρατηρήσει κάποιο συμβάν ή δε λάβει μήνυμα από γειτονικό αισθητήρα για παραπάνω από *idleTimeout* (σταθερά συστήματος) δευτερόλεπτα, τότε μεταβαίνει στην κατάσταση αδράνειας [13].

Συμπερασματικά, θα λέγαμε ότι το καταναμημένο πρωτόκολλο DEPR, επιτυγχάνει συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών του WSN, κατασκευάζοντας δένδρα δεδομένων, τα οποία εξασφαλίζουν ένα καλό συνδυασμό απόδοσης μεταξύ αξιοπιστίας και κατανάλωσης ενέργειας.

5.3 Συντονισμός με χάρτες αισθητήρων

Στην παρούσα ενότητα, θα παρουσιάσουμε την εργασία με τίτλο “A Real – Time Communication Framework for Wireless Sensor – Actuator Networks” [14]. Το εν λόγω πλαίσιο επικοινωνίας,

εξασφαλίζει τόσο το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, όσο και το συντονισμό μεταξύ ενεργοποιητών. Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου, θα ασχοληθούμε με το πρώτο σκέλος συντονισμού, παρουσιάζοντας αναλυτικά τα βήματα για την επίτευξή του.

Για την εξασφάλιση του συντονισμού μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, προτείνεται ένας καταναμημένος αλγόριθμος πραγματικού χρόνου, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μετάδοση των περιστατικών (events) από τους αισθητήρες του δικτύου στους ενεργοποιητές (distributed event – reporting algorithm). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, εξασφαλίζει ότι η μετάδοση των δεδομένων θα γίνεται μέσω μονοπατιών που επιφέρουν την **ελάχιστη δυνατή χρονική καθυστέρηση (minimum delay)** μεταξύ αποστολέα (αισθητήρα) και παραλήπτη (ενεργοποιητή) [14]. Με άλλα λόγια, κύριο μέλημα του αλγορίθμου, είναι η όσο το δυνατόν ταχύτερη και χωρίς μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις ενημέρωση των ενεργοποιητών από τους αισθητήρες, για τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα εντός του WSN. Επιπλέον, δεδομένα με υψηλό δείκτη σημαντικότητας, αποστέλλονται με μεγαλύτερη προτεραιότητα στους ενεργοποιητές του δικτύου [14].

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, ο καταναμημένος αλγόριθμος, ο οποίος εκτελείται από τους αισθητήρες του WSN, περιλαμβάνει τα τρία παρακάτω βασικά στάδια:

1. Αρχικά, η περιοχή παρατήρησης περιστατικών του δικτύου (event area), χωρίζεται σε **χάρτες (maps)**. Οι χάρτες, συνιστούν ουσιαστικά, ομάδες αισθητήρων (clusters) που ανιχνεύουν το ίδιο περιστατικό εντός του δικτύου [14].
2. Παράλληλα με τη σύσταση των χαρτών, λαμβάνει χώρα και η διαδικασία **συνάθροισης δεδομένων (data aggregation)** μεταξύ των αισθητήρων που ανήκουν στον ίδιο χάρτη [14].
3. Τα δεδομένα που ανιχνεύονται από τους αισθητήρες, αποστέλλονται στους ενεργοποιητές κατά **επίπεδα (layers)** [14]. Ουσιαστικά, λαμβάνει χώρα μία μετάδοση κατά την οποία τα πιο σημαντικά δεδομένα αποστέλλονται **πρώτα** προς τους ενεργοποιητές, και εν συνεχεία ακολουθούν οι λεπτομέρειες των περιστατικών. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι ενεργοποιητές αποκτούν ταχύτερα μία συνοπτική εικόνα των περιστατικών του δικτύου, γεγονός που επιταχύνει την συντονισμένη δράση τους.

Στα πλαίσια της εργασίας [14], λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω υποθέσεις [14]:

1. Οι ενεργοποιητές του WSN, αποστέλλουν περιοδικά τη θέση τους στους αισθητήρες του δικτύου.
2. Οι αισθητήρες επικοινωνούν με τους ενεργοποιητές, μόνο όταν έχουν εντοπίσει κάποιο περιστατικό εντός του δικτύου.
3. Οι ενεργοποιητές του δικτύου είναι **κινούμενοι (mobile)**.

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε αναλυτικά, κάθε ένα από τα τρία παραπάνω βήματα του καταναμημένου αλγορίθμου που εξασφαλίζει συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών.

5.3.1 Δημιουργία χαρτών

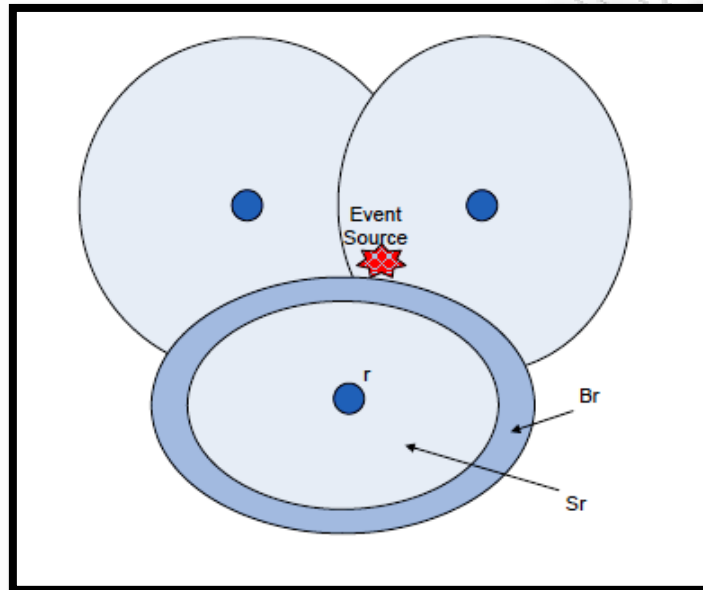
Το κεντρικό σημείο του καταναμημένου αλγορίθμου της εργασίας [14] αποτελεί η σύσταση χαρτών (maps) αισθητήρων.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε αισθητήρας r του δικτύου, που ανιχνεύει πιο γρήγορα από τους υπόλοιπους ένα περιστατικό, ξεκινά τη διαδικασία σύστασης ενός χάρτη. Για τη δημιουργία του εν λόγω χάρτη, λαμβάνουν χώρα τα παρακάτω βήματα [14]:

1. Αρχικά, ο αισθητήρας r αποστέλλει ένα μήνυμα **DetectEvt** (r, θ, e) προς όλους τους γειτονικούς του αισθητήρες. Με θ συμβολίζουμε όλους τους γειτονικούς αισθητήρες του r σε απόσταση 1-hop, και με e το αναγνωριστικό ID του περιστατικού.
2. Κάθε γειτονικός αισθητήρας που λαμβάνει το παραπάνω μήνυμα, και έχει εντοπίσει κάποιο περιστατικό το οποίο δεν έχει ακόμη αναφέρει (report) σε κάποιο γειτονικό του κόμβο στο δίκτυο (δηλαδή ο αισθητήρας λαμβάνει το μήνυμα DetectEvt του αισθητήρα r προτού προλάβει να αποστείλει το δικό του μήνυμα DetectEvt στους γείτονές του), το προωθεί προς τους γειτονικούς του αισθητήρες. Η μετάδοση συνεχίζεται μέχρι τους αισθητήρες που απέχουν **max_hop** βήματα από τον αισθητήρα r .
3. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ο χάρτης του αισθητήρα r . Ουσιαστικά, ο εν λόγω χάρτης είναι μία συστάδα (cluster) αποτελούμενη από όλους τους παραπάνω αισθητήρες που συμμετείχαν στην αναμετάδοση του μηνύματος **DetectEvt** του αισθητήρα r . Οι αισθητήρες αυτοί, συμβολίζονται με S_r .
4. Οι αισθητήρες που απέχουν **max_hop** βήματα από τον αισθητήρα r , αποτελούν τα σύνορα/όρια του εν λόγω χάρτη/συστάδας και συμβολίζονται με B_r (B_r υποσύνολο του S_r).

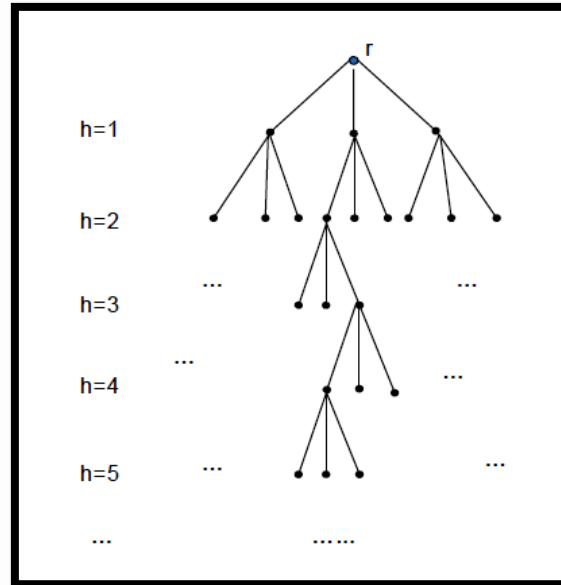
5. Οι αισθητήρες που ανήκουν στο σύνολο B_r σταματούν την προώθηση του μηνύματος **DetectEvt**. Αντί αυτού, αποστέλλουν ένα μήνυμα **ReplyEvt** στους προηγούμενους αισθητήρες, το οποίο περιέχει τις συντεταγμένες τους, την τιμή των δεδομένων που έχουν οι ίδιοι εντοπίσει (sensed) και το αναγνωριστικό ID του περιστατικού (event ID). Το αναγνωριστικό ID του περιστατικού, περιλαμβάνει τον τύπο του περιστατικού καθώς και την ώρα ανίχνευσής του, όπως αυτή καθορίζεται από τον αισθητήρα r .

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι υπάρχει πιθανότητα, ένα περιστατικό να ανιχνευθεί ταυτόχρονα από πολλούς αισθητήρες r του δικτύου. Συνεπώς, κάθε ένας από τους παραπάνω αισθητήρες, προχωρά στη σύσταση ενός χάρτη (συστάδας) για το εν λόγω περιστατικό. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η περιοχή εμφάνισης περιστατικών (event area), χωρίζεται σε χάρτες, όπως ακριβώς φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 5.4: Τρεις χάρτες για το ίδιο περιστατικό [14].

Ο χάρτης ενός αισθητήρα r αναπαρίσταται ως ένα δένδρο, με τον αισθητήρα r ως ρίζα του δένδρου και τους υπόλοιπους αισθητήρες S_r να αποτελούν τους υπόλοιπους κόμβους του δένδρου. Τα φύλλα του δένδρου αποτελούνται από τους αισθητήρες του συνόλου B_r . Στην εικόνα που ακολουθεί, απεικονίζεται ένα ενδεικτικό δένδρο για τον χάρτη του αισθητήρα r . Με h συμβολίζουμε την απόσταση (σε πλήθος hops) που χωρίζει έναν αισθητήρα από τη ρίζα r του δένδρου.



Εικόνα 5.5: Δένδρο που αντιστοιχεί σε χάρτη του δικτύου [14].

Όπως αναφέραμε και στην αρχή της ενότητας 5.3, παράλληλα με τη σύσταση των χαρτών, λαμβάνει χώρα και η διαδικασία **συνάθροισης δεδομένων (data aggregation)** μεταξύ των αισθητήρων που ανήκουν στον ίδιο χάρτη. Η διαδικασία αυτή, περιγράφεται στην ενότητα που ακολουθεί.

5.3.2 Συνάθροιση δεδομένων

Στην ενότητα 5.3.1 αναφέραμε ότι οι αισθητήρες που ανήκουν στο σύνολο B_r σταματούν την προώθηση του μηνύματος *DetectEvt* του αισθητήρα r . Αντί αυτού, στέλνουν μήνυμα *ReplyEvt* με τις συντεταγμένες τους, την τιμή των δεδομένων που έχουν οι ίδιοι εντοπίσει και το αναγνωριστικό ID του περιστατικού (event ID) προς τους αισθητήρες γονείς τους, σύμφωνα πάντα με το δένδρο που αντιστοιχεί στον χάρτη του αισθητήρα r . Οι αισθητήρες γονείς που παραλαμβάνουν τα μηνύματα αυτά, προχωρούν σε μία από τις παρακάτω ενέργειες, με βάση την τιμή h που διαθέτουν στο δένδρο (βλ. εικόνα 5.5) [14]:

1. Οι αισθητήρες γονείς, με άρτια τιμή h , λαμβάνουν τα μηνύματα *ReplyEvt* από τους απογόνους τους, και **επισυνάπτουν** σε αυτά τις δικές τους συντεταγμένες καθώς και τις τιμές των δεδομένων που έχουν οι ίδιοι εντοπίσει. Στη συνέχεια, προωθούν το ανανεωμένο μήνυμα *ReplyEvt* προς τους αισθητήρες γονείς τους (επίπεδο $h-1$) στο δένδρο.
2. Οι αισθητήρες γονείς, με περιττή τιμή h , λαμβάνουν τα μηνύματα *ReplyEvt* από τους απογόνους τους, και τα **συναθροίζουν (aggregate)** με τα δεδομένα που έχουν οι ίδιοι εντοπίσει. Ουσιαστικά, υπολογίζουν τη **μέση τιμή** των δικών τους δεδομένων και των δεδομένων που λαμβάνουν από τους απογόνους τους (οι οποίοι βρίσκονται σε βάθος $h+1$ στο δένδρο). Αυτή η μέση τιμή μαζί με τις συντεταγμένες τους, αποστέλλονται στη συνέχεια προς τους αισθητήρες γονείς τους (επίπεδο $h-1$) στο δένδρο.

Η παραπάνω διαδικασία, επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ο αισθητήρας – ρίζα r του δένδρου συλλέξει όλες τις συντεταγμένες και τα δεδομένα των αισθητήρων του δένδρου (χάρτη) του. Στη συνέχεια, προωθεί το συλλεγόμενο περιστατικό προς τον **πλησιέστερο** σε αυτόν ενεργοποιητή, για να λάβει χώρα η δράση επί του συμβάντος. Ο ενεργοποιητής με τη σειρά του, μπορεί να συνεργαστεί με άλλους ενεργοποιητές (actor – actor coordination), για να αντιμετωπίσει συλλογικά και πιο αποτελεσματικά το συγκεκριμένο περιστατικό.

Όπως προαναφέραμε στην ενότητα 5.3, ο αισθητήρας r που κατασκευάζει τον χάρτη, στέλνει το συλλεγόμενο περιστατικό σε δύο φάσεις. Ουσιαστικά, αποστέλλει τα δεδομένα στον πλησιέστερο ενεργοποιητή, σε δύο επίπεδα (layers) για να επιταχυνθεί ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών [14].

5.3.3 Μετάδοση κατά επίπεδα

Τα δύο επίπεδα στα οποία χωρίζονται τα δεδομένα προς αποστολή, είναι τα παρακάτω [14]:

1. Αρχικά, ο αισθητήρας r αποστέλλει στον πλησιέστερο ενεργοποιητή, τα δεδομένα του **βασικού επιπέδου (basic layer)**. Στο επίπεδο αυτό αποστέλλονται, ο τύπος του περιστατικού, ο χρόνος

κατά τον οποίο ανιχνεύθηκε για πρώτη φορά το περιστατικό, η τοποθεσία του χάρτη, καθώς και μία μέση τιμή όλων των συλλεγόμενων δεδομένων που λαμβάνει ο αισθητήρας r από τους αισθητήρες του χάρτη του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο ενεργοποιητής λαμβάνει μία γενική ιδέα για την κατάσταση που επικρατεί στον χάρτη του αισθητήρα r , γεγονός που του επιτρέπει να επισπεύσει τις πιθανές διαδικασίες συντονισμού με άλλους ενεργοποιητές.

2. Αμέσως μετά την αποστολή του βασικού επιπέδου, ο αισθητήρας r αποστέλλει τα δεδομένα του **επίπεδου φιλτραρίσματος (refinement layer)**. Ειδικότερα, στο επίπεδο αυτό, αποστέλλονται όλες οι μέσες τιμές που υπολογίζονται από τους αισθητήρες με περιττή τιμή h (βλ. ενότητα 5.3.2), καθώς και οι θέσεις των εν λόγω αισθητήρων.

Συμπερασματικά, κατά την μετάδοση σε δύο επίπεδα, ο αισθητήρας r αποστέλλει αρχικά στον ενεργοποιητή τις σημαντικότερες πληροφορίες του περιστατικού (βασικό επίπεδο), και στη συνέχεια τις λεπτομέρειες (επίπεδο φιλτραρίσματος) αυτού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιταχύνεται ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών, γεγονός που συνεπάγεται καλύτερη αντιμετώπιση των καταγεγραμμένων συμβάντων.

Συμπερασματικά, η εργασία [14] επιτυγχάνει το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, εφαρμόζοντας τα τρία παραπάνω στάδια (δημιουργία χαρτών, συνάθροιση δεδομένων, μετάδοση κατά επίπεδα) του κατανεμημένου αλγορίθμου που παρουσιάσαμε. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου, είναι η εξασφάλιση μονοπατιών μετάδοσης δεδομένων μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, τα οποία επιφέρουν την ελάχιστη δυνατή χρονική καθυστέρηση.

5.4 Συντονισμός με βάση τις συστάδες αισθητήρων

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιάσουμε την εργασία με τίτλο “**Cluster – based coordination and routing framework for wireless sensor and actor networks**” [15]. Το εν λόγω πλαίσιο (CCR), εξασφαλίζει τόσο το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, όσο και τον συντονισμό μεταξύ ενεργοποιητών. Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου, θα ασχοληθούμε με το πρώτο σκέλος συντονισμού, παρουσιάζοντας αναλυτικά τα βήματα για την επίτευξή του.

5.4.1 Συσταδοποίηση δικτύου

Αρχικά, υποθέτουμε ότι το WSN αποτελείται από k συστάδες αισθητήρων. Το πλήθος k των συστάδων του δικτύου διαμορφώνεται με βάση τις τιμές των παρακάτω παραμέτρων [15]:

1. Τις διαστάσεις του πεδίου του WSN.
2. Το πλήθος των αισθητήρων του δικτύου.
3. Την εμβέλεια μετάδοσης των αισθητήρων.

Σε κάθε μία από τις k συστάδες αισθητήρων, εκλέγεται και ένας αισθητήρας ως αρχηγός (Cluster Head) της συστάδας. Πιο συγκεκριμένα, κάθε αισθητήρας i του δικτύου διαθέτει μια ειδική **βαρύτητα W_i (weight)**, η οποία διαμορφώνεται με βάση τις παρακάτω παραμέτρους [15]:

1. Την διαθέσιμη ενέργεια του αισθητήρα.
2. Την ρυθμό παραγωγής κίνησης του αισθητήρα (traffic flow rate).
3. Την πυκνότητα (density) των αισθητήρων εντός του δικτύου.

Κάθε αισθητήρας i , χρησιμοποιεί τον παρακάτω τύπο [15] για να υπολογίσει τη βαρύτητά του W_i :

$$W_i = c_1 \frac{\rho_o}{\rho_i} \times \frac{E_i}{E_o} + c_2 \frac{D_i}{r} \times \frac{N_i}{N_{opt}} \quad (1)$$

Στον παραπάνω τύπο, με D_i συμβολίζουμε τη μέση απόσταση του αισθητήρα i από τους N_i συνολικούς του γείτονες. Με E_i συμβολίζουμε τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια και με ρ_i τον ρυθμό παραγωγής κίνησης του αισθητήρα i . Με E_o και με ρ_o συμβολίζουμε το κατώτατο όριο ενέργειας και ρυθμού παραγωγής κίνησης των κόμβων του δικτύου. Οι συντελεστές c_1 και c_2 αποτελούν σταθερές του συστήματος. Με N_{opt} συμβολίζουμε το βέλτιστο αριθμό αισθητήρων ανά συστάδα, ο οποίος ισούται με: $N_{opt} = \frac{n}{k}$ (όπου n το σύνολο των αισθητήρων του δικτύου).

Αφού οι αισθητήρες υπολογίσουν την βαρύτητά τους, ανταλλάσσουν με τους γείτονές τους τις εν λόγω τιμές. Ο αισθητήρας εκείνος, ο οποίος διαθέτει την μεγαλύτερη βαρύτητα εντός της συστάδας του, ανακοινώνεται ως αρχηγός. Ο αισθητήρας – αρχηγός κάθε συστάδας, καταγράφει τη θέση όλων των αισθητήρων – μελών της συστάδας του, καθορίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τα γεωγραφικά όρια της συστάδας στην οποία ηγείται.

Τα περιστατικά που λαμβάνουν χώρα μέσα σε μία συστάδα αισθητήρων, αποστέλλονται μέσω του αισθητήρα – αρχηγού σε κάποιον ενεργοποιητή του δικτύου. Ο εν λόγω ενεργοποιητής, μπορεί να βρίσκεται εκτός εμβέλειας του αισθητήρα – αρχηγού της συστάδας. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η δρομολόγηση των δεδομένων μέσα από ενδιάμεσες συστάδες αισθητήρων. Για την διασύνδεση των συστάδων, χρησιμοποιούνται ορισμένοι αισθητήρες οι οποίοι αποκαλούνται **αισθητήρες – πύλες (gateways)**. Οι αρχηγοί κάθε συστάδας, διατηρούν ένα σύνολο GS από αισθητήρες – πύλες, για να αποφασίσουν, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της συνολικής χρονικής καθυστέρησης ή την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, το μονοπάτι μέσω του οποίου θα αποστείλουν τα δεδομένα τους στον ενεργοποιητή τον οποίο έχουν επιλέξει (στην ενότητα που ακολουθεί, περιγράφεται αναλυτικά ο συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών).

Ας υποθέσουμε ότι σε μία συστάδα αισθητήρων i ο αισθητήρας – αρχηγός συμβολίζεται ως H_i . Το σύνολο GS_i του αρχηγού H_i περιλαμβάνει εκείνους τους αισθητήρες της συστάδας i , οι οποίοι έχουν ως γείτονες:

- Είτε κάποιον αισθητήρα – αρχηγό H_j (με $i \neq j$) κάποιας άλλης συστάδας του WSN.
- Είτε κάποιον αισθητήρα – μέλος κάποιας άλλης συστάδας του WSN στην οποία αρχηγός είναι ο αισθητήρας H_j (με $i \neq j$).

Κάθε στοιχείο του συνόλου GS_i περιλαμβάνει τα εξής γνωρίσματα [15]: {Adjacent Head, Energy, Delay, Hop}.

5.4.2 Επίτευξη συντονισμού

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο το πλαίσιο CCR εξασφαλίζει το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών. Αναλύεται ουσιαστικά, η μεθοδολογία με την οποία οι αισθητήρες – αρχηγοί κάθε συστάδας, επιλέγουν τον/τους ενεργοποιητή/ενεργοποιητές στους οποίους θα αποστείλουν τα δεδομένα τους.

Μοντέλο δικτύου

Αρχικά, υποθέτουμε ότι το WSN, μοντελοποιείται ως ένας κατευθυνόμενος γράφος $G = (V, E)$. Με V αναπαριστούμε το σύνολο των αισθητήρων του δικτύου ($|V|=n$), και με E το σύνολο των ακμών/ζεύξεων του δικτύου. Μία ακμή $e (u \rightarrow v)$ ανήκει στο σύνολο E , αν ο αισθητήρας – παραλήπτης v ανήκει στην εμβέλεια μετάδοσης του αισθητήρα - αποστολής u και $u, v \in V$.

Σε κάθε ζεύξη $e (u \rightarrow v)$ αντιστοιχούν δύο πραγματικές μη μηδενικές μεταβλητές [15]:

1. Η μεταβλητή $R(e)$ η οποία αναπαριστά την διαθέσιμη ενέργεια του αισθητήρα u της ζεύξης $e (u \rightarrow v)$.
2. Η μεταβλητή $\Delta(e)$ η οποία αναπαριστά τη χρονική καθυστέρηση που επιφέρει η συγκεκριμένη ζεύξη (link), κατά τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων από τον αισθητήρα u προς τον αισθητήρα v .

Με βάση τις παραπάνω δύο μεταβλητές, υπολογίζεται το βάρος $W(u, v)$ της ζεύξης $e (u \rightarrow v)$, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο [15]:

$$W(u, v) = \frac{R(e)}{\Delta(e)} \quad (2)$$

Αντίστοιχα, σε κάθε μονοπάτι (path) μεταξύ πηγής (αισθητήρας – αρχηγός συστάδας) και προορισμού (ενεργοποιητή), αντιστοιχεί ένα συνολικό βάρος W το οποίο ισούται με το άθροισμα των επιμέρους βαρών των ζεύξεων που συνθέτουν το μονοπάτι, καθώς και μία συνολική χρονική καθυστέρηση Δ η οποία ισούται με άθροισμα των επιμέρους χρονικών καθυστερήσεων των ζεύξεων. Συνεπώς, κατά τη δρομολόγηση των πακέτων από τις πηγές προς τους προορισμούς, λαμβάνεται υπόψη το συνολικό βάρος W των εναλλακτικών μονοπατιών, και επιλέγεται η διαδρομή με το μικρότερο δυνατό συνολικό βάρος W .

Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών

Στο πλαίσιο CCR, κατά τον συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, οι αισθητήρες – αρχηγοί των συστάδων επιλέγουν τους ενεργοποιητές στους οποίους θα αποστείλουν τα δεδομένα τους με βάση το παρακάτω κριτήριο:

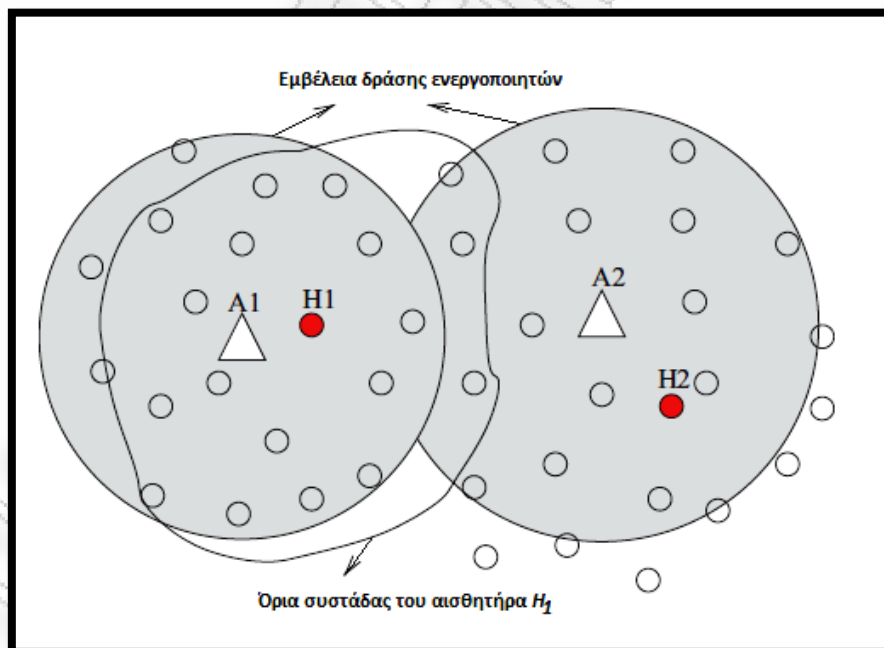
- Τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα εντός των συστάδων των αισθητήρων, πρέπει να παραλαμβάνονται από τους ενεργοποιητές, εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού ορίου. Με άλλα λόγια, κατά τον συντονισμό αισθητήρων και ενεργοποιητών, λαμβάνεται υπόψη η συνολική χρονική καθυστέρηση (delay) που επιφέρει το μονοπάτι μεταξύ πηγής και προορισμού, και η

οποία θα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το πλαίσιο CCR, επιδιώκει να μεγιστοποιήσει την αξιοπιστία (reliability) του WSAN μιας και οι ενεργοποιητές επεμβαίνουν εγκαίρως στα περιστατικά του δικτύου.

Ας δούμε όμως, βήμα – βήμα, τον τρόπο με τον οποίο εξασφαλίζεται ο συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών από το πλαίσιο CCR [15]:

1. Αρχικά, κάθε ενεργοποιητής του WSAN, μεταδίδει ένα μήνυμα (*presence beacon*) το οποίο περιέχει την τρέχουσα θέση του, την εμβέλεια μετάδοσής του (action range) καθώς και το φόρτο του (load). Το εν λόγω μήνυμα, μεταδίδεται με ισχύ (power) ίση με την ισχύ που μεταδίδουν οι αισθητήρες του δικτύου. Συνεπώς, το μήνυμα δεν λαμβάνεται απευθείας από όλους τους αισθητήρες του WSAN παρά μόνο από αυτούς που βρίσκονται κοντά στους ενεργοποιητές του δικτύου.
2. Ο αισθητήρας εκείνος που θα λάβει το παραπάνω μήνυμα, το προωθεί προς τον αισθητήρα – αρχηγό της συστάδας στην οποία ανήκει. Ο αρχηγός με τη σειρά του, μέσα από το σύνολο GS , το μεταδίδει στις γειτονικές του συστάδες, και τελικά το μήνυμα του ενεργοποιητή παραλαμβάνεται από όλους τους αισθητήρες – αρχηγούς του δικτύου.
3. Κατ' αυτόν τον τρόπο, όλα τα μηνύματα των ενεργοποιητών του δικτύου, λαμβάνονται από όλους τους αισθητήρες – αρχηγούς του WSAN.
4. Κάθε αισθητήρας – αρχηγός, επιλέγει να αποστείλει τα δεδομένα του στον ενεργοποιητή εκείνο ο οποίος παρέχει κάλυψη (coverage) στη συστάδα του, ενώ παράλληλα το μονοπάτι μεταξύ αυτού και του επιλεγμένου ενεργοποιητή έχει είτε τη μικρότερη χρονική καθυστέρηση (delay) συγκριτικά με τους άλλους ενεργοποιητές του δικτύου, είτε το μικρότερο αριθμό hops.
5. Είναι πιθανό, ένας μόνο ενεργοποιητής να μην μπορεί να παρέχει εξολοκλήρου κάλυψη μέσα σε μία συστάδα αισθητήρων. Συνεπώς, ο αισθητήρας – αρχηγός της εν λόγω συστάδας, θα πρέπει να επιλέξει παραπάνω από έναν ενεργοποιητές για να εξυπηρετούν τη συστάδα του. Οι ενεργοποιητές αυτοί, θα πρέπει να έχουν την ελάχιστη δυνατή επικάλυψη (overlapping) εντός της συστάδας.

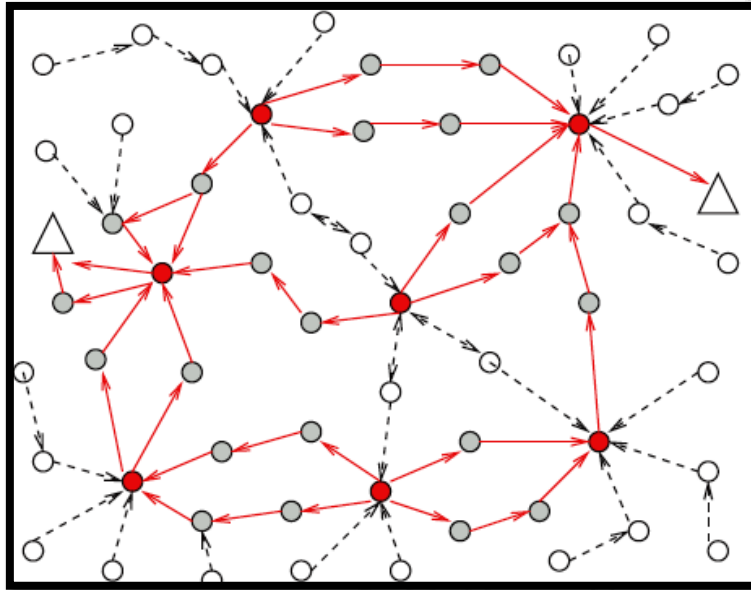
Παρακάτω, ακολουθεί μία εικόνα στην οποία ένας αισθητήρας – αρχηγός H_1 χρησιμοποιεί δύο ενεργοποιητές (A_1, A_2) για να παρέχουν κάλυψη εντός της συστάδας του.



Εικόνα 5.6: Δύο ενεργοποιητές εξυπηρετούν μία κοινή συστάδα αισθητήρων [15].

Τέλος, αφού οι αισθητήρες – αρχηγοί των συστάδων επιλέξουν τον ενεργοποιητή στον οποίο θα αποστείλουν τα δεδομένα τους, εξετάζουν τα στοιχεία του συνόλου GS που διαθέτουν, για να ανακαλύψουν το **μονοπάτι** προς τον ενεργοποιητή, το οποίο θα παρέχει μία ισορροπία μεταξύ συνολικής καθυστέρησης (end to end delay) και κατανάλωσης ενέργειας. Συνεπώς, κάθε αισθητήρας – αρχηγός επιλέγει να δρομολογήσει τα δεδομένα του σε εκείνο τον αισθητήρα του συνόλου GS έτσι ώστε το βάρος W (βλ. μαθηματική σχέση 2) της εν λόγω ζεύξης να μεγιστοποιείται. Στην εικόνα που ακολουθεί,

παρουσιάζονται οι διαδρομές που ακολουθούν τα δεδομένα, από τους αισθητήρες – αρχηγούς (κόκκινο χρώμα) των συστάδων προς τους ενεργοποιητές (τρίγωνα), μέσω των αισθητήρων (γκρι χρώμα) που ανήκουν στα σύνολα GS . Τα μονοπάτια αυτά, διακρίνονται με κόκκινες ζεύξεις.



Εικόνα 5.7: Διαδρομές δεδομένων μεταξύ αισθητήρων – αρχηγών και ενεργοποιητών [15].

5.5 Ενέργεια και καθυστέρηση κατά το συντονισμό

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιάσουμε την εργασία με τίτλο “**Handling Mobility in Wireless Sensor and Actor Networks**” [16]. Η εν λόγω εργασία, εξασφαλίζει τόσο το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, όσο και τον συντονισμό μεταξύ ενεργοποιητών. Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου, θα ασχοληθούμε με το πρώτο σκέλος συντονισμού, παρουσιάζοντας αναλυτικά τα βήματα για την επίτευξή του.

Για το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, χρησιμοποιούνται δύο εξειδικευμένοι αλγόριθμοι οι οποίοι επιχειρούν να βρουν τη **χρυσή τομή (trade off)**, μεταξύ **κατανάλωσης ενέργειας** και **καθυστέρησης** κατά την επικοινωνία αισθητήρων και ενεργοποιητών. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι η έννοια της καθυστέρησης είναι **αλληλένδετη** με αυτή της αξιοπιστίας (reliability) του WSN. Με άλλα λόγια, όταν η καθυστέρηση κατά την επικοινωνία αισθητήρων και ενεργοποιητών είναι εντός αποδεκτών χρονικών ορίων, τότε τα δεδομένα φτάνουν εγκαίρως στους ενεργοποιητές του δικτύου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αξιοπιστία του τελευταίου. Στα πλαίσια της εργασίας [16], η έννοια της αξιοπιστίας των περιστατικών ταυτίζεται με αυτή της ενότητας 5.2 (βλ. ενότητα 5.2.1, ορισμός 4). Οι προαναφερθέντες αλγόριθμοι, παρατίθενται στις ενότητες που ακολουθούν.

5.5.1 Σύνοψη δικτύου

Στα πλαίσια της εργασίας [16], το WSN αποτελείται από αισθητήρες και **κινούμενους (mobile)** ενεργοποιητές. Οι αισθητήρες του δικτύου είναι κατά πολύ περισσότεροι των ενεργοποιητών.

Καθώς οι ενεργοποιητές του δικτύου έχουν τη δυνατότητα κίνησης εντός του πεδίου παρατήρησης, κρίνεται επιτακτική η ενημέρωση των αισθητήρων σχετικά με τις καινούργιες θέσεις των πρώτων μέσα στο δίκτυο. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, οι ενεργοποιητές του δικτύου, αποστέλλουν μηνύματα **location update** στους αισθητήρες που ανήκουν στην **Voronoi κυψέλη** τους. Πιο συγκεκριμένα, κάθε ενεργοποιητής A_i διαθέτει μία Voronoi κυψέλη, η οποία περιέχει εκείνους τους αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται πλησιέστερα σε αυτόν εν συγκρίσει με κάθε άλλον ενεργοποιητή του δικτύου. Συνεπώς, οι αισθητήρες του δικτύου, ενημερώνονται για τη θέση του ενεργοποιητή, στην κυψέλη του οποίου εντάσσονται χωρικά.

5.5.2 Επίτευξη συντονισμού

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο η εργασία [16] εξασφαλίζει το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών. Όπως αναφέραμε και στην αρχή της ενότητας 5.5, η

εργασία [16] επιχειρεί να βρει τη χρυσή τομή μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της καθυστέρησης που λαμβάνει χώρα κατά το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών του WSN.

Όπως προαναφέραμε, για την επίτευξη των παραπάνω χρησιμοποιούνται δύο εξειδικευμένοι αλγόριθμοι. Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος αλγόριθμος είναι υπεύθυνος για την εύρεση μονοπατιών μεταξύ αισθητήρα και ενεργοποιητή, τα οποία θα εξασφαλίζουν την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Ο δεύτερος αλγόριθμος, χρησιμοποιείται για την μείωση της καθυστέρησης κατά την επικοινωνία αισθητήρων και ενεργοποιητών, όταν οι τελευταίοι ανακοινώνουν ότι η αξιοπιστία r των λαμβανόμενων πακέτων είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι r_{th} (βλ. ενότητα 5.2.1, ορισμός 4). Ας δούμε αναλυτικά τους δύο αυτούς αλγορίθμους.

Αλγόριθμος 1: Ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας

Στο σημείο αυτό, θα παραθέσουμε βήμα προς βήμα, τον αλγόριθμο ο οποίος εξασφαλίζει τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, μέσα από μονοπάτια ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε αισθητήρας u_i του WSN που εντοπίζει κάποιο συμβάν εντός της περιοχής ευθύνης του, προβαίνει στις παρακάτω ενέργειες [16]:

1. Υπολογίζει την ευκλείδεια απόστασή του από όλους τους ενεργοποιητές του WSN. Ο ενεργοποιητής εκείνος ο οποίος βρίσκεται πλησιέστερα, είναι τελικά αυτός στον οποίο θα αποστείλει τα δεδομένα του.
2. Στη συνέχεια, ο αισθητήρας u_i υπολογίζει τη γωνία α η οποία σχηματίζεται από την ευθεία η οποία ενώνει τον ίδιο και τον ενεργοποιητή – προορισμό, και μία γραμμή αναφοράς (reference line).
3. Στη συνέχεια, υπολογίζει την απόσταση $d^{opt} = \alpha \sqrt{\frac{2 E_{elec}}{E_{amp}(a-1)}}$, όπου E_{elec} και E_{amp} αποτελούν σταθερές του συστήματος.
4. Το σημείο εκείνο, της ευθείας που ενώνει τον αισθητήρα u_i και τον ενεργοποιητή – προορισμό, που απέχει απόσταση d^{opt} από τον αισθητήρα u_i , αποτελεί το βέλτιστο σημείο προώθησης από άποψη κατανάλωσης ενέργειας.
5. Τελικά, ο αισθητήρας u_i προωθεί το πακέτο δεδομένων του, στον αισθητήρα u_j ο οποίος βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο βέλτιστο σημείο προώθησης.
6. Με τη σειρά του, ο αισθητήρας u_j επαναλαμβάνει τα βήματα 1 έως 5.

Αλγόριθμος 2: Έλεγχος αξιοπιστίας

Ο αλγόριθμος 2, περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται ο έλεγχος αξιοπιστίας στο WSN, με βάση τα μηνύματα που στέλνουν οι ενεργοποιητές σχετικά με την παρατηρημένη αξιοπιστία r των συμβάντων που λαμβάνουν.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε φορά που παρατηρείται κάποιο περιστατικό εντός του δικτύου, όλοι οι αισθητήρες μεταδίδουν με τη μέγιστη ισχύ. Στη συνέχεια, οι ενεργοποιητές αποστέλλουν μήνυμα προς τους αισθητήρες με την παρατηρημένη αξιοπιστία r των συμβάντων που λαμβάνουν. Αν η αξιοπιστία r είναι πάνω από το κατώφλι r_{th} τότε υπάρχει δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας. Με άλλα λόγια, οι αισθητήρες μεταδίδουν με μικρότερη ισχύ (ουσιαστικά τα μηνύματα διανύουν μικρότερες αποστάσεις-forwarding range) με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας. Αντιθέτως, αν η αξιοπιστία r είναι κάτω από το κατώφλι r_{th} τότε κρίνεται απαραίτητη η μείωση της συνολικής καθυστέρησης κατά την επικοινωνία αισθητήρων και ενεργοποιητών. Ουσιαστικά, οι αισθητήρες αυξάνουν την ισχύς εκπομπής, μεταδίδοντας τα δεδομένα τους σε μεγαλύτερες αποστάσεις (forwarding range). Αν και πάλι η παρατηρημένη αξιοπιστία είναι κάτω του κατωφλίου, τότε ενεργοποιείται ένας ειδικός μηχανισμός ο οποίος δρομολογεί τα πακέτα συνωστισμένων (congested) ενεργοποιητών, σε άλλους μη συνωστισμένους ενεργοποιητές.

Πιο συγκεκριμένα, ο συνωστισμένος ενεργοποιητής A_i επιλέγει να δρομολογήσει τα πακέτα του σε εκείνον τον ενεργοποιητή A_k ο οποίος διαθέτει τη **μικρότερη** τιμή βαρύτητας W_k . Η βαρύτητα W_k ενός ενεργοποιητή A_k ισούται με $W_k = \frac{c_n n_k + c_\delta \delta_k + c_\Delta \Delta_k}{c_n + c_\delta + c_\Delta}$ [16], όπου c_n , c_δ , c_Δ αποτελούν σταθερές. Με n_k ($0 \leq n_k \leq 1$) συμβολίζουμε τον παράγοντα συνωστισμού του ενεργοποιητή A_k , με δ_k συμβολίζουμε τη σχετική γωνιακή θέση του ενεργοποιητή A_k ως προς τον ενεργοποιητή A_i και το κέντρο της περιοχής παρατήρησης συμβάντων (event area). Τέλος, με Δ_k συμβολίζουμε τον παράγοντα απόστασης του

ενεργοποιητή A_k από το κέντρο $C_{ev,i}$. Το εν λόγω σημείο, αποτελεί το κέντρο του τμήματος (portion) της περιοχής παρατήρησης συμβάντων, το οποίο ανήκει στον ενεργοποιητή A_i .

Συμπερασματικά, η εργασία [16] επιφέρει το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, με βάση τους δύο παραπάνω αλγόριθμους που αναλύσαμε. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι, οι εργασίες [13] και [16] χρησιμοποιούν τον ίδιο ορισμό σχετικά με την αξιοπιστία των λαμβανόμενων πακέτων. Επίσης, ο αλγόριθμος 2 της εργασίας [16] ταυτίζεται με την κατάσταση συνάθροισης και επιτάχυνσης του πρωτοκόλλου DEPR (βλ. ενότητα 5.2.1) της εργασίας [13], με την μόνη διαφορά ότι στην εργασία [13] δεν χρησιμοποιείται ο ειδικός μηχανισμός του αλγορίθμου 2. Τέλος, η εργασία [16] χρησιμοποιεί ξεχωριστό αλγόριθμο (αλγόριθμος 1) για την δρομολόγηση των δεδομένων των αισθητήρων, ο οποίος διαφέρει από τον αντίστοιχο μηχανισμό των δένδρων δεδομένων της εργασίας [13].

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Κεφάλαιο 6. Συντονισμός μεταξύ ενεργοποιητών

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάσαμε μεθόδους με τις οποίες οι αισθητήρες ενός WSN, επιλέγουν τους ενεργοποιητές στους οποίους θα αποστείλουν τα περιστατικά τα οποία καταγράφουν εντός του πεδίου παρατήρησής τους. Οι ενεργοποιητές με τη σειρά τους, είτε αναλαμβάνουν να δράσουν αυτόνομα, διαθέτοντας τα κατάλληλα προσόντα (επαρκή εμπέλεια δράσης, ικανοποιητικά αποθέματα ενέργειας κ.α.), είτε συνεργάζονται με άλλους ενεργοποιητές του δικτύου έτσι ώστε να εξυπηρετήσουν τα συμβάντα στο δίκτυο από κοινού. Η συνεργασία μεταξύ των ενεργοποιητών, αποτελεί την πρόκληση του **συντονισμού μεταξύ ενεργοποιητών (actor – actor coordination)**. Η εν λόγω πρόκληση, εντάσσεται στην κατηγορία «**Συντονισμός**» του επιπέδου δικτύου της TCP/IP στοίβας πρωτοκόλλων (βλ. ενότητα 2.3.3), και θα αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου.

Ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών, γίνεται με σκοπό την επιλογή του βέλτιστου υποσυνόλου ενεργοποιητών που θα αναλάβουν δράση επί των φαινομένων. Λέγοντας βέλτιστη, εννοούμε ότι οι ενεργοποιητές που τελικά θα επιλεγούν μέσω της διαδικασίας του συντονισμού, θα έχουν επαρκή αποθέματα ενέργειας και θα βρίσκονται πλησιέστερα στα περιστατικά από κάθε άλλους μη επιλεγμένους ενεργοποιητές. Επιπρόσθετα, ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών, αποσκοπεί στην βέλτιστη δυνατή **ανάθεση καθηκόντων (task assignment)** μεταξύ των ενεργοποιητών του δικτύου. Ειδικότερα, όταν στο δίκτυο παρατηρούνται πολλά συμβάντα, οι ενεργοποιητές συντονίζονται μεταξύ τους για να αποφασίσουν το ποιός ενεργοποιητής θα αναλάβει το κάθε περιστατικό.

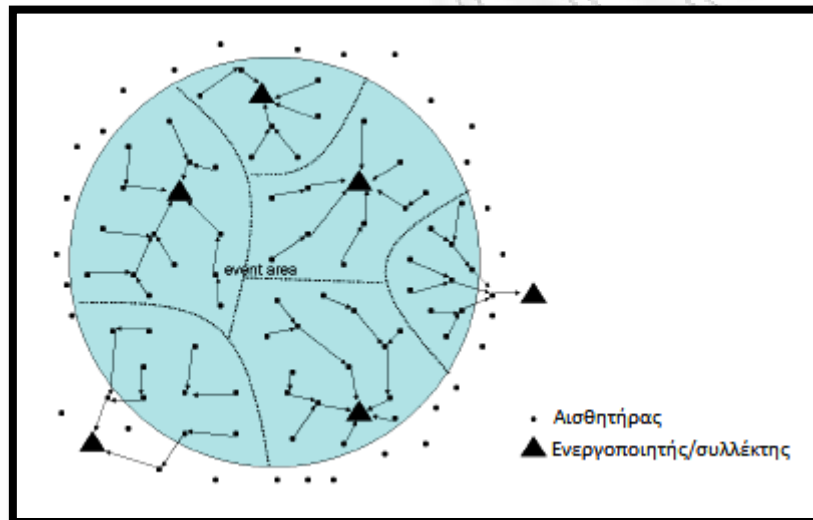
Όλα τα παραπάνω, εξασφαλίζονται από εξειδικευμένα πρωτόκολλα και αλγόριθμοι που θα μας απασχολήσουν στο παρόν κεφάλαιο. Ειδικότερα, καταβάλλεται προσπάθεια να παρουσιασθούν με απλό και κατανοητό τρόπο, τα πρωτόκολλα που εξασφαλίζουν το συντονισμό μεταξύ των ενεργοποιητών σε ένα WSN. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται αλγόριθμοι από μία ειδική κατηγορία WSNs, αυτή των WSRNs (Wireless Sensor Robot Networks) στα οποία τα ρομπότ αποτελούν τους ενεργοποιητές. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται μία μεθοδολογία ανάθεσης καθηκόντων στους ενεργοποιητές του δικτύου από τους αισθητήρες.

6.1 Συντονισμός ενεργοποιητών μέσω δημοπρασίας

Στην ενότητα 5.2 του 5^{ου} κεφαλαίου, παρουσιάσαμε την εργασία με τίτλο “**Communication and Coordination in Wireless Sensor and Actor Networks**” [13]. Ειδικότερα, αναλύσαμε με λεπτομέρεια τον τρόπο με τον οποίο το πρωτόκολλο DEPR (Distributed Event – driven Partitioning and Routing protocol) εξασφαλίζει το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών σε ένα WSA. Παράλληλα με το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, η εργασία [13] λαμβάνει υπόψη και το συντονισμό μεταξύ των ενεργοποιητών (actor – actor coordination). Αυτήν ακριβώς την πτυχή της εργασίας θα παρουσιάσουμε στα πλαίσια της παρούσας ενότητας. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι και στα πλαίσια της ενότητας 6.1, ισχύουν οι συνθήκες που παρουσιάσαμε στην ενότητα 5.2 (ο αναγνώστης όπως ενθαρρύνεται να ανατρέξει στην προαναφερθείσα ενότητα).

6.1.1 Βασικές υποθέσεις - ορισμοί

Όπως παρουσιάσαμε αναλυτικά στην ενότητα 5.2 του 5^{ου} κεφαλαίου, ο συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών του WSA, έχει ως αποτέλεσμα την επιλογή των κατάλληλων ενεργοποιητών συλλεκτών (collectors) στους οποίους θα αποστέλλουν τα περιστατικά τους οι αισθητήρες. Παρακάτω, παραθέτουμε μία ενδεικτική εικόνα στην οποία παρουσιάζεται η περιοχή εμφάνισης περιστατικών (event area) ενός WSA χωρισμένη σε έξι ομάδες αισθητήρων. Σε κάθε ομάδα αντιστοιχεί και ένας ενεργοποιητής συλλέκτης, ο οποίος λαμβάνει τα περιστατικά που εμφανίζονται στην ομάδα. Να υπενθυμίσουμε στο σημείο αυτό, ότι οι ενεργοποιητές του WSA δεν έχουν τη δυνατότητα κίνησης μέσα στο πεδίο παρατήρησης.



Εικόνα 6.1: WSA χωρισμένο σε έξι ομάδες αισθητήρων [13].

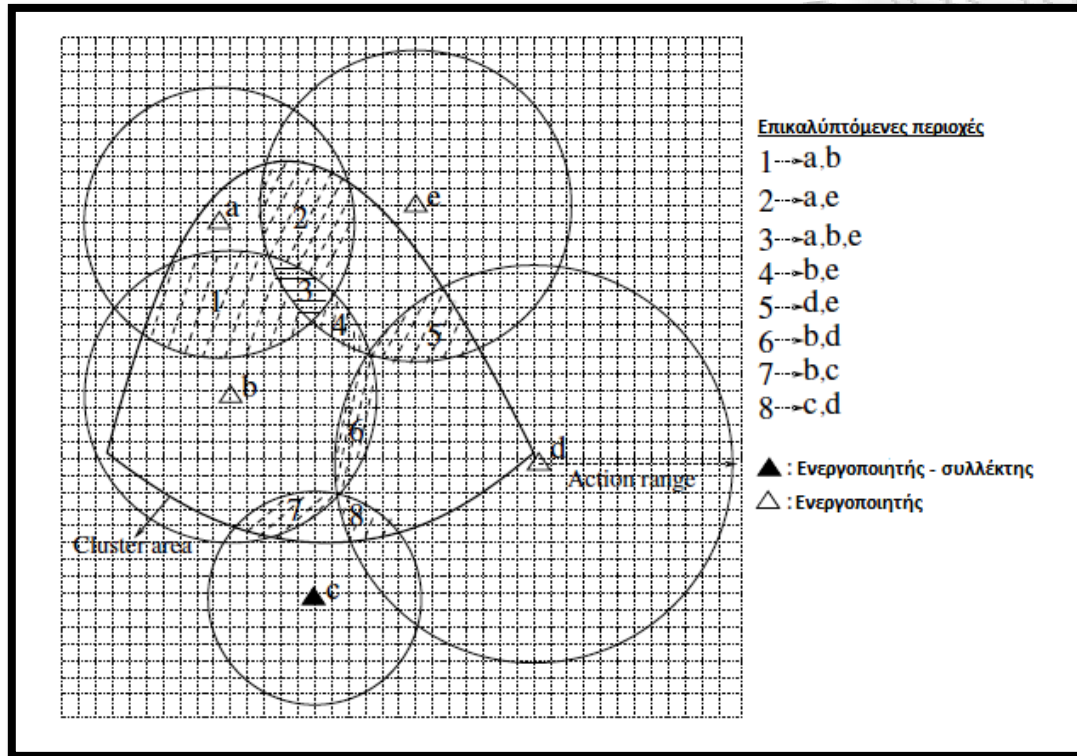
Σε κάθε μία από τις παραπάνω έξι ομάδες, ο αντίστοιχος ενεργοποιητής συλλέκτης είναι υπεύθυνος για την εξυπηρέτηση των περιστατικών που εμφανίζονται στην ομάδα του. Παρ' όλα αυτά όμως, υπάρχει πιθανότητα κάποιος ενεργοποιητής συλλέκτης να μην είναι σε θέση να εξυπηρετήσει όλα τα συμβάντα της ομάδας του, με αποτέλεσμα να εκκινήσει την διαδικασία του **συντονισμού μεταξύ ενεργοποιητών (actor – actor coordination)**. Ειδικότερα, ο ενεργοποιητής εφαρμόζει το συντονισμό μεταξύ ενεργοποιητών για τους εξής λόγους [13]:

1. Ο ενεργοποιητής συλλέκτης έχει περιορισμένη εμβέλεια δράσης (action range), με αποτέλεσμα να μην μπορεί να δρα σε όλα τα μήκη και πλάτη της ομάδας του.
2. Ο ενεργοποιητής συλλέκτης δεν διαθέτει τα απαραίτητα αποθέματα ενέργειας που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση των περιστατικών.
3. Ο ενεργοποιητής συλλέκτης δεν είναι ο πλέον κατάλληλος για να περατώσει τα περιστατικά εντός σύντομου χρονικού διαστήματος.

Εξαιτίας των παραπάνω, ο εν λόγω ενεργοποιητής εφαρμόζει τη διαδικασία του συντονισμού μεταξύ των ενεργοποιητών, έτσι ώστε να βρεθούν οι πλέον κατάλληλοι (ή κατάλληλος) ενεργοποιητές που θα εξυπηρετήσουν τα περιστατικά της ομάδας μέσα σε σύντομα χρονικά διαστήματα.

6.1.2 Η μέθοδος της δημοπρασίας

Όταν δύο ή παραπάνω ενεργοποιητές μπορούν να δράσουν ταυτόχρονα σε μία περιοχή του πεδίου παρατήρησης, τότε η περιοχή αυτή ονομάζεται **επικαλυπτόμενη (overlapping area)** [13]. Ουσιαστικά, σε μία επικαλυπτόμενη περιοχή, οι εμβέλεις δράσεις των ενεργοποιητών επικαλύπτονται. Αντίστοιχα, όταν σε μία περιοχή του πεδίου παρατήρησης δρα μονάχα ένας ενεργοποιητής, τότε η περιοχή αυτή ονομάζεται **μη επικαλυπτόμενη (non - overlapping area)**. Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο WSN, στο οποίο οι γραμμοσκιασμένες περιοχές είναι επικαλυπτόμενες, και οι μη γραμμοσκιασμένες μη επικαλυπτόμενες.



Εικόνα 6.2: Επικαλυπτόμενες και μη επικαλυπτόμενες περιοχές [13].

Ας επανέλθουμε στο ζήτημα του συντονισμού μεταξύ των ενεργοποιητών. Πιο συγκεκριμένα, όταν κάποιος ενεργοποιητής συλλέκτης εκκινήσει τη διαδικασία του συντονισμού μεταξύ των ενεργοποιητών, εξαιτίας κάποιου από τους τρεις λόγους που παραθέσαμε παραπάνω, σε μία επικαλυπτόμενη περιοχή, τότε σκοπός του συντονισμού είναι η βέλτιστη επιλογή εκείνων των ενεργοποιητών της περιοχής για να αναλάβουν δράση στα αντίστοιχα περιστατικά. Λέγοντας βέλτιστη επιλογή, εννοούμε ότι οι ενεργοποιητές θα επιλεγούν με κριτήριο, τη μεγιστοποίηση της υπολειπόμενης ενέργειας και του χρόνου ζωής (lifetime) των εν λόγω ενεργοποιητών, ενώ τέλος θα ικανοποιούνται τα χρονικά όρια για την περάτωση των περιστατικών [13]. Το πρόβλημα αυτό της κατάλληλης επιλογής των ενεργοποιητών, μοντελοποιείται ως ένα **MINLP (Mixed Integer Non-Linear Program)** πρόβλημα βελτιστοποίησης [13]. Αντίστοιχα, στην περίπτωση μίας μη επικαλυπτόμενης περιοχής, η επιλογή του ενεργοποιητή είναι πολύ πιο εύκολη, αφού ο ενεργοποιητής συλλέκτης έχει να επιλέξει μονάχα τον ένα και μοναδικό διαθέσιμο ενεργοποιητή της εν λόγω περιοχής.

Ας δούμε όμως βήμα προς βήμα τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών. Η διαδικασία είναι εμπνευσμένη από τις **δημοπρασίες (auctions)**. Σκοπός της δημοπρασίας είναι η επιλογή των ενεργοποιητών που θα αναλάβουν δράση σε κάθε επικαλυπτόμενη περιοχή του WSN. Πιο συγκεκριμένα, κάθε ενεργοποιητής συλλέκτης του δικτύου αναλαμβάνει το ρόλο του **πωλητή (seller)**. Ο ενεργοποιητής συλλέκτης, αναθέτει σε κάθε επικαλυπτόμενη περιοχή του πεδίου ευθύνης του, από έναν ενεργοποιητή ο οποίος έχει το ρόλο του **δημοπράτη (auctioneer)**. Ο ενεργοποιητής δημοπράτης αναλαμβάνει να διεξάγει τη δημοπρασία εντός της δικής του επικαλυπτόμενης περιοχής. Τέλος, οι ενεργοποιητές που δρουν στην ίδια επικαλυπτόμενη περιοχή, ονομάζονται **αγοραστές (buyers)**, μιας και συναγωνίζονται μεταξύ τους για το ποιος θα αναλάβει δράση στην περιοχή επικάλυψης [13].

Όταν ο πωλητής (ενεργοποιητής συλλέκτης) λάβει τα δεδομένα από τους αισθητήρες της ομάδας του, αποφασίζει για το αν θα δράσει επί των συλλεγόμενων περιστατικών, και υπολογίζει όλες τις επικαλυπτόμενες και μη περιοχές. Το πρόβλημα του συντονισμού ανακύπτει για τις επικαλυπτόμενες περιοχές του πεδίου ευθύνης του, μιας και στις μη επικαλυπτόμενες η ανάθεση γίνεται απευθείας στον ενεργοποιητή της εν λόγω περιοχής.

Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε επικαλυπτόμενη περιοχή, λαμβάνει χώρα μία τοπική δημοπρασία. Ο πωλητής, επιλέγει για κάθε μία από τις επικαλυπτόμενες περιοχές, από έναν ενεργοποιητή δημοπράτη. Οι ενεργοποιητές αυτοί, βρίσκονται στα κέντρα των αντίστοιχων επικαλυπτόμενων περιοχών [13]. Στη συνέχεια, αποστέλλει στον κάθε έναν δημοπράτη, την ακριβή περιοχή στην οποία πρέπει να λάβει χώρα η δράση των επιλεγμένων ενεργοποιητών, το μέγιστο άνω χρονικό όριο περάτωσης του περιστατικού από την ώρα που αυτό θα ανιχνευθεί από τους αισθητήρες μέχρι και την ολοκλήρωση της δράσης του ενεργοποιητή, καθώς και τη μέγιστη χρονική διάρκεια που θα έχει η κάθε δημοπρασία [13].

Κατά την έναρξη της δημοπρασίας, κάθε ενεργοποιητής δημοπράτης, αποστέλλει στους ενεργοποιητές αγοραστές της περιοχής του, ένα μήνυμα JOIN_AUCTION. Οι ενεργοποιητές αγοραστές, αποστέλλουν στον δημοπράτη την **προσφορά (bid)** τους. Η προσφορά, περιέχει το επίπεδο ισχύς του ενεργοποιητή, το χρόνο που χρειάζεται ο ενεργοποιητής για να ολοκληρώσει τη δράση του καθώς και την διαθέσιμη ενέργειά του. Στη συνέχεια, ο ενεργοποιητής δημοπράτης, συλλέγει τις προσφορές των αγοραστών και υπολογίζει τους νικητές που θα δράσουν στην περιοχή επικάλυψης, επιλύοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης που αναφέραμε παραπάνω [13]. Καταυτόν τον τρόπο, ο ενεργοποιητής συλλέκτης, τελικά συντονίζεται με τους ενεργοποιητές της ομάδας του, και τους αναθέτει μέσω των ενεργοποιητών δημοπρατών, τα καθήκοντα που ο ίδιος δεν είναι σε θέση να βγάλει εις πέρας.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών με τη μέθοδο της δημοπρασίας, έχει ως βασικό πλεονέκτημα την γρήγορη ανάθεση των περιστατικών στους ενεργοποιητές του δικτύου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, η μέθοδος των δημοπρασιών είναι **κατανεμημένη**, και εκτελείται ταυτόχρονα από τους ενεργοποιητές συλλέκτες του δικτύου. Πολλές τοπικές δημοπρασίες λαμβάνουν χώρα παράλληλα εντός του δικτύου, με αποτέλεσμα την γρήγορη ανάθεση καθηκόντων στους ενεργοποιητές.

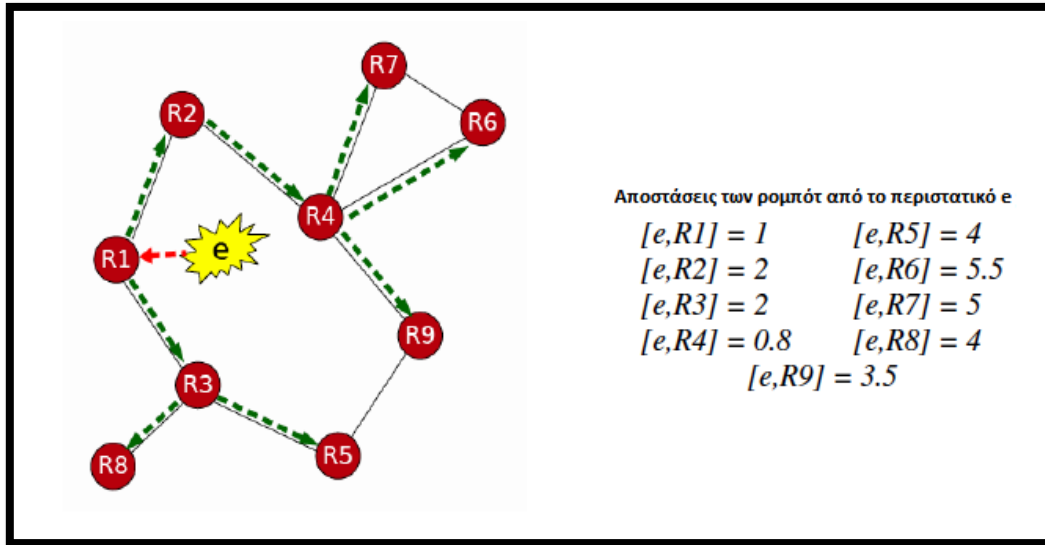
6.2 Συντονισμός στα WSRNs

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε μία ειδική κατηγορία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με ενεργοποιητές, αυτή των **WSRNs (Wireless Sensor Robot Networks)**. Πρόκειται για δίκτυα αποτελούμενα από κόμβους αισθητήρων και ρομπότ. Οι αισθητήρες παρατηρούν το περιβάλλον, ανιχνεύουν τυχόν περιστατικά, και τα αποστέλλουν στα ρομπότ τα οποία βρίσκονται διάσπαρτα εντός του δικτύου μέσω ασύρματων ζεύξεων. Τα ρομπότ με τη σειρά τους, αναλαμβάνουν δράση επί των παρατηρημένων φαινομένων. Ουσιαστικά, τα ρομπότ αναλαμβάνουν το ρόλο που έχουν οι ενεργοποιητές σε ένα WSAN. Άλλωστε, όπως αναφέραμε και στην ενότητα 1.2.1.1 του 1^{ου} κεφαλαίου, τα ρομπότ αποτελούν μία ειδική κατηγορία ενεργοποιητών στα πλαίσια των WSANs.

Όπως ακριβώς και στα WSANs, έτσι και στα WSRNs, τα ρομπότ **συντονίζονται** μεταξύ τους (**robot – robot coordination**) για να δράσουν αποτελεσματικά και όσο το δυνατόν πιο βέλτιστα επί των συμβάντων που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο. Αυτή την κατηγορία συντονισμού, θα παρουσιάσουμε σε αυτήν την ενότητα, μελετώντας αναλυτικά τα πρωτόκολλα που παρουσιάζονται στην εργασία με τίτλο “**Auction Aggregation Protocols for Wireless Robot-Robot Coordination**” [17].

6.2.1 Πρωτόκολλο k - SAP

Ας υποθέσουμε ότι το WSRN αποτελείται από εννέα ρομπότ, και ότι οι αισθητήρες του δικτύου έχουν καταγράψει ένα περιστατικό e , όπως ακριβώς παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 6.3: Στιγμιότυπο WSRN [17].

Το περιστατικό e αποστέλλεται από τον αισθητήρα που το εντόπισε, στο ρομπότ R1. Το ρομπότ αυτό, αναλαμβάνει να τρέξει το πρωτόκολλο *k - SAP* (*k - Simple Auction Protocol*) για να εντοπίσει το βέλτιστο ρομπότ το οποίο θα αναλάβει να εξυπηρετήσει το συμβάν e. Το πρωτόκολλο θεωρεί ως βέλτιστο, το ρομπότ εκείνο το οποίο βρίσκεται **πλησιέστερα** στο περιστατικό. Στην παραπάνω εικόνα, αναγράφονται οι αποστάσεις των ρομπότ από το περιστατικό e.

Το πρωτόκολλο *k - SAP* είναι και αυτό, όπως και το αντίστοιχο της ενότητας 6.1, εμπνευσμένο από τις δημοπρασίες. Πιο συγκεκριμένα, το ρομπότ R1 που λαμβάνει το περιστατικό, αποστέλλει μία αίτηση εξυπηρέτησης (η οποία περιέχει τη θέση του περιστατικού) σε *k - hop* γειτονικά ρομπότ, ζητώντας τους να του αποστείλουν τις προσφορές τους. Τα ρομπότ που λαμβάνουν την αίτηση, αποστέλλουν την προσφορά τους, η οποία περιλαμβάνει το κόστος (στην συγκεκριμένη περίπτωση την απόστασή τους από το περιστατικό) προς το αρχικό ρομπότ R1. Το τελευταίο, συγκεντρώνοντας όλες τις προσφορές, αναλαμβάνει να αναθέσει το περιστατικό στο πλησιέστερο προς αυτό ρομπότ.

Ας δούμε ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, με βάση την εικόνα 6.3. Υποθέτουμε ότι $k = 2$, δηλαδή η αίτηση εξυπηρέτησης του ρομπότ R1 αποστέλλεται σε βάθος 2 hops από τον ίδιο. Ειδικότερα, το αίτημα του R1 λαμβάνεται από τα ρομπότ R2, R4, R3, R8 και R5. Κάθε ένα από αυτά τα ρομπότ, αποστέλλει πίσω στο R1 (εδώ το πρωτόκολλο δεν διευκρινίζει αν η αποστολή γίνεται απευθείας από το ρομπότ στο R1 χωρίς ενδιάμεσα ρομπότ - δρομολογητές ή με ενδιάμεσα ρομπότ - δρομολογητές) την προσφορά του. Συλλέγοντας τις προσφορές, το R1 αναθέτει το περιστατικό στο ρομπότ R4, μιας και αυτό βρίσκεται πλησιέστερα στο περιστατικό e. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το πρωτόκολλο *K - SAP* εξασφαλίζει τη συνεργασία μεταξύ των ρομπότ WSRN, η οποία οδηγεί στην ανάθεση των συμβάντων μεταξύ των ρομπότ του δικτύου.

6.2.2 Πρωτόκολλο SAAP

Το πρωτόκολλο *SAAP* (*Single Auction Aggregation Protocol*) χρησιμοποιεί ένα δένδρο δρομολόγησης για τη μετάδοση των προσφορών των ρομπότ. Χρησιμοποιώντας και πάλι το στιγμιότυπο δικτύου της εικόνας 6.3, το ρομπότ R1 αποστέλλει το αίτημα εξυπηρέτησης στα ρομπότ R2 και R3. Τα ρομπότ αυτά, αποστέλλουν εκ νέου την εν λόγω αίτηση στους γειτονικούς τους ενεργοποιητές (R4, R5, R8), επισυνάπτοντας σε αυτή το ID του κόμβου πατέρα τους (του R1). Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου εντοπιστούν οι κόμβοι - φύλλα του δένδρου δρομολόγησης. Ένα ρομπότ ανακηρύσσεται φύλλο εφόσον δεν έχει γειτονικό ρομπότ να μεταδώσει το αίτημα [17]. Αν κάποιο ρομπότ λαμβάνει το αίτημα από πολλά ρομπότ (για παράδειγμα το ρομπότ R9), τότε επιλέγει μονάχα ένα ρομπότ ως κόμβο πατέρα (το R9 επιλέγει τον κόμβο R4) [17].

Όταν το αίτημα του R1 φτάσει στους κόμβους φύλλα (R5, R6, R7, R8, R9) του δένδρου δρομολόγησης, τότε ξεκινά η αντίστροφη μετάδοση δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, τα φύλλα αποστέλλουν στους κόμβους πατέρες τις προσφορές τους. Κάθε κόμβος πατέρας, περιμένει να συλλέξει τις προσφορές από όλα τα ρομπότ παιδιά του. Στη συνέχεια επιλέγει να αποστείλει στον πατέρα του την καλύτερη συλλεγόμενη προσφορά, ήτοι το ρομπότ που απέχει τη μικρότερη δυνατή απόσταση από το περιστατικό e

(βλ. εικόνα 6.3). Αυτή ακριβώς η στρατηγική χαρακτηρίζεται ως **δημοπρασία συνάθροισης (auction aggregation)** μιας και μειώνονται οι περιττές αποστολές προσφορών στο δίκτυο [17]. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το αρχικό ρομπότ (στο παράδειγμά μας το ρομπότ R1) συλλέξει τις προσφορές των παιδιών του. Στη συνέχεια, αποφασίζει πού θα αναθέσει το περιστατικό. Στο παράδειγμά μας, το παιδί R2 αποστέλλει ως προτεινόμενο ρομπότ το R4, και το παιδί R3 προτείνει τον εαυτό του. Το R1, επιλέγει τελικά το ρομπότ που βρίσκεται πλησιέστερα στο περιστατικό ε, ήτοι το ρομπότ R4, και το ενημερώνει μέσω του μονοπατιού $R1 \rightarrow R2 \rightarrow R4$.

6.3 Συντονισμός ενεργοποιητών στο πλαίσιο CCR

Στην ενότητα 5.4 του 5^{ου} κεφαλαίου, παρουσιάσαμε την εργασία με τίτλο “**Cluster – based coordination and routing framework for wireless sensor and actor networks**” [15]. Ειδικότερα, αναλύσαμε με λεπτομέρεια τον τρόπο με τον οποίο το πλαίσιο CCR εξασφαλίζει το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών σε ένα WSN. Παράλληλα με το συντονισμό μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, το πλαίσιο CCR εξασφαλίζει και το συντονισμό μεταξύ των ενεργοποιητών. Αυτήν ακριβώς την πτυχή του πλαισίου θα παρουσιάσουμε στα πλαίσια της παρούσας ενότητας. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι και στα πλαίσια της ενότητας 6.3, ισχύουν οι συνθήκες που παρουσιάσαμε στις ενότητες 5.4.1 και 5.4.2 (ο αναγνώστης όπως ενθαρρύνεται να ανατρέξει στις εν λόγω ενότητες).

Ο συντονισμός μεταξύ των ενεργοποιητών κρίνεται απαραίτητος σε δύο περιπτώσεις [15]:

1. Όταν ο ενεργοποιητής, στον οποίο ο αισθητήρας – αρχηγός της συστάδας έχει επιλέξει να αποστέλλει τα δεδομένα του, είναι υπερφορτωμένος με την περάτωση πολλών περιστατικών.
2. Όταν στο WSN, υπάρχουν περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει κανένας ενεργοποιητής για να παρέχει κάλυψη στα πιθανά περιστατικά.

Οι δύο παραπάνω περιπτώσεις αναλύονται αμέσως παρακάτω.

6.3.1 Υπερφορτωμένοι ενεργοποιητές

Στην ενότητα 5.4.2, παρουσιάσαμε αναλυτικά τον τρόπο με τον οποίο κάθε αισθητήρας – αρχηγός επιλέγει τον ενεργοποιητή στον οποίο θα αποστέλλει τα περιστατικά της συστάδας της οποίας ηγείται. Επειδή όμως ο φόρτος εργασίας κάθε ενεργοποιητή του WSN αλλάζει **δυναμικά**, υπάρχει πιθανότητα να μην μπορέσει τελικά να εξυπηρετήσει τον αντίστοιχο αισθητήρα – αρχηγό ο οποίος αιτείται εξυπηρέτησης [15]. Σε αυτή την περίπτωση, ο αισθητήρας – αρχηγός είναι αναγκασμένος να δρομολογήσει τα δεδομένα του σε άλλον ενεργοποιητή. Για αυτόν ακριβώς το σκοπό, ο αρχικός ενεργοποιητής (που επιλέχθηκε αρχικά από τον αισθητήρα - αρχηγό) ξεκινά την διαδικασία του συντονισμού μεταξύ ενεργοποιητών, μεταδίδοντας το αίτημα (request) εξυπηρέτησης προς τους γειτονικούς ενεργοποιητές [15].

Κάθε γειτονικός ενεργοποιητής ο οποίος λαμβάνει το παραπάνω μήνυμα, απαντά στον αισθητήρα - αρχηγό, εφόσον είναι σε θέση να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα τόσο αυτόν όσο και τους δικούς του αισθητήρες – αρχηγούς. Τέλος, ο αισθητήρας – αρχηγός, εφαρμόζει τον αλγόριθμο της ενότητας 5.4.2 (βλ. ενότητα 5.4.2 “Συντονισμός μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών”) μεταξύ των ενεργοποιητών που απάντησαν στο αίτημα, για να επιλέξει τον νέο ενεργοποιητή στον οποίο θα αποστέλλει τα δεδομένα της συστάδας του [15].

6.3.2 Ακάλυπτες περιοχές

Στις περισσότερες εφαρμογές των WSNs, οι ενεργοποιητές είναι κατά πολύ λιγότεροι των αισθητήρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε κάποιες περιοχές του πεδίου του WSN να μην υπάρχουν καθόλου ενεργοποιητές για επέμβαση. Ο ενεργοποιητής A_i που λαμβάνει αίτημα εξυπηρέτησης από κάποιον αισθητήρα – αρχηγό H_i αυτών των περιοχών, είτε μετακινείται προς αυτή την περιοχή ούτως ώστε ο εν λόγω αισθητήρας να βρεθεί εντός της εμβέλειας δράσης του (με την προϋπόθεση ότι μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα τόσο το νέο αίτημα όσο και αυτά που έχει ήδη αναλάβει), είτε εκκινεί τη διαδικασία συντονισμού μεταξύ των ενεργοποιητών, ούτως ώστε να βρεθεί κάποιος άλλος ενεργοποιητής A_j ($j \in$ στο σύνολο των ενεργοποιητών του δικτύου) ο οποίος θα μεταβεί στην εν λόγω περιοχή [15].

Όσον αφορά τον συντονισμό μεταξύ ενεργοποιητών, ο ενεργοποιητής A_i μεταδίδει μέσω πολυεκπομπής (broadcast) ένα μήνυμα **επανατοποθέτησης (relocate message)** προς τους υπόλοιπους ενεργοποιητές του δικτύου. Κάθε ενεργοποιητής A_j που είναι σε θέση να μεταβεί στην εν λόγω “ακάλυπτη” περιοχή, στέλνει ένα μήνυμα **relocation – ok** προς τον ενεργοποιητή A_i . Το μήνυμα αυτό, περιέχει την υπολειπόμενη ενέργεια του ενεργοποιητή A_j καθώς και το πλήθος των αισθητήρων –

αρχηγών που εξυπηρετεί. Τελικά, ο ενεργοποιητής A_i επιλέγει τον ενεργοποιητή A_j εκείνον ο οποίος διαθέτει τα μεγαλύτερα αποθέματα ενέργειας, και παράλληλα εξυπηρετεί τους λιγότερους αισθητήρες – αρχηγούς [15]. Έτσι, η “ακάλυπτη” περιοχή εξυπηρετείται πλέον από αυτόν τον ενεργοποιητή.

6.4 Ανάθεση καθηκόντων από τους αισθητήρες

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιάσουμε την εργασία με τίτλο “**On Maximizing Residual Energy of Actors in Wireless Sensor and Actor Networks**” [18]. Στη συγκεκριμένη εργασία, μελετούνται αλγόριθμοι για την ανάθεση καθηκόντων (task assignment) στους ενεργοποιητές του WSN. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των αλγορίθμων, είναι το γεγονός ότι η ανάθεση καθηκόντων στους ενεργοποιητές, πραγματοποιείται από κατάλληλους **αισθητήρες** του δικτύου και όχι από τους ενεργοποιητές. Με άλλα λόγια, η ανάθεση καθηκόντων στους ενεργοποιητές, δεν είναι αποτέλεσμα του συντονισμού μεταξύ των ενεργοποιητών, αλλά αντιθέτως καθορίζεται από τους αισθητήρες του δικτύου. Το γεγονός αυτό, διαφοροποιεί τους αλγορίθμους της παρούσας ενότητας, από τους αλγορίθμους που παρουσιάσαμε στις προηγούμενες ενότητες του συγκεκριμένου κεφαλαίου.

6.4.1 Σύνθεση δικτύου

Ας δούμε αρχικά, τη σύνθεση του WSN, στα πλαίσια των αλγορίθμων της εργασίας [18] που θα παρουσιάσουμε.

Πιο συγκεκριμένα, το WSN αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων και έναν μικρό αριθμό **κινούμενων (mobile)** ενεργοποιητών, ομοίμορφα κατανεμημένων εντός του πεδίου παρατήρησης του δικτύου. Το πεδίο παρατήρησης του WSN, χωρίζεται σε πολλαπλές **ζώνες (zones)**. Κάθε ζώνη του δικτύου, αποτελείται από τουλάχιστον έναν ενεργοποιητή, τους αισθητήρες που ανιχνεύουν τα διάφορα περιστατικά εντός αυτής, καθώς και από έναν **αισθητήρα – αντιπρόσωπο (agent sensor)**, ο οποίος διαθέτει μεγαλύτερα αποθέματα ενέργειας εν συγκρίσει με τους υπόλοιπους αισθητήρες της ζώνης.

Οι αισθητήρες κάθε ζώνης, μεταδίδουν τα περιστατικά που εντοπίζουν στον αντίστοιχο αισθητήρα – αντιπρόσωπο της ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, αποστέλλουν στον αντιπρόσωπο, την ακριβή θέση των περιστατικών που εντοπίζουν, το ανώτατο χρονικό όριο περάτωσης αυτών (deadline), καθώς και τα απαραίτητα αποθέματα πόρων (π.χ. επαρκή αποθέματα νερού αν πρόκειται για κατάσβεση φωτιάς, ή και αποθέματα ενέργειας) που πρέπει να διαθέτουν οι ενεργοποιητές για να τα περατώσουν. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, οι αισθητήρες – αντιπρόσωποι δρουν ως **καταβόθρες (sinks)** του WSN. Επιπλέον, οι ενεργοποιητές κάθε ζώνης, ενημερώνουν τους αντίστοιχους αισθητήρες – αντιπροσώπους σχετικά με την τρέχουσα θέση τους και τη διαθεσιμότητά τους σε πόρους (ενέργεια).

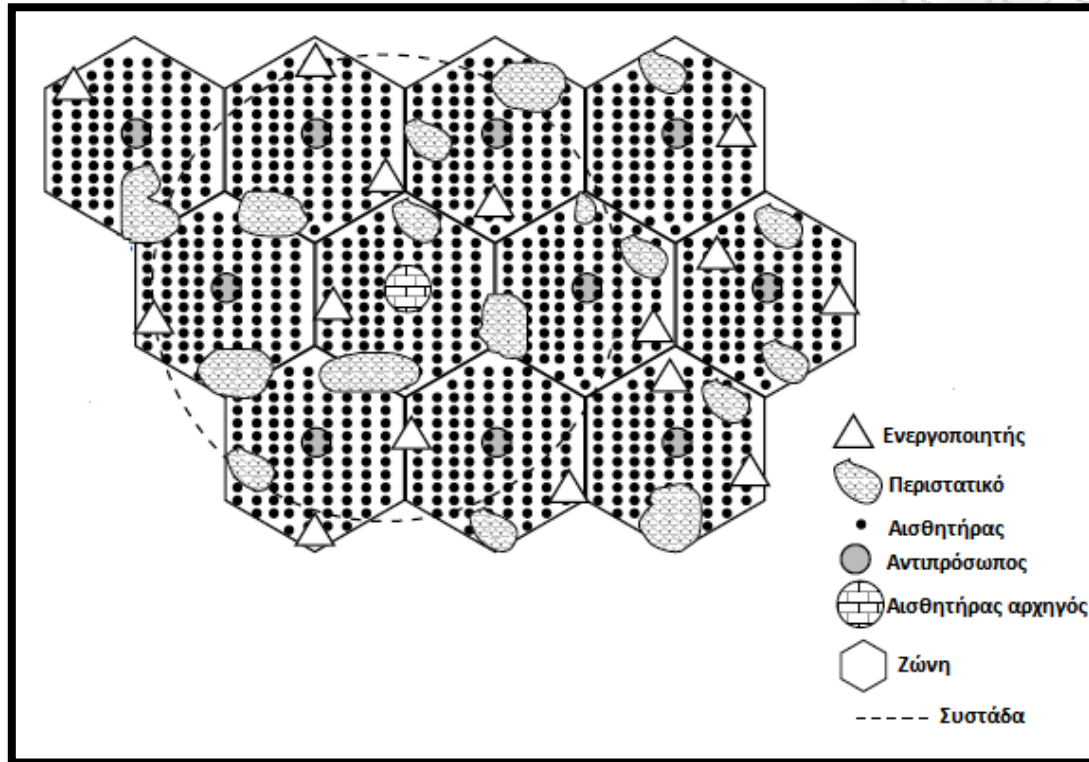
Οι αισθητήρες – αντιπρόσωποι κάθε ζώνης, αποστέλλουν περιοδικά μεταξύ τους τη θέση των περιστατικών και των ενεργοποιητών της ζώνης τους. Έτσι, κάθε αισθητήρας – αντιπρόσωπος, αποκτά μία πλήρη εικόνα σχετικά με τα περιστατικά και τους ενεργοποιητές που υπάρχουν στις γειτονικές ζώνες (**one hop**). Οι αισθητήρες – αντιπρόσωποι, πέραν της δράσης τους ως καταβόθρες του WSN, αναλαμβάνουν το ρόλο και της ανάθεσης καθηκόντων στους ενεργοποιητές του δικτύου. Στα πλαίσια της εργασίας [18], η ανάθεση καθηκόντων, αποτελεί τη διαδικασία εύρεσης κατάλληλης **διαδρομής / σειράς επίσκεψης (tour)** των ενεργοποιητών στα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο.

Για την ανάθεση καθηκόντων, διακρίνονται δύο περιπτώσεις [18]:

1. Στην πρώτη περίπτωση, η ανάθεση καθηκόντων λαμβάνει χώρα στα πλαίσια κάθε ζώνης ξεχωριστά, από τον αντίστοιχο αισθητήρα – αντιπρόσωπο της ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, ο αντιπρόσωπος, υπολογίζει το βέλτιστο **πρόγραμμα (schedule)** επίσκεψης των περιστατικών μέσω κατάλληλων αλγορίθμων, και το μεταδίδει στους ενεργοποιητές της ζώνης του. Εν συνεχεία, οι ενεργοποιητές της ζώνης, παραλαμβάνουν το εν λόγω πρόγραμμα, και επισκέπτονται τα περιστατικά με τη σειρά που υποδεικνύεται από αυτό. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται **intra – zone προγραμματισμός (scheduling)**.
2. Στη δεύτερη περίπτωση, οι ζώνες του WSN, συναθροίζονται επιπλέον σε συστάδες (clusters). Πιο συγκεκριμένα, μία συστάδα αποτελείται από πολλές ζώνες. Σε κάθε συστάδα, ένας εκ των αισθητήρων – αντιπροσώπων εκλέγεται ως αισθητήρας – αρχηγός της συστάδας (Cluster Head). Ο εν λόγω αισθητήρας, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων, υπολογίζει το βέλτιστο **πρόγραμμα (schedule)** επίσκεψης των περιστατικών για όλους τους ενεργοποιητές της συστάδας. Στη συνέχεια, μεταδίδει το πρόγραμμα στους αισθητήρες – αντιπροσώπους των ζωνών που συνθέτουν τη συστάδα. Οι τελευταίοι, μεταδίδουν τη διαδρομή (tour) στους

ενεργοποιητές της ζώνης τους. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται *inter – zone προγραμματισμός (scheduling)*.

Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα WSAN το οποίο περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά που μόλις αναφέραμε. Ειδικότερα, το δίκτυο αποτελείται από αισθητήρες, ενεργοποιητές, ζώνες, αισθητήρες – αντιπροσώπους, μία συστάδα καθώς και έναν αισθητήρα – αρχηγό της συστάδας.



Εικόνα 6.4: Αρχιτεκτονική WSAN [18].

Στις ενότητες που ακολουθούν, θα παρουσιάσουμε με λεπτομέρεια τους αλγόριθμους που εξασφαλίζουν την ανάθεση καθηκόντων στους ενεργοποιητές, τόσο σε επίπεδο ζώνης όσο και σε επίπεδο συστάδας.

6.4.2 Μοντελοποίηση προβλήματος

Στην εργασία [18] μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης των καταγεγραμμένων περιστατικών στους ενεργοποιητές του WSAN, με στόχο την *ελαχιστοποίηση* της συνολικής κίνησης των ενεργοποιητών του δικτύου, γεγονός που αποφέρει την *μεγιστοποίηση* της υπολειπόμενης ενέργειας των τελευταίων. Η εν λόγω ανάθεση, θα πρέπει να ικανοποιεί τους παρακάτω περιορισμούς (constraints):

1. Η ανάθεση των συμβάντων στους ενεργοποιητές, θα πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε, τα ανώτατα χρονικά όρια (deadlines) αυτών να ικανοποιούνται. Δηλαδή, η ανάθεση θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι τα περιστατικά θα περατώνονται εντός των αναμενόμενων χρονικών πλαισίων.
2. Η ανάθεση των συμβάντων, θα πρέπει να γίνεται σε ενεργοποιητές οι οποίοι διαθέτουν τα απαραίτητα επίπεδα πόρων, τα οποία θα τους εξασφαλίζουν την έγκαιρη περάτωση των περιστατικών.

Το παραπάνω πρόβλημα, μοντελοποιείται ως ένα MINLP (Mixed Integer Non-Linear Program) πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το εν λόγω πρόβλημα, το οποίο είναι ισοδύναμο του προβλήματος του Περιοδεύοντος Πωλητή (Travelling Salesman Problem), αποδεικνύεται πως είναι NP – Complete [18]. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, προτείνονται συγκεκριμένοι *ευρετικοί αλγόριθμοι (heuristic algorithms)* για την ανάθεση καθηκόντων στους ενεργοποιητές του WSAN. Οι αλγόριθμοι αυτοί, παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.

6.4.3 Intra – zone **προγραμματισμός**

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τρεις ευρετικούς αλγορίθμους, για την ανάθεση καθηκόντων από τους αισθητήρες - αντιπρόσωπους στους ενεργοποιητές, σε επίπεδο ζώνης (intra – zone προγραμματισμός). Υποθέτουμε ότι σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί τουλάχιστον ένας ενεργοποιητής.

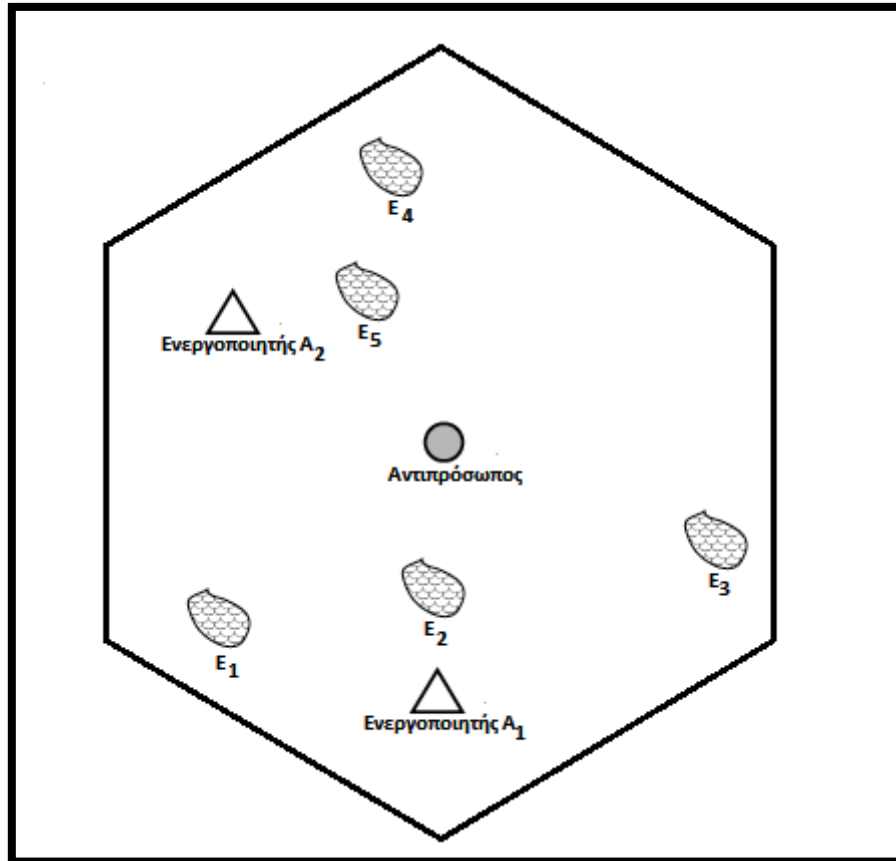
1. Ανάθεση καθηκόντων βασισμένη στην απόσταση

Ο πρώτος ευρετικός αλγόριθμος ανάθεσης καθηκόντων σε επίπεδο ζώνης, εκτελείται από κάθε αισθητήρα – αντιπρόσωπο κάθε ζώνης. Ειδικότερα, κάθε αισθητήρας – αντιπρόσωπος επιχειρεί να αναθέσει τα περιστατικά στους ενεργοποιητές της ζώνης του, έτσι ώστε οι τελευταίοι να επισκέπτονται αρχικά το **κοντινότερο** προς αυτούς περιστατικό. Σκοπός του αλγορίθμου είναι ελαχιστοποίηση της συνολικής κίνησης των ενεργοποιητών σε κάθε ζώνη, γεγονός που μεγιστοποιεί την εξοικονόμηση ενέργειας των τελευταίων. Κατά τη διάρκεια της ανάθεσης, αν κάποιο συμβάν δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από τους ενεργοποιητές της ζώνης, λόγω αυστηρών χρονικών deadlines ή υψηλών απαιτήσεων σε πόρους, τότε απορρίπτεται. Τα βήματα του αλγορίθμου, που εκτελούνται από κάθε αισθητήρα – αντιπρόσωπο όλων των ζωνών του WSN, παρουσιάζονται παρακάτω [18]:

1. Ανάθεση καθηκόντων βασισμένη στην απόσταση

1. **for** κάθε ενεργοποιητή της ζώνης **do**
2. Ταξινομήσε όλα τα μη εκχωρημένα (unassigned) συμβάντα σε μη φθίνουσα σειρά (non decreasing order) ευκλείδειας απόστασης από τον εν λόγω ενεργοποιητή.
3. Ανάθεσε το συμβάν στον εν λόγω ενεργοποιητή, αν και εφόσον ο τελευταίος διαθέτει επαρκείς πόρους και μπορεί να το περατώσει εντός των deadlines.
4. Πρόσθεσε το εν λόγω συμβάν στη λίστα καθηκόντων του ενεργοποιητή και ανανέωσε τη νέα θέση του τελευταίου.
5. Σημείωσε το συμβάν ως εκχωρημένο (assigned).
6. Επανάλαβε τα βήματα 3 έως 5 μέχρις ότου να εξεταστούν όλα τα συμβάντα της ταξινομημένης λίστας.
7. **end for**
8. Μετέδωσε το πρόγραμμα επίσκεψης των συμβάντων, σε όλους τους ενεργοποιητές της ζώνης.

Στο σημείο αυτό, θα παραθέσουμε ένα στιγμιότυπο εκτέλεσης του παραπάνω αλγορίθμου. Ας υποθέσουμε ότι ο αλγόριθμος εκτελείται από τον αισθητήρα – αντιπρόσωπο της ζώνης, που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.5: Παράδειγμα ζώνης δικτύου.

Ειδικότερα, η παραπάνω ζώνη αποτελείται από τον αισθητήρα – αντιπρόσωπο και δύο ενεργοποιητές A_1 και A_2 . Επίσης, οι αισθητήρες της ζώνης (δεν απεικονίζονται για λόγους εξοικονόμησης χώρου) έχουν εντοπίσει πέντε συμβάντα (E_1, E_2, E_3, E_4, E_5). Ο αισθητήρας – αντιπρόσωπος ξεκινά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Αρχικά, υποθέτουμε ότι ο αντιπρόσωπος, εξετάζει πρώτα τον ενεργοποιητή A_1 . Υποθέτουμε ότι οι ευκλείδειες αποστάσεις του ενεργοποιητή A_1 από τα συμβάντα, είναι οι εξής:

- $\text{dist}(A_1, E_1) = 4\text{m}$.
- $\text{dist}(A_1, E_2) = 1\text{m}$.
- $\text{dist}(A_1, E_3) = 5\text{m}$.
- $\text{dist}(A_1, E_4) = 15\text{m}$.
- $\text{dist}(A_1, E_5) = 13\text{m}$.

Συνεπώς, ο αισθητήρας – αντιπρόσωπος κατασκευάζει την ταξινομημένη κατά μη φθίνουσα σειρά απόστασης λίστα L_1 (βήμα 2 αλγορίθμου), η οποία έχει ως εξής:

$$L_1 = \{E_2, E_1, E_3, E_5, E_4\}$$

Στη συνέχεια, εξετάζει ένα προς ένα τα στοιχεία της λίστας, για το κατά πόσο μπορούν να εκχωρηθούν στον ενεργοποιητή A_1 . Υποθέτουμε ότι ο ενεργοποιητής A_1 είναι σε θέση (διαθέτει τα απαραίτητα αποθέματα πόρων και μπορεί να ανταπεξέλθει στα deadlines των εν λόγω περιστατικών) να περατώσει τα τρία πρώτα περιστατικά της λίστας L_1 με τη σειρά στην οποία εμφανίζονται στην εν λόγω λίστα. Συνεπώς, τα τρία πρώτα συμβάντα της λίστας L_1 ανατίθενται στον ενεργοποιητή A_1 , ο οποίος θα τα επισκεφτεί με τη σειρά $\{E_2, E_1, E_3\}$.

Στην συνέχεια, ο αισθητήρας – αντιπρόσωπος εξετάζει τον ενεργοποιητή A_2 . Τα συμβάντα τα οποία πρέπει να ανατεθούν είναι τα E_4 και E_5 . Υποθέτουμε ότι οι ευκλείδειες αποστάσεις του ενεργοποιητή A_2 από τα παραπάνω συμβάντα, είναι οι εξής:

- $\text{dist}(A_2, E_4) = 2\text{m}$.
- $\text{dist}(A_2, E_5) = 1\text{m}$.

Συνεπώς, ο αισθητήρας – αντιπρόσωπος κατασκευάζει την ταξινομημένη κατά μη φθίνουσα σειρά απόστασης λίστα L_2 (βήμα 2 αλγορίθμου), η οποία έχει ως εξής:

$$L_2 = \{E_5, E_4\}$$

Στη συνέχεια, εξετάζει ένα προς ένα τα στοιχεία της λίστας, για το κατά πόσο μπορούν να εκχωρηθούν στον ενεργοποιητή A_2 . Υποθέτουμε ότι ο ενεργοποιητής A_2 είναι σε θέση (διαθέτει τα απαραίτητα αποθέματα ενέργειας και μπορεί να ανταπεξέλθει στα deadlines των εν λόγω περιστατικών) να περατώσει όλα τα περιστατικά της λίστας L_2 με τη σειρά στην οποία εμφανίζονται στην εν λόγω λίστα. Συνεπώς, τα συμβάντα της λίστας L_2 ανατίθενται στον ενεργοποιητή A_2 , ο οποίος θα τα επισκεφτεί με τη σειρά $\{E_5, E_4\}$.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα πέντε συμβάντα που εντοπίστηκαν στην εν λόγω ζώνη, καταχωρούνται στους δύο ενεργοποιητές προς περάτωση.

2. Ανάθεση καθηκόντων βασισμένη στα deadlines

Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο, οι αισθητήρες – αντιπρόσωποι κάθε ζώνης, ταξινομούν τα παρατηρημένα από τους αισθητήρες συμβάντα, κατά μη φθίνουσα σειρά (non decreasing order) ως προς τα ανώτατα χρονικά όρια περάτωσης τους (deadlines). Στη συνέχεια, τα περιστατικά ανατίθενται στον / στους ενεργοποιητή / ενεργοποιητές της ζώνης, με βάση την παραπάνω ταξινόμηση. Αν κάποιο συμβάν δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον / τους ενεργοποιητή / ενεργοποιητές της ζώνης, λόγω αυστηρών χρονικών deadlines ή υψηλών απαιτήσεων σε πόρους, τότε απορρίπτεται.

3. Ανάθεση καθηκόντων βασισμένη στις προτεραιότητες

Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο, οι αισθητήρες – αντιπρόσωποι κάθε ζώνης, ταξινομούν τα παρατηρημένα από τους αισθητήρες συμβάντα, κατά φθίνουσα σειρά (decreasing order) **προτεραιότητας (priority)**. Ειδικότερα, κάθε συμβάν E_j διαθέτει μία προτεραιότητα $P(E_j)$, η οποία υπολογίζεται από τον αισθητήρα – αντιπρόσωπο της ζώνης, με βάση τον παρακάτω τύπο [18]:

$$P(E_j) = \frac{1}{dist(A_i, E_j) \times D(E_j)} \quad (1)$$

όπου με $dist(A_i, E_j)$ συμβολίζουμε την απόσταση του περιστατικού (E_j) από τον ενεργοποιητή A_i της ζώνης, και με $D(E_j)$ το ανώτατο χρονικό όριο (deadline) περάτωσης του περιστατικού. Αφού ο αισθητήρας – αντιπρόσωπος υπολογίσει τις προτεραιότητες όλων των περιστατικών της ζώνης του, ταξινομεί τα συμβάντα κατά φθίνουσα σειρά προτεραιότητας. Στη συνέχεια, τα περιστατικά ανατίθενται στον / στους ενεργοποιητή / ενεργοποιητές της ζώνης, με βάση την παραπάνω ταξινόμηση. Αν κάποιο συμβάν δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον / τους ενεργοποιητή / ενεργοποιητές της ζώνης, λόγω αυστηρών χρονικών deadlines ή υψηλών απαιτήσεων σε πόρους, τότε απορρίπτεται. Αξίζει να σημειωθεί τέλος, ότι ο εν λόγω αλγόριθμος επιχειρεί να εξασφαλίσει συγκεντρωτικά τους στόχους των αλγορίθμων 1 και 2, ήτοι να ελαχιστοποιήσει την συνολική κίνηση των ενεργοποιητών σε επίπεδο ζώνης και ταυτόχρονα να τηρηθούν τα χρονικά deadlines των περιστατικών.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αλγορίθμων

Το βασικό πλεονέκτημα των παραπάνω ευρετικών αλγορίθμων, είναι το ότι εκτελούνται σε επίπεδο ζώνης από τους αντίστοιχους αισθητήρες – αντιπροσώπους, με αποτέλεσμα την γρήγορη εύρεση της ανάθεσης καθηκόντων στους ενεργοποιητές κάθε ζώνης.

Ένα βασικό μειονέκτημα των παραπάνω αλγορίθμων, είναι το γεγονός ότι ένα συμβάν που μπορεί να βρίσκεται πιο κοντά σε έναν ενεργοποιητή κάποιας γειτονικής ζώνης, δεν ανατίθεται σε αυτόν, μιας και οι αλγόριθμοι εκτελούνται σε κάθε ζώνη ξεχωριστά, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν σε γειτονικές ζώνες [18]. Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι, σε κανέναν από τους παραπάνω αλγορίθμους, δεν αναφέρεται ρητά με ποιά σειρά επιλέγει ο εκάστοτε αισθητήρας – αντιπρόσωπος κάθε ζώνης, να εξετάσει τους ενεργοποιητές του για πιθανή ανάθεση καθηκόντων. Για παράδειγμα, στον ψευδοκώδικα του αλγορίθμου 1, δεν διευκρινίζεται η σειρά με την οποία ο αισθητήρας – αντιπρόσωπος εξετάζει τους ενεργοποιητές της ζώνης του.

6.4.4 Inter – zone προγραμματισμός

Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τους ευρετικούς αλγορίθμους για την ανάθεση καθηκόντων, σε επίπεδο συστάδας (inter – zone προγραμματισμός) (βλ. ενότητα 6.4.1). Ουσιαστικά, στην περίπτωση του inter – zone προγραμματισμού (scheduling), οι αισθητήρες – αντιπρόσωποι σχηματίζουν μία συστάδα

(one hop) (βλ. εικόνα 6.3). Στην εν λόγω συστάδα, ένας εκ των αισθητήρων – αντιπροσώπων, εκλέγεται ως αισθητήρας – αρχηγός (Cluster Head), και αναλαμβάνει να τρέξει τους αλγορίθμους ανάθεσης καθηκόντων. Οι αισθητήρες – αντιπρόσωποι της συστάδας, αποστέλλουν στον αισθητήρα – αρχηγό τη θέση των ενεργοποιητών και των περιστατικών της ζώνης τους. Στη συνέχεια, ο αισθητήρας – αρχηγός, υπολογίζει το πρόγραμμα ανάθεσης καθηκόντων και το αποστέλλει στους αντιπροσώπους – αισθητήρες της συστάδας, οι οποίοι με τη σειρά τους το μεταδίδουν στους ενεργοποιητές της ζώνης τους.

1. Ανάθεση καθηκόντων βασισμένη στα deadlines

Αρχικά, ο αισθητήρας – αρχηγός της συστάδας, ταξινομεί τα συμβάντα που εμφανίζονται στη ζώνη του αλλά και αυτά που λαμβάνει από τους αισθητήρες – αντιπροσώπους, κατά φθίνουσα σειρά ως προς τα ανώτατα χρονικά όρια περάτωσής τους (deadlines). Στη συνέχεια, αναθέτει κάθε ένα από τα συμβάντα της ταξινομημένης λίστας, στον πλησιέστερο προς το περιστατικό ενεργοποιητή της συστάδας. Το πρόγραμμα ανάθεσης, αποστέλλεται στους αισθητήρες – αντιπροσώπους, οι οποίοι με τη σειρά τους το μεταβιβάζουν στους αντίστοιχους ενεργοποιητές. Τα βήματα του αλγορίθμου, που εκτελούνται από τον αισθητήρα – αρχηγό της συστάδας, παρουσιάζονται παρακάτω [18]:

1. Ανάθεση καθηκόντων βασισμένη στα deadlines

1. Κάθε αισθητήρας – αντιπρόσωπος της συστάδας, αποστέλλει στον αισθητήρα – αρχηγό τις εξής παραμέτρους για τους ενεργοποιητές και τα περιστατικά της ζώνης του: Την θέση των ενεργοποιητών, τη θέση των περιστατικών, τη μέγιστη ταχύτητα κίνησης των ενεργοποιητών, τα αποθέματα πόρων των ενεργοποιητών, τις απαιτήσεις σε πόρους των περιστατικών καθώς και τα deadlines των περιστατικών.
2. Ο αισθητήρας – αρχηγός της συστάδας, λαμβάνει και αποθηκεύει τις παραπάνω παραμέτρους των γειτονικών αισθητήρων - αντιπροσώπων.
3. Ταξινομεί τα περιστατικά τόσο της ζώνης του όσο και των γειτονικών ζωνών κατά μη φθίνουσα σειρά (non decreasing order) ως προς τα deadlines.
4. Αναθέτει το συμβάν στον **κοντινότερο (nearest)** ενεργοποιητή, αν και εφόσον ο τελευταίος διαθέτει επαρκείς πόρους και μπορεί να το περατώσει εντός των deadlines.
5. Προσθέτει το εν λόγω συμβάν στη λίστα καθηκόντων του ενεργοποιητή και ανανεώνει τη νέα θέση του τελευταίου.
6. Επαναλαμβάνει τα βήματα 4 και 5 μέχρις ότου να εξεταστούν όλα τα συμβάντα της ταξινομημένης λίστας.
7. Μεταδίδει το πρόγραμμα επίσκεψης των συμβάντων, σε όλους τους ενεργοποιητές της ζώνης σου.
8. Μεταδίδει το πρόγραμμα επίσκεψης των συμβάντων, σε όλους τους αισθητήρες – αντιπροσώπους που ανήκουν στην συστάδα.
9. Οι τελευταίοι, μεταδίδουν το πρόγραμμα στους ενεργοποιητές της ζώνης τους.

2. Ανάθεση καθηκόντων βασισμένη στην απόσταση

Ο ευρετικός αλγόριθμος ανάθεσης καθηκόντων βασισμένος στις αποστάσεις, είναι ακριβώς ίδιος με τον αντίστοιχο αλγόριθμο του intra – zone προγραμματισμού που παρουσιάσαμε στην ενότητα 6.4.3. Η διαφορά έγκειται στο ότι ο αλγόριθμος εκτελείται από τον αισθητήρα – αρχηγό της συστάδας (αφού πρώτα συλλέξει τις παραμέτρους του βήματος 1 του αλγορίθμου 1), και το πρόγραμμα επίσκεψης των συμβάντων μεταδίδεται σε κάθε έναν αισθητήρα – αντιπρόσωπο της ζώνης ξεχωριστά. Οι τελευταίοι με τη σειρά τους, μεταδίδουν το πρόγραμμα στους ενεργοποιητές της ζώνης τους.

3. Ανάθεση καθηκόντων βασισμένη στις προτεραιότητες

Ο ευρετικός αλγόριθμος ανάθεσης καθηκόντων βασισμένος στις προτεραιότητες, είναι ακριβώς ίδιος με τον αντίστοιχο αλγόριθμο του intra – zone προγραμματισμού που παρουσιάσαμε στην ενότητα 6.4.3. Η διαφορά έγκειται στο ότι ο αλγόριθμος εκτελείται από τον αισθητήρα – αρχηγό της συστάδας (αφού πρώτα συλλέξει τις παραμέτρους του βήματος 1 του αλγορίθμου 1), και το πρόγραμμα επίσκεψης των

συμβάντων μεταδίδεται σε κάθε έναν αισθητήρα – αντιπρόσωπο της ζώνης ξεχωριστά. Οι τελευταίοι με τη σειρά τους, μεταδίδουν το πρόγραμμα στους ενεργοποιητές της ζώνης τους.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την παράθεση των κεφαλαίων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με ενεργοποιητές αποτελούν την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Ουσιαστικά, οι λειτουργίες των WSANs είναι υπερσύνολο αυτών των WSNs, μιας και έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης διαφόρων καταστάσεων αλλά και επέμβασης επί των συγκεκριμένων φαινομένων. Η ιδιότητα αυτή της αντιμετώπισης των παρατηρημένων συμβάντων, ικανοποιείται από τους ενεργοποιητές του δικτύου, και ουσιαστικά διαφοροποιεί τα WSANs από τους προκατόχους τους (WSNs).

Η συνύπαρξη, σε ένα κοινό ασύρματο δίκτυο, των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, εγείρει διάφορα ζητήματα προς διερεύνηση στα WSANs. Μερικά από αυτά είναι η κατάλληλη τοποθέτηση των ενεργοποιητών στο χώρο του δικτύου, η διαχείριση της κινητικότητας των ενεργοποιητών, καθώς και η επικοινωνία (συντονισμός) μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών.

Μετά από την αναλυτική παρουσίαση όλων των παραπάνω ζητημάτων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, ο κρισιμότερος παράγοντας που οδηγεί σε αποτελεσματικά WSANs, είναι αυτός του συντονισμού, τόσο μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών, όσο και μεταξύ ενεργοποιητών. Ο συντονισμός, αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο μελέτης των ερευνητών του χώρου, μιας και εξασφαλίζει την έγκαιρη και αποτελεσματική επέμβαση επί των φαινομένων που καταγράφονται στο δίκτυο.

Όσον αφορά τις μελλοντικές εργασίες επί του αντικείμενου της διατριβής, κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω εμβάθυνση επί του προτεινόμενου αλγορίθμου της ενότητας 4.3.2, μέσω προσομοιώσεων και σύγκρισης των αποτελεσμάτων με υπάρχοντες αλγορίθμους της κατηγορίας. Τέλος, μιας και τα WSANs είναι σχετικά καινούργια στο πεδίο των ασύρματων δικτύων, υπάρχουν αρκετά περιθώρια για νέες προτάσεις και ιδέες πάνω σε αρκετές προκλήσεις / προβλήματα που παρουσιάσαμε στην συγκεκριμένη διατριβή.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Βιβλιογραφία

- [1] **I.F. Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam, E. Cayirci.** Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*. Elsevier, 2002, Vol. 38, no. 4, pp. 393 - 422.
- [2] **Amiya Nayak, Ivan Stojmenovic.** *Wireless Sensor and Actuator Networks. Algorithms and Protocols for Scalable Coordination and Data Communication*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [3] **D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar.** Next century challenges: scalable coordination in sensor networks. *ACM MobiCom'99*, 1999, pp. 263-270.
- [4] Professional quality weather stations and software, automotive tracking, and marine accessories by Davis. [Online] [Cited: October Thursday, 2010.] <http://www.davisnet.com/weather/products/sensors.asp>.
- [5] **Ian F. Akyildiz, Ismail H. Kasimoglu.** Wireless sensor and actor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*. Elsevier, 2004, Vol. 2, no. 4, pp. 351-367.
- [6] **Kemal Akkaya, Mohamed Younis.** "COLA: A Coverage and Latency aware Actor Placement for Wireless Sensor and Actor Networks". *In the Proceedings of IEEE VTC*. IEEE, 2006.
- [7] **Kemal Akkaya, Mohamed Younis.** C2AP: Coverage-aware and Connectivity-constrained Actor Positioning in Wireless Sensor and Actor Networks. *Performance, Computing, and Communications Conference, 2007. IPCCC 2007*. IEEE International, 2007, pp. 281-288.
- [8] **Kemal Akkaya, Ismail Guneydas, Ali Bicak.** Autonomous actor positioning in wireless sensor and actor networks using stable-matching. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*. 2010.
- [9] **Margaret H. Dunham.** *Data Mining. Εισαγωγικά και Προηγμένα Θέματα Εξόρυξης Γνώσης από Δεδομένα*. 2004.
- [10] **Sita Krishnakumar, Randal Abler.** Intelligent actor mobility in wireless sensor and actor networks. *Telecommunication Systems*. Springer Netherlands, 2009, Vol. 40, no. 3, pp. 141-149.
- [11] Mobile robot F.A.A.K. [Online] [Cited: 3 23, 2011.] <http://prt.fernuni-hagen.de/pro/faak/>.
- [12] **Ming Ma, Yuanyuan Yang.** SenCar: An Energy-Efficient Data Gathering Mechanism for Large-Scale Multihop Sensor Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2007, Vol. 18, pp. 1476-1488.
- [13] **Tommaso Melodia, Dario Pompili, Vehbi C. Gungor, Ian F. Akyildiz.** Communication and Coordination in Wireless Sensor and Actor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2007, Vol. 6, pp. 1116-1129.
- [14] **Ngai E.C.H., Lyu M.R., Jiangchuan Liu.** A Real-Time Communication Framework for Wireless Sensor-Actuator Networks. *Aerospace Conference, 2006 IEEE*. 2006.
- [15] **Shah Ghalib A., Bozyigit Muslim, Hussain Faisal B.** Cluster-based coordination and routing framework for wireless sensor and actor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2009.

[16] **Tommaso Melodia, Dario Pompili, Ian F. Akyildiz.** Handling Mobility in Wireless Sensor and Actor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2010, Vol. 9, no. 2, pp. 160-173.

[17] **Ivan Mezei, Veljko Malbasa, Ivan Stojmenovic.** Auction Aggregation Protocols for Wireless Robot-Robot Coordination. *Ad-Hoc, Mobile and Wireless Networks*. s.l. : Springer Berlin / Heidelberg, 2009, Vol. 5793, pp. 180-193.

[18] **Ka. Selvaradjou, C. Sina Ram Murthy.** On Maximizing Residual Energy of Actors in Wireless Sensor and Actor Networks. *Distributed Computing and Networking*. s.l. : Springer Berlin / Heidelberg, 2006, Vol. 4308, pp. 227-238.