

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ  
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΤΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ  
ATARRAYA**

**Κώστας Κάρουλλας**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ**



**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Μάιος 2011**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Υλοποίηση Αλγορίθμων Ελέγχου Τοπολογίας για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων  
στον προσομοιωτή Atarraya**

**Κώστας Κάρουλλας**

Επιβλέπων Καθηγητής  
Βάσος Βασιλείου

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των  
απαιτήσεων απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του  
Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2011

## Ευχαριστίες

Με την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Βασιλείου Βάσο για την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθώς και για την επίτευξη μιας άψογης συνεργασίας. Επίσης ευχαριστίες πρέπει να δοθούν στον Χαράλαμπο Σεργίου, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος αλλά και συνεργάτη του Ερευνητικού Εργαστηρίου Networks Research Lab (NetRL), που στάθηκε δίπλα μου συμβουλευοντάς με και δίνοντάς μου λύσεις σε όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα. Ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να εκφράσω στην σύντροφο μου που όλο αυτό τον καιρό ήταν δίπλα μου και με στήριζε. Στο τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με υποστήριξε με κάθε τρόπο μέχρι το τέλος.

## Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν αναμφισβήτητα μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες αυτής της εποχής και καθημερινά παρακολουθούμε τις νέες εξελίξεις, όπου η χρήση τους ολοένα και βελτιώνει το επίπεδο ζωής μας σε αρκετούς τομείς.

Στην παρούσα ατομική διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη Ιεραρχικών Μοντέλων Έλεγχου Τοπολογίας και ο τρόπος αξιοποίησης των δυνατοτήτων τους. Η χρήση τους σχετίζεται με την μείωση της ενέργειας του δικτύου, την κάλυψη περιοχής αλλά και την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Ο τελευταίος παράγοντας που αναφέρθηκε μπορεί να αποτελέσει ένα στοιχείο το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την αντιμετώπιση καταστάσεων συμφόρησης. Η αντιμετώπιση και αποφυγή καταστάσεων συμφόρησης δικτύου είτε μπορεί να διαχειριστεί με τον έλεγχο του ρυθμού ροής των πακέτων στο δίκτυο ή την μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου χρησιμοποιώντας περισσότερους κόμβους.

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται δυο πρωτόκολλα, που δημιουργήθηκαν από υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος, όπου υλοποιούν την λογική αυτή. Ο αλγόριθμος HTAP που δημιουργεί τοπολογίες ιεραρχικών δενδρικών δομών ξεκινώντας από τους κόμβους που βρίσκονται κοντά στο γεγονός που διαδραματίζεται και ο DAIPaS ξεκινώντας από το σημείο που θέλουμε να καταλήξουν τα δεδομένα.

Σκοπός της ατομικής διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η επέκταση του προσομοιωτή Attaraya έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει την λειτουργία των πιο πάνω αλγορίθμων αλλά και άλλων σχετικών αλγορίθμων με παρόμοιες ανάγκες.

Παρατηρήθηκε ότι η αξιολόγηση της υλοποίησης των αλγορίθμων και της επέκτασης, παρόλο που ήταν αρκετά περίπλοκη και περιλάμβανε αρκετούς παραμέτρους, παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

## Περιεχόμενα

|                   |                                                                    |           |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Κεφάλαιο 1</b> | <b>Εισαγωγή.....</b>                                               | <b>1</b>  |
|                   | 1.1 Κίνητρο                                                        | 1         |
|                   | 1.2 Στόχος και συνεισφορά της Ατομικής Διπλωματικής Εργασίας       | 2         |
|                   | 1.3 Οργάνωση κειμένου                                              | 2         |
| <b>Κεφάλαιο 2</b> | <b>Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων .....</b>                            | <b>3</b>  |
|                   | 2.1 Γενικά                                                         | 3         |
|                   | 2.2 Προκλήσεις Ανάπτυξης                                           | 4         |
|                   | 2.3 Κατηγορίες Εφαρμογών                                           | 6         |
|                   | 2.4 Αρχιτεκτονική Κόμβου Αισθητήρα                                 | 7         |
|                   | 2.5 Στοιβα Πρωτοκόλλων                                             | 9         |
| <b>Κεφάλαιο 3</b> | <b>Έλεγχος Τοπολογίας.....</b>                                     | <b>12</b> |
|                   | 3.1 Ορισμός.                                                       | 12        |
|                   | 3.2 Κίνητρα δημιουργίας και ύπαρξης Ελέγχου Τοπολογίας             | 13        |
|                   | 3.3 Δομικά στοιχεία Σχεδιασμού Μηχανισμού Ελέγχου Τοπολογίας.      | 15        |
|                   | 3.4 Ιεραρχικές Τοπολογίες                                          | 16        |
| <b>Κεφάλαιο 4</b> | <b>Ο Αλγόριθμος Hierarchical Tree Alternative Path .....</b>       | <b>18</b> |
|                   | 4.1 Εισαγωγή                                                       | 18        |
|                   | 4.2 Περιγραφή Δομής Αλγορίθμου                                     | 19        |
|                   | 4.3 Hierarchical Flooding                                          | 20        |
|                   | 4.4 Hierarchical Tree Alternative Path                             | 21        |
|                   | 4.5 Alternative Path Creation                                      | 22        |
|                   | 4.6 Hierarchical Tree Creation                                     | 24        |
|                   | 4.7 Συντήρηση Τοπολογίας                                           | 24        |
| <b>Κεφάλαιο 5</b> | <b>Ο Αλγόριθμος Dynamic Alternative Path Selection Scheme.....</b> | <b>26</b> |
|                   | 5.1 Εισαγωγή                                                       | 26        |

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2 Μέθοδος Ελέγχου Συμφόρησης Δικτύου : Έλεγχος Πόρων                         | 27        |
| 5.3 Περιγραφή Δομής Αλγορίθμου                                                 | 28        |
| 5.4 Φάση Εγκατάστασης                                                          | 29        |
| 5.5 Βασικοί Μηχανισμοί                                                         | 31        |
| <b>Κεφάλαιο 6    Ο Προσομοιωτής Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων Atarraya ....</b> | <b>34</b> |
| 6.1 Εισαγωγή.                                                                  | 34        |
| 6.2 Περιγραφή εσωτερικής δομής Atarraya                                        | 35        |
| 6.3 Διαχείριση γεγονότων και η δομή των πρωτοκόλλων.                           | 38        |
| 6.4 Το περιβάλλον εργασίας του Atarraya                                        | 40        |
| <b>Κεφάλαιο 7    Υλοποίηση Αλγορίθμων στο Atarraya.....</b>                    | <b>44</b> |
| 7.1 Επεκτάσεις.                                                                | 44        |
| 7.2 Περιορισμοί                                                                | 45        |
| <b>Κεφάλαιο 8    Αξιολόγηση Υλοποίησης.....</b>                                | <b>47</b> |
| 8.1 Κριτήρια Αξιολόγησης                                                       | 47        |
| 8.2 Αξιολόγηση Υλοποίησης HTAP                                                 | 48        |
| 8.3 Αξιολόγηση Υλοποίησης DAIPaS                                               | 50        |
| 8.4 Σχόλια                                                                     | 53        |
| <b>Κεφάλαιο 9    Συμπεράσματα .....</b>                                        | <b>54</b> |
| 9.1 Συμπεράσματα                                                               | 54        |
| 9.2 Μελλοντική δουλειά                                                         | 55        |
| <b>Β ι β λ ι ο γ ρ α φ ί α .....</b>                                           | <b>57</b> |

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

---

|                                                              |   |
|--------------------------------------------------------------|---|
| 1.1 Κίνητρο                                                  | 1 |
| 1.2 Στόχος και συνεισφορά της Ατομικής Διπλωματικής Εργασίας | 2 |
| 1.3 Οργάνωση κειμένου                                        | 2 |

---

### 1.1 Κίνητρο

Το πεδίο έρευνας Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων είναι στο προσκήνιο εδώ και μερικά χρόνια και δεν παύει να απασχολεί και σε ακαδημαϊκό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο βιομηχανίας. Το γεγονός αυτό, το επιβεβαιώνει το μεγάλο μέγεθος ερευνητικών άρθρων που εκδίδονται αλλά και οι εξελίξεις της τεχνολογίας που βασίζονται σ' αυτό το ερευνητικό πεδίο.

Παρακολουθώντας έτσι την τεχνολογία των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων σε τόσο υψηλό βαθμό χρήσης, ήταν αναμενόμενο να παρουσιαστούν κάποιες ανάγκες. Δηλαδή, απαιτήσεις υποστήριξης από νέους αλγόριθμους, τεχνικές και πρωτόκολλα αφού αποτελεί μια νέα τεχνολογία με νέες και διαφορετικές ανάγκες.

Η δοκιμή καινούργιων αλγορίθμων γίνεται συνήθως σε κάποιο πειραματικό περιβάλλον, για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους, αλλά και λόγους ασφάλειας. Έτσι στην περίπτωση μας τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων χρειάζονται υποστήριξη από κάποιους προσομοιωτές.

## **1.2 Στόχος και συνεισφορά της Ατομικής Διπλωματικής Εργασίας**

Ο στόχος της παρούσας Ατομικής Διπλωματικής Εργασίας είναι η προσπάθεια ενσωμάτωσης αλγορίθμων που αξιοποιούν τις τοπολογίες για θέματα συμφόρησης σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης τοπολογιών. Το περιβάλλον προσομοίωσης είναι το Atarraya, που περιλαμβάνει αρκετούς αλγόριθμους τοπολογίας. Το γεγονός αυτό θα μας δώσει τη δυνατότητα πιθανής αξιοποίησης των αλγορίθμων αυτών, σε συνδυασμό με τους αλγορίθμους που ασχοληθήκαμε. Κατά την προσπάθεια ενσωμάτωσης των αλγορίθμων, υπήρξε ανάγκη επέκτασης του προσομοιωτή για να αποτελέσει ένα ικανό εργαλείο σε θέματα διαχείρισης Ελέγχου Συμφόρησης και όχι μόνο Ελέγχου Τοπολογίας.

## **1.3 Οργάνωση κειμένου**

Αρχικά στο Κεφάλαιο 2 της Ατομικής Διπλωματικής Εργασίας αυτής παρουσιάζεται κάποιο απαιτούμενο υπόβαθρο και ορολογίες σχετικά με τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Αναφέρονται κάποιες προκλήσεις ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής και σε ποιους τομείς έχει γίνει η ανάπτυξη αυτή. Στην συνέχεια ακολουθεί μια περιγραφή των μονάδων που απαρτίζουν ένα Κόμβο Αισθητήρα και γενικότερα η περιγραφή και κατανομή των καθηκόντων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων σύμφωνα με τη Στοίβα Πρωτοκόλλων. Στο Κεφάλαιο 3, δίνεται ορισμός της έννοιας Ελέγχου Τοπολογίας και γίνεται κάποια περεταίρω επεξήγηση γύρω από τον τομέα αυτό, όπως για παράδειγμα η υποστήριξη του λόγου ύπαρξης τέτοιων μηχανισμών. Δίνεται επίσης μια μικρή περιγραφή της έννοιας των Ιεραρχικών Τοπολογιών αφού οι αλγόριθμοι που θα περιγραφούν στην συνέχεια ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία. Τα Κεφάλαια 4 και 5 περιγράφουν τον τρόπο λειτουργίας των αλγορίθμων, Hierarchical Tree Alternative Path και Dynamic Alternative Path Selection Scheme αντίστοιχα. Στο Κεφάλαιο 6 ακολουθεί περιγραφή της δομής του προσομοιωτή Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων Atarraya. Ακολούθως γίνεται επεξήγηση σημαντικών στοιχείων της υλοποίησης των αλγορίθμων στον προσομοιωτή Atarraya, στο Κεφάλαιο 7. Κλείνοντας, τα Κεφάλαια 8 και 9 δίνουν την Αξιολόγηση της υλοποίησης και την παρουσίαση των τελικών Συμπερασμάτων αντίστοιχα.

## Κεφάλαιο 2

### Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

---

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 2.1 Γενικά                         | 3 |
| 2.2 Προκλήσεις Ανάπτυξης           | 4 |
| 2.3 Κατηγορίες Εφαρμογών           | 6 |
| 2.4 Αρχιτεκτονική Κόμβου Αισθητήρα | 7 |
| 2.5 Στοιβά Πρωτοκόλλων             | 9 |

---

#### 2.1 Γενικά

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks) είναι δίκτυα που αποτελούνται από συνδεδεμένους κόμβους, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα περισυλλογής κάποιων δεδομένων και την μεταφορά τους σε κάποιο κεντρικό σημείο (sink). Αυτές οι συσκευές μπορεί να έχουν διάφορους αισθητήρες, όπως για μέτρηση θερμοκρασίας, ήχου, δόνησης, πίεσης ή ακόμα και κίνησης.

Τα βασικά συστατικά που μπορεί να απαρτίζουν αυτά τα δίκτυα είναι [1]:

- I. Η συγκρότηση καταναμεμένων ή τοπικών αισθητήρων.
- II. Ένα μέσο Διασύνδεσης και Δικτύωσης.
- III. Ένα κεντρικό σημείο συγκέντρωσης των πληροφοριών.
- IV. Ένα μηχανισμό υπολογισμών που είναι υπεύθυνο για την διαχείριση και επεξεργασία των πληροφοριών που φτάνουν στο κεντρικό σημείο.

Με αυτά τα συστατικά μπορούμε να έχουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα, το οποίο αποτελείται από αισθητήρες μικρού κόστους, που είναι συνδεδεμένοι με ασύρματη συνήθως τεχνολογία επικοινωνίας. Είναι τοποθετημένοι σ' ένα καταναμημένο περιβάλλον και είναι υπεύθυνοι για την παρακολούθηση διαφόρων φαινομένων και την ασφαλή μεταφορά των δεδομένων σε ένα κεντρικό σημείο για περαιτέρω επεξεργασία ή και για αποθήκευση.

Το γεγονός ότι βρίσκονται σε ένα καταναμημένο περιβάλλον δίνει μεγαλύτερες δυνατότητες παρακολούθησης κάποιου φαινομένου σε αντίθεση με τις πληροφορίες που θα συλλέγαμε από μόνο ένα κόμβο αισθητήρα. Επίσης σε αρκετές περιπτώσεις οι κόμβοι μπορούν να συνδεθούν με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε οι τοπολογίες να μπορούν να τους δώσουν την δυνατότητα να ξεπεράσουν φυσικά εμπόδια.

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΔΑ) αποτελούν ένα πεδίο έρευνας που αναπτύσσεται ολοένα και με γρηγορότερους ρυθμούς στον τομέα των ασυρμάτων επικοινωνιών και των καταναμημένων δικτύων. Όμως διαφέρουν κατά πολύ σε θέματα υποδομής και πρωτοκόλλων από τις βασικές υπάρχουσες τεχνολογίες, αφού διέπονται από πολλούς περιορισμούς. Πολλά προβλήματα είναι βασισμένα στην εφαρμογή που θέλουμε να αναπτύξουμε, δηλαδή το τελικό σύστημα μπορεί να καθορίζει νέους περιορισμούς που αποτελούν προκλήσεις στον τομέα σήμερα.

## **2.2 Προκλήσεις Ανάπτυξης**

Είναι αλήθεια ότι σήμερα τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων αποτελούν θέμα μελέτης και ερευνών σε ακαδημαϊκό και όχι μόνο επίπεδο. Αυτό οδήγησε στη ραγδαία ανάπτυξη τους όπου σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες δυνατότητες της τεχνολογίας, τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων πρόσφεραν σε αρκετούς τομείς της κοινωνίας.

Παρόλα αυτά κάποιοι παράγοντες εμποδίζουν την ανάπτυξη τους σε μεγαλύτερη κλίμακα και την αποδοχή τους στο ευρύτερο κοινό. Μερικοί από αυτούς περιγράφονται πιο κάτω [2]:

**Η διάρκεια ζωής του δικτύου:** Η σημαντικότερη ίσως παράμετρος, αφού όσες λειτουργικότητες και να έχει το δίκτυο χωρίς ενέργεια το καθιστά ανενεργό. Κάθε κόμβος τροφοδοτείται από μια μπαταρία όπου αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε όλες τις λειτουργικότητες του κόμβου.

**Επεκτασιμότητα:** Αρκετοί αλγόριθμοι και πρωτόκολλα μπορούν να εγγυηθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μια μικρή κλίμακα, λαμβάνοντας υπόψη πάντα το θέμα ενέργειας. Δυστυχώς, δεν μπορούν να εγγυηθούν τα ίδια αποτελέσματα και σε μια πολύ μεγαλύτερη κλίμακα.

**Διασύνδεση:** Για αρκετές εφαρμογές είναι πιθανόν να υπάρχει η ανάγκη διασύνδεσης του κόμβου με κάποια συσκευή που είναι και αυτή στο δίκτυο. Αυτό όμως προϋποθέτει νέα πρωτόκολλα και μηχανισμούς για αυτή την επιπλέον διασύνδεση και την μεταφορά των δεδομένων. Συνήθως τέτοιου είδους προβλήματα επιλύονται με την χρήση μιας ενδιάμεσης συσκευής που να μπορεί να κάνει κάπου είδους μετατροπές/μεταφράσης για την διαφορετική συσκευή.

**Αξιοπιστία:** Ανάλογα με την εφαρμογή οι κόμβοι πρέπει να μπορούν να παρέχουν κάποιο επίπεδο αξιοπιστίας αν χρειάζεται. Όπως για παράδειγμα ο καθορισμός κάποιου βαθμού ανεκτικότητας για χάσιμο πακέτων.

**Ανομοιογένεια:** Διαφορετικές οικογένειες κόμβων μπορεί να χρειάζεται να συνυπάρχουν στο δίκτυο όμως πάλι και σε αυτή την περίπτωση αρκετά πρωτόκολλα μπορεί να μην είναι συμβατά με κάποια από τις συγκεκριμένες οικογένειες κόμβων.

**Ασφάλεια:** Όπως σε κάθε δίκτυο η ασφάλεια του διαδραματίζει σημαντικό ρόλο έτσι και στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Εδώ η δυσκολία παρουσιάζεται αφού οι γνωστοί μηχανισμοί χρειάζονται αρκετή υπολογιστική δύναμη και ενέργεια. Έτσι θα πρέπει να σχεδιαστούν νέοι αλγόριθμοι και πρωτόκολλα με σχετικά λιγότερη πολυπλοκότητα.

Λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα *Ενέργεια* οι πιο πάνω προκλήσεις γίνονται ακόμα πιο δύσκολες. Αφού για την επίτευξη τους δεν πρέπει απλά να βρούμε μόνο αποτελεσματικές λύσεις αλλά σε κάθε περίπτωση πρέπει να έχουμε περιορισμένη

κατανάλωση Ενέργειας. Στο τέλος της ημέρας ένας σημαντικός παράγοντας είναι και ο χρόνος ζωής του δικτύου. Έτσι σε κάθε επίπεδο κατά το σχεδιασμό πρέπει να προτείνονται αλγόριθμοι με χαμηλό κόστος ενέργειας.

### **2.3 Κατηγορίες Εφαρμογών**

Όπως ήταν αναμενόμενο με την εμφάνιση τους τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων μπήκαν στην βιομηχανία με ένα πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω της μεγάλης ευελιξίας και των πολλών δυνατοτήτων που μπορούν να μας προσφέρουν. Με μια πληθώρα εφαρμογών σε παρά πολλούς τομείς, έχουν σκοπό να αλλάξουν τον τρόπο ζωής μας. Πιο κάτω παρουσιάζονται μερικοί τομείς όπου τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων έχουν ήδη εφαρμοστεί :

**Στρατιωτικές Εφαρμογές:** Μερικές περιπτώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι σαν μηχανισμοί παρακολούθησης περιοχής, εντοπισμός κινητού στόχου και ανίχνευση εισβολέα [3].

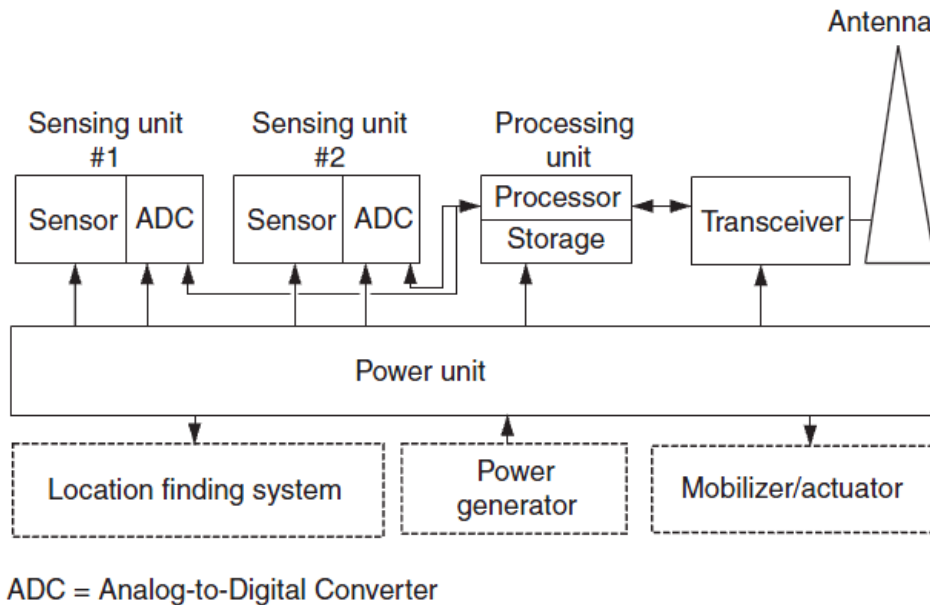
**Περιβαλλοντικές Εφαρμογές:** Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για γεωργικούς σκοπούς όπως για παράδειγμα μηχανισμούς ελέγχου συστημάτων άρδευσης ανάλογα με την υγρασία του εδάφους. Επίσης χρησιμοποιούνται για συστήματα πυρανίχνευσης αλλά και σε μετεωρολογικά κέντρα.

**Ιατρικές Εφαρμογές:** Είναι επίσης διαδεδομένα στον τομέα της ιατρικής αφού σε πολλά μοντέρνα κέντρα υπάρχουν Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων που παρακολουθούν την κατάσταση του ασθενή αλλά και της διαχείρισης της δοσολογίας των φαρμάκων.

**Εφαρμογές Αυτοματοποίησης:** Συστήματα αυτοματοποίησης εσωτερικών καθημερινών λειτουργιών διευκόλυνσης που συχνά ονομάζονται Έξυπνα-Σπίτια.

## 2.4 Αρχιτεκτονική Κόμβου Αισθητήρα

Από μια διαφορετική όψη, ένας κόμβος αισθητήρα αποτελείται από διάφορους μηχανισμούς και ηλεκτρονικά μέρη.



Σχήμα 2.1: Δομικά στοιχεία ενός κόμβου αισθητήρα.[1]

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.1 ένας κόμβος αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη [16]:

**Μονάδα Αίσθησης (Sensing Unit):** Αποτελείται από δυο κυρίως μέρη. Τον αισθητήρα και τον μετατροπέα Αναλογικού σήματος ως Ψηφιακού. Έτσι ο αισθητήρας μετά από τις παρατηρήσεις, παράγει το Αναλογικό σήμα όπου περνά πρώτα από τον μετατροπέα για ψηφιοποίηση και μετά πάει κατευθείαν για επεξεργασία στην Μονάδα Επεξεργασίας (Processing Unit).

**Μονάδα Επεξεργασίας (Processing Unit):** Αυτή είναι η μονάδα επεξεργασίας που αφού πάρει τα δεδομένα από τη Μονάδα Αίσθησης (Sensing Unit) και εκτελέσει την ανάλογη προγραμματισμένη διαδικασία του τα περνά στην Μονάδα Πομποδέκτη (Transceiver Unit). Σε αυτήν την μονάδα υπάρχει και μια μικρή μνήμη που μπορεί να χρησιμοποιεί ο επεξεργαστής κατά την επεξεργασία δεδομένων.

**Μονάδα Πομποδέκτη (Transceiver Unit):** Ο πομποδέκτης είναι το στοιχείο που συνδέει τον κόμβο με το υπόλοιπο δίκτυο που έχει ως απώτερο σκοπό την προώθηση των δεδομένων.

**Μονάδα Ενέργειας (Power Unit):** Η μονάδα που είναι υπεύθυνη για την τροφοδοσία των υπόλοιπων μονάδων, όπου συνήθως είναι μπαταρίες τύπου (AA).

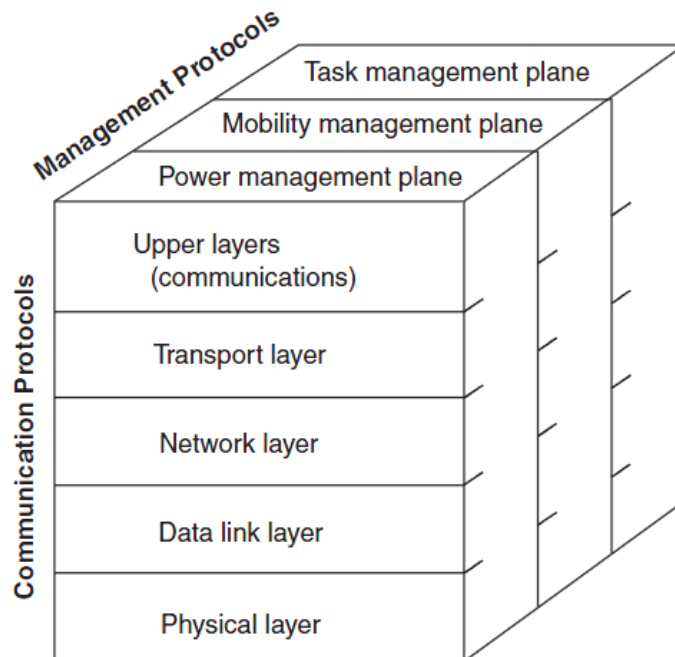
Τα επιπρόσθετα μέρη ενός κόμβου αισθητήρα είναι:

**Σύστημα Εύρεσης Τοποθεσίας (Location Finding System):** Η μονάδα η οποία υπολογίζει την ακριβή τοποθεσία της συσκευής, όπου συνήθως χρησιμεύει σε διάφορες τεχνικές δρομολόγησης ή σε διάφορες άλλες λειτουργίες που απαιτούν την ακριβή τοποθεσία της συσκευής.

**Γεννήτρια Ηλεκτρισμού (Power Generator):** Μια υποβοηθητική μονάδα που μπορεί να τροφοδοτεί τις επαναφορτιζόμενες πηγές της συσκευής, όπως τα ηλιακά κύτταρα.

**Μηχανισμός Κίνησης (Mobilizer):** Η μονάδα η οποία θα μετακινεί την συσκευή αν χρειάζεται.

## 2.5 Στοιβά Πρωτοκόλλων



Σχήμα 2.2: Στοιβά Πρωτοκόλλων για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.[1]

Παρόμοια δομή με τη Σουίτα Πρωτοκόλλων του Διαδικτύου (Internet Protocol Suite), έτσι και στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η Στοιβά Πρωτοκόλλων αποτελείται από τα πέντε βασικά επίπεδα [1]:

**Ψηλότερα Στρώματα Επικοινωνίας (Upper Layers):** Σε αυτό το επίπεδο συμπεριλαμβάνονται τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται από τις εφαρμογές για να διεκπεραιώσουν διαδικτυακή επικοινωνία. Οι εφαρμογές που απαρτίζουν το συγκεκριμένο επίπεδο μπορεί να υποδιαιρεθούν στις εξής κατηγορίες :

**Sensor Management Protocol (SMP):** Πρωτόκολλα διαχείρισης που παρέχουν τη λειτουργία ενός λογισμικού που απαιτείται για την εκτέλεση διοικητικών (administrative) καθηκόντων σχετικά με το δίκτυο.

**Task Assignment and Data Advertisement Protocol (TADAP):** Οι χρήστες μπορούν να εκφράσουν το ενδιαφέρον τους για κάποιο γεγονός είτε

συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του, αποστέλλοντας πληροφορίες σε έναν κόμβο αισθητήρα, σε ένα υποσύνολο των κόμβων ή σε ολόκληρο το δίκτυο.

**Sensor Query and Data Dissemination Protocol (SQDDP):** Παρέχει εφαρμογές με συγκεκριμένες διεπαφές που παρέχουν την δυνατότητα εκτέλεσης ερωτημάτων, απαντήσεων σε ερωτήματα και της συλλογής των εισερχόμενων μηνυμάτων.

**Στρώμα Μεταφοράς (Transport Layer):** Γίνεται ο έλεγχος της ροής των δεδομένων που ανταλλάζουν οι κόμβοι με την εφαρμογή. Γενικά διαχειρίζεται τη διάδοση, τη συσσώρευση, την αποθήκευση και την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων (caching).

**Στρώμα Δικτύου (Network Layer):** Αυτό το επίπεδο διαχειρίζεται την δρομολόγηση των δεδομένων, η οποία είναι προσαρμόσιμη σύμφωνα με την διαχείριση της τοπολογίας.

**Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων (Data Link Layer):** Σε αυτό το επίπεδο συμπεριλαμβάνονται τα πρωτόκολλα που διαχειρίζονται τα κανάλια επικοινωνίας. Τα πρωτόκολλα λαμβάνουν υπόψη τον παράγοντα ενέργειας και τις συγκρούσεις (Collisions). Γενικά το Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων είναι υπεύθυνο για την πολυπλεξία των δεδομένων και την ανίχνευση των πλαισίων.

**Φυσικό Στρώμα (Physical Layer):** Στο επίπεδο αυτό τα πρωτόκολλα περιγράφουν τον τρόπο ανταλλαγής δεδομένων μέσα από τα κανάλια επικοινωνίας. Γενικά το Φυσικό Στρώμα είναι υπεύθυνο για την επιλογή της συχνότητας του καναλιού επικοινωνίας τους, δημιουργία της αναγκαίας συχνότητας, ανίχνευση σήματος και τελικά την κωδικοποίησης των δεδομένων για παροχή ασφάλειας.

Παράλληλα για κάθε ένα από τα επίπεδα πρωτοκόλλων επικοινωνίας αυτή η στοίβα λαμβάνει υπόψη και τα επίπεδα διαχείρισης πρωτοκόλλων τα οποία περιλαμβάνουν:

**Πλάνο διαχείρισης Ενέργειας (Power Management Plane):** Αυτό το πλάνο περιγράφει πως θα γίνεται η διαχείριση ενέργειας σε σχέση με τα προηγούμενα επίπεδα

που αναφέραμε. Σε κάθε ένα από αυτά λαμβάνουμε υπόψη πρώτιστα το Πλάνο διαχείρισης Ενέργειας αφού είναι και το σημαντικότερο. Στην πράξη ένας κόμβος μπορεί να απενεργοποιήσει τον δέκτη του εξοικονομώντας ενέργεια αλλά και παράλληλα για να αποφύγει την παραλαβή του ίδιου πακέτου πάνω από μια φορά. Άλλο ένα τέτοιο παράδειγμα είναι όταν ένας κόμβος έχει λιγοστά αποθέματα ενέργειας τότε μεταδίδει στους γείτονες του ότι δεν μπορεί να συμμετάσχει ξανά σε οποιαδήποτε δρομολόγηση πακέτων και απλά η ενέργεια που του απέμεινε σπαταλείται για την λειτουργία του αισθητήρα του.

**Πλάνο διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Plane):** Έχει σαν κύριο σκοπό την ανίχνευση και την καταγραφή οποιασδήποτε κίνησης κάποιου κόμβου έτσι ώστε να μην χάνεται το αρχικό μονοπάτι προς την κεντρική μονάδα (sink). Επίσης με αυτό τον τρόπο μπορούν οι κόμβοι να είναι ενήμεροι με σωστά δεδομένα γειτνίασης .

**Πλάνο διαχείρισης Εργασιών (Task Management Plane):** Εδώ γίνεται χρονοπρογραμματισμός και υπολογισμός των εισερχόμενων εργασιών για μια συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι δεν χρειάζεται όλοι οι κόμβοι τις περιοχής να κάνουν τις ίδιες ενέργειες.

## Κεφάλαιο 3

### Έλεγχος Τοπολογίας

---

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Ορισμός.                                                  | 12 |
| 3.2 Κίνητρα δημιουργίας και ύπαρξης Ελέγχου Τοπολογίας        | 13 |
| 3.3 Δομικά στοιχεία Σχεδιασμού Μηχανισμού Ελέγχου Τοπολογίας. | 15 |
| 3.4 Ιεραρχικές Τοπολογίες                                     | 16 |

---

#### 3.1 Ορισμός.

Έλεγχος Τοπολογίας (Topology Control) είναι η ανασυγκρότηση και διευθέτηση συγκεκριμένων παραμέτρων των κόμβων και των τρόπων λειτουργίας τους σε συχνά χρονικά διαστήματα, αλλάζοντας την τοπολογία του δικτύου με σκοπό την επέκταση της διάρκειας ζωής του, διατηρώντας κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά όπως τον τρόπο διασύνδεσης και την κάλυψη περιοχής ενός δικτύου [4].



Σχήμα 3.1: Κύκλος Ζωής Ελέγχου Τοπολογίας [2]

Όπως παρατηρούμε και από το Σχήμα 3.1, όλη η διαδικασία του Ελέγχου Τοπολογίας είναι επαναλαμβανόμενη. Αρχικά στη Φάση της Αρχικοποίησης οι κόμβοι προσπαθούν να ανιχνεύσουν γειτονικούς κόμβους σε σχέση με την εμβέλεια τους και τελικά

προσπαθούν να φτιάξουν την αρχική τοπολογία. Στην συνέχεια στην Φάση Κατασκευής της Τοπολογίας αναδιοργανώνονται οι κόμβοι σε μια καλύτερη τοπολογία με κύριο στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και οποιαδήποτε άλλη παράμετρος δοθεί στον αλγόριθμο τοπολογίας. Κατά την διάρκεια ανταλλαγής μηνυμάτων στο δίκτυο μπορεί κάποιο γεγονός να επηρεάσει την τοπολογία του δικτύου. Έτσι είτε αυτός ο παράγοντας είναι εξωτερικός, είτε αν κάποιος κόμβος βγήκε εκτός λειτουργίας για κάποιο λόγο έρχεται η Φάση της Συντήρησης Τοπολογίας ανασυγκροτώντας μια άλλη αποδοτική πιθανή τοπολογία.

### **3.2 Κίνητρα δημιουργίας και ύπαρξης Ελέγχου Τοπολογίας**

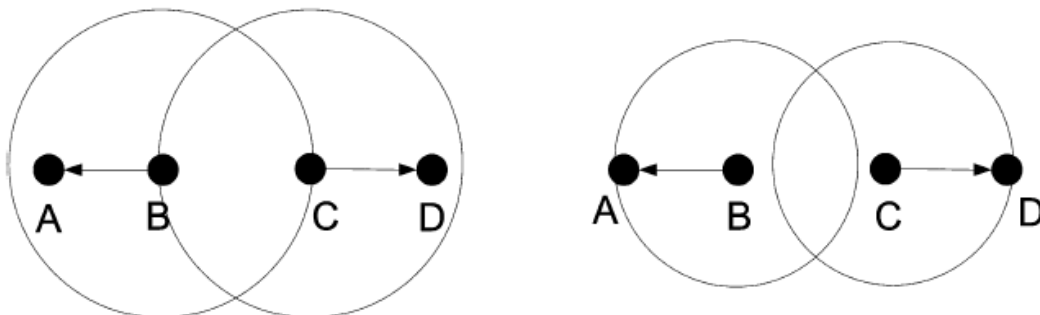
Οι διάφοροι αλγόριθμοι αλλά και μηχανισμοί Ελέγχου Τοπολογίας σχεδιάζονται για να ικανοποιήσουν διάφορες ανάγκες που προκύπτουν από τους περιορισμούς των εφαρμογών. Συνήθως έχουν την τάση να μειώνουν αρχικές τοπολογίες, δηλαδή μπορούν να αναπαριστούν το ίδιο δίκτυο με περιορισμούς κάλυψης και συνδεσιμότητας, αλλά με λιγότερους κόμβους ή και λιγότερες μεταξύ τους συνδέσεις. Πιο κάτω παρουσιάζονται μερικοί από του λόγους για τους οποίους ο Έλεγχος Τοπολογίας και η έρευνα γύρω από αυτό το πεδίο τον καθιστά αναγκαίο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [2]:

**Εξοικονόμηση Ενέργειας:** Ένα κύριο χαρακτηριστικό του Ελέγχου Τοπολογίας (ET) είναι η εξοικονόμηση ενέργειας και η διατήρηση σημαντικών παραμέτρων λειτουργικότητας του δικτύου όπως την συνδεσιμότητα και την κάλυψη του δικτύου. Εδώ για παράδειγμα μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές που μεταβάλλουν την ενέργεια μετάδοσης ή ακόμη και την απενεργοποίηση κάποιων κόμβων.

**Αποφυγή Συγκρούσεων:** Μια ακόμη σημαντική δυνατότητα που μπορεί να προσφέρει ο ET είναι η αποφυγή συγκρούσεων (Collisions) μεταξύ πακέτων σε επίπεδο Στρώματος Ζεύξης Δεδομένων (Data Link). Φτιάχνοντας δηλαδή μειωμένες τοπολογίες, όπως αυτές του Ελάχιστου Γεννητικού Δέντρου (Minimum Spanning Tree), μπορούμε να αποφύγουμε τέτοιες συγκρούσεις και ως επακόλουθο αποφεύγουμε τις αναμεταδώσεις των πακέτων, που έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση της ενέργειας.

**Αύξηση χωρητικότητας δικτύου:** Αναφερόμαστε σε δύο διαφορετικά επίπεδα. Αρχικά σε επίπεδο Φυσικού Στρώματος (Physical Layer), απώτερο σκοπό έχουμε τη μείωση των παρεμβολών (Interference). Με το να μειώσουμε την ενέργεια μετάδοσης μειώνουμε την εμβέλεια μετάδοσης και μπορούμε να αποφύγουμε το πρόβλημα Εκτεθειμένου Τερματικού (Exposed Terminal). Για παράδειγμα το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει πως μπορούμε να βρεθούμε σε αυτή την κατάσταση όταν δυο κόμβοι B και C θέλουν να μεταδώσουν δεδομένα σε άλλους δυο κόμβους, τους A και D αντίστοιχα. Όμως δεν είναι δυνατό να το πράξουν ταυτόχρονα αφού και οι δύο αυτοί αρχικοί κόμβοι βρίσκονται εντός του πεδίου κάλυψης ο ένας του άλλου. Έτσι για αποφυγή των παρεμβολών μπορεί να μειωθεί η ενέργεια μετάδοσης.

Από μια άλλη όψη μπορούμε να δούμε την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου με την έννοια εμπλοκής νέων κόμβων όπου αυτό απώτερο σκοπό θα έχει τη διαχείριση υπερφορτωμένων δικτύων.



Σχήμα 3.2: Το πρόβλημα Εκτεθειμένου Τερματικού (Exposed Terminal) [2]

### 3.3 Δομικά στοιχεία Σχεδιασμού Μηχανισμού Ελέγχου Τοπολογίας.

Μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον Σχεδιασμό κάποιου αποδοτικού μηχανισμού Ελέγχου Τοπολογίας (Topology Control) είναι [2]:

**Κατανεμημένος Αλγόριθμος (Distributed algorithm):** Οι συγκεντρωτικοί μηχανισμοί Ελέγχου Τοπολογίας χρειάζονται γενικές πληροφορίες του δικτύου έτσι ως επακόλουθο να έχουν μεγάλο κόστος στην υλοποίηση τους.

**Τοπική Πληροφόρηση (Local information):** Οι κόμβοι πρέπει να μπορούν να παίρνουν αποφάσεις για τον έλεγχο τοπολογίας τοπικά. Αυτό καθιστά τον μηχανισμό επεκτάσιμο και μειώνει το κόστος ενέργειας.

**Ανάγκη για γνώση Τοποθεσίας (Need of location information):** Οι μηχανισμοί που χρειάζονται επιπλέον υλικό (hardware) ή επιπλέον μηχανισμούς υποστήριξης, αυξάνουν το κόστος υλοποίησης και το κόστος από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας. Ένα παράδειγμα είναι η ανάγκη για γνώση της ακριβή του τοποθεσίας μέσω GPS συστήματος ή μέσω κάποιου πρωτοκόλλου εντοπισμού τοποθεσίας .

**Συνδεσιμότητα (Connectivity):** Είναι σημαντικό οι κόμβοι να παραμείνουν συνδεδεμένοι με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορούν να αλλάζουν πληροφορίες τόσο μεταξύ τους, όσο και με της κεντρικές μονάδες (sink).

**Κάλυψη περιοχής (Coverage):** Οι μηχανισμοί που συγκεντρώνονται στην κάλυψη περιοχής, πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους ότι οι κόμβοι πρέπει να καλύπτουν την περιοχή που χρειάζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις τις εφαρμογής.

**Μικρός αριθμός γειτονικών κόμβων (Small node degree):** Οι μηχανισμοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους τον αριθμό γειτονικών κόμβων. Οι κόμβοι πρέπει να έχουν σχετικά μικρό αριθμό γειτόνων έτσι ώστε να συμβαίνουν λιγότερες συγκρούσεις και αναμεταδώσεις, εξοικονομώντας ενέργεια.

**Σύνδεση διπλής κατεύθυνσης (Link bidirectionality):** Οι συνδέσεις διπλής κατεύθυνσης διευκολύνουν την σωστή λειτουργία κάποιων πρωτοκόλλων Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC Layer), όπως αυτό που χρησιμοποιείται από το σύνολο προτύπων του IEEE 802.11.

**Απλότητα (Simplicity):** Οι μηχανισμοί πρέπει να είναι απλοί, δηλαδή να έχουν μικρή υπολογιστική πολυπλοκότητα.

**Χαμηλή πολυπλοκότητα μηνυμάτων (Low message complexity):** Οι μηχανισμοί πρέπει να λειτουργούν με μικρό επιπρόσθετο κόστος μηνυμάτων (overhead), που επιτρέπουν την δράση του μηχανισμού πολλαπλές φορές σε ένα κύκλο ζωής του δικτύου, αφού θα εξοικονομούν περισσότερη ενέργεια.

**Χρόνος Σύγκλισης (Convergence time):** Οι μηχανισμοί πρέπει να έχουν σαν μια κύρια παράμετρο δημιουργίας του δικτύου, τον χρόνο δημιουργίας του και τον αριθμό των βημάτων εκτέλεσης του.

**Αποδοτικότητα Ενέργειας (Energy-efficiency):** Οι μηχανισμοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την αποδοτικότητα ενέργειας, αυτό μπορεί να εξαρτηθεί από πολλές παραμέτρους, δηλαδή θα πρέπει να πληρούν σχεδόν όλους τους προηγούμενους μηχανισμούς.

### 3.4 Ιεραρχικές Τοπολογίες

Όπως και σε άλλες περιπτώσεις δικτύωσης, ο σχηματισμός μιας ιεραρχίας μπορεί να δώσει το σημαντικό πλεονέκτημα ύπαρξης ενός πολύ απλού μηχανισμού προώθησης δεδομένων αφού η δένδρική ιεραρχική τοπολογία εξυπηρετεί κάποιο συγκεκριμένο σκοπό. Επίσης δίνει μεγαλύτερες δυνατότητες επίβλεψης και παρακολούθησης των κόμβων. Δυστυχώς όμως προκαλεί προβλήματα Μοναδικού σημείου αποτυχίας (Single Point of Failure).

Οι τοπολογίες που σχηματίζονται με βάση την αλλαγή της ενέργειας μετάδοσης έχουν σαν κύριο σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και την αύξηση διάρκειας ζωής δικτύου

προστατεύοντας τις απαραίτητες προϋποθέσεις συνδεσιμότητας και κάλυψης που πρέπει να πληροί το δίκτυο.

Σε αντίθεση με τις τοπολογίες αυτές οι Ιεραρχικές Τοπολογίες μπορούν να ελέγξουν τις μεταδόσεις περιττών πληροφοριών, έτσι μπορούν να δίνουν την δυνατότητα επέκτασης του δικτύου. Μπορούμε ακόμη να πούμε ότι οι Ιεραρχικές Τοπολογίες διευκολύνουν την ομαδοποίηση των δεδομένων, για επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας.

Γενικά σε μια Ιεραρχική Τοπολογία επιλέγεται ένα υποσύνολο από κόμβους και αναθέτεται σε αυτούς κάποια επιπλέον λειτουργικότητα. Αυτό στο τέλος θα απλοποιήσει την τοπολογία του δικτύου μας και επιπλέον θα μπορούν να εφαρμοστούν συγκεκριμένες λειτουργίες όπως ομαδοποίησης των δεδομένων, φιλτράρισμα, και καθορισμένη δρομολόγηση αλλά και προώθηση μηνυμάτων μέσα στο δίκτυο.

Ένα μειονέκτημα της Ιεραρχικής Τοπολογίας είναι ότι τελικά οι επιλεγμένοι κόμβοι για τις επιπρόσθετες λειτουργίες θα ζήσουν λιγότερο από τους υπόλοιπους κόμβους. Έτσι ως αποτέλεσμα μερικές φορές να χρειάζεται η παρουσία του μηχανισμού Ελέγχου Τοπολογίας (Topology Maintenance) για ανάθεση των λειτουργιών των κόμβων που τέθηκαν εκτός τοπολογίας σε άλλους κόμβους.

## Κεφάλαιο 4

### Ο Αλγόριθμος Hierarchical Tree Alternative Path

---

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 4.1 Εισαγωγή                           | 18 |
| 4.2 Περιγραφή Δομής Αλγορίθμου         | 19 |
| 4.3 Hierarchical Flooding              | 20 |
| 4.4 Hierarchical Tree Alternative Path | 21 |
| 4.5 Alternative Path Creation          | 22 |
| 4.6 Hierarchical Tree Creation         | 24 |
| 4.7 Συντήρηση Τοπολογίας               | 24 |

---

#### 4.1 Εισαγωγή

Ο αλγόριθμος Hierarchical Tree Alternative Path (HTAP) [15] έχει σχεδιαστεί για βασισμένα σε συμβάντα (Event-Based) ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Σ' αυτήν την ειδική κατηγορία δικτύων τα πακέτα παράγονται μόνο κατά την παρατήρηση συγκεκριμένου γεγονότος που ικανοποιεί μια προκαθορισμένη συνθήκη. Έτσι σ' αυτά τα περιβάλλοντα υπάρχει ανάγκη για τον έλεγχο μιας ξαφνικής αύξησης της κυκλοφορίας των πακέτων στο δίκτυο και όπως είναι φυσικό, αυτό οδηγεί σε προβλήματα συμφόρησης αν δεν γίνει σωστή διαχείριση.

Η συμφόρηση φέρνει το δίκτυο σε μια ασταθής κατάσταση όπου αν δεν υπάρχει κάποιος μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης, θα οδηγήσει σε χάσιμο πακέτων. Το χάσιμο πακέτων σε ένα τέτοιο κρίσιμο σημείο είναι ανεπιθύμητο, έτσι αναγκαστικά για την πρόληψη τέτοιων καταστάσεων σε οδηγούμενα από συμβάντα (event-driven)

περιβάλλοντα υπάρχει ανάγκη ύπαρξης κάποιου μηχανισμού πρόβλεψης τέτοιων γεγονότων συμφόρησης αλλά και οι ανάλογες ενέργειες για την αντιμετώπιση τους.

Οι περισσότεροι μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης είναι βασισμένοι σε δύο κύριες τεχνικές. Μηχανισμοί που οδηγούν στην μείωση του ρυθμού παραγωγής πακέτων είτε σε μηχανισμούς που οδηγούν σε αξιοποίησης όσων των δυνατών περισσότερων κόμβων έτσι ώστε να διαμοιράζονται το φόρτο.

Η εφαρμογή της πρώτης κατηγορίας σε βασισμένα σε συμβάντα (Event-Based) ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, είναι αδύνατη αφού συνήθως η εφαρμογή που θα τρέχει στο προσκίνητο περιμένει τέτοιου είδους γεγονότα για να τα αξιοποιήσει και είναι αδύνατο να μειώσουμε των ρυθμό τους αφού η συλλογή όλων και η παρατήρηση τους είναι ο τελικός μας στόχος.

Έτσι ο αλγόριθμος HTAP μπορεί να περιγραφεί σαν ένα κλιμακωτό και κατανεμημένο πλαίσιο εργασίας [15] που μπορεί να εγγυηθεί ασφαλές και αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων σε περιπτώσεις υπερφόρτωσης δικτύου, χωρίς την μείωση του ρυθμού αποστολής τους από τις πηγές .

#### **4.2 Περιγραφή Δομής Αλγορίθμου**

Η ανάπτυξη του αλγορίθμου βασίζεται στους εξής επιμέρους αλγορίθμους για κάθε περίπτωση:

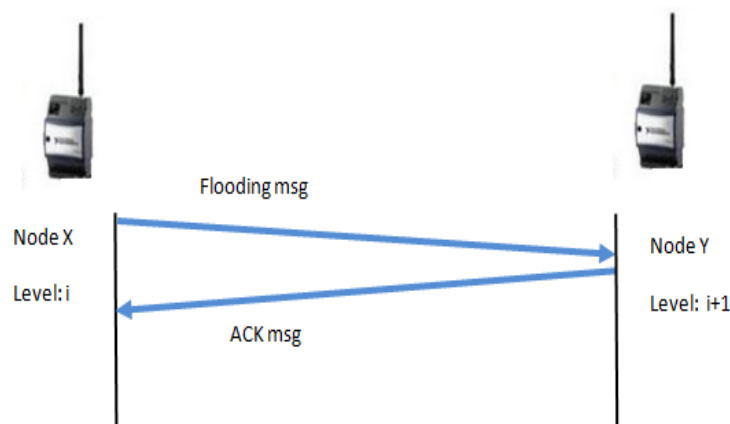
**Κατασκευής Τοπολογίας (Topology Construction):** Γίνεται χρήση του αλγορίθμου Hierarchical Flooding όπου αποσκοπεί στην κατασκευή της αρχικής τοπολογίας του δικτύου σε μια ιεραρχική δενδρική μορφή ξεκινώντας από τις πηγές. Οι κόμβοι ανταλλάζουν και καθορίζουν το επίπεδο τους στην ιεραρχία του δένδρου.

**Έλεγχος Συμφόρησης (Congestion Control):** Το κύριο μέρος το αλγορίθμου Hierarchical Tree Alternative Path που είναι υπεύθυνο για την αντιμετώπιση προσδοκώμενων καταστάσεων συμφόρησης και ασφαλές μεταφοράς των πακέτων. Χωρίζεται σε δύο μέρη, στον αλγόριθμο Alternative Path Creation (APC) και στον αλγόριθμο Hierarchical Tree Creation (HTC).

**Συντήρηση Τοπολογίας (Topology Maintenance):** Σε αυτό το τμήμα του αλγόριθμου γίνεται διαχείριση των κόμβων με περιορισμένη ενέργεια. Δηλαδή ο αλγόριθμος περιγράφει τις ενέργειες που θα εκτελεστούν από τους γειτονικούς κόμβους κάποιου κόμβου που τείνει να εξαντλήσει πλήρως τα αποθέματα ενέργειας του.

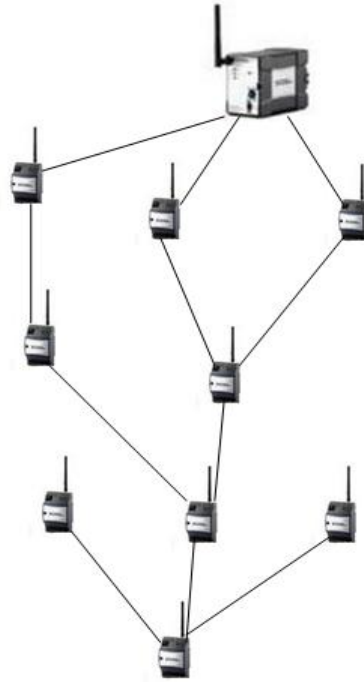
### 4.3 Hierarchical Flooding

Ο αλγόριθμος Hierarchical Flooding είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη της τοπολογίας και του σωστού τρόπου σύνδεσης των κόμβων. Προσπαθεί από τις πηγές (sources) να αναπτύξει ένα ιεραρχικό δέντρο που θα δίνει την δυνατότητα να ακολουθηθούν αργότερα διαφορετικά μονοπάτια στις περιπτώσεις διαχείρισης συμφόρησης.



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα Hierarchical Flooding.

Από την στιγμή που θα γίνουν γνωστοί οι κόμβοι πηγές ξεκινούν την μετάδοση (broadcast) ενός πακέτου ανίχνευσης επιπέδου όπου σ' αυτό περιέχεται ο αποστολέας και το επίπεδο του. Οποιοσδήποτε κόμβος το παραλάβει για πρώτη φορά, απλά απαντά στον αποστολέα με ένα πακέτο τύπου Βεβαίωσης Λήψης (ACK) περιλαμβάνοντας την ταυτότητα (id) του και το επίπεδο (level) του και τίθεται σε μια άλλη κατάσταση (state) όπου θα αγνοεί άλλα τέτοια πακέτα. Ο αποστολέας του πακέτου ανίχνευσης επιπέδου αν παραλάβει μήνυμα απάντησης ACK από κάποιο κόμβο, τον προσθέτει στην λίστα γειτόνων του σημειώνοντας την αντίστοιχη ταυτότητα (id) και επίπεδο (level).



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα Τελικής Τοπολογίας.

Έτσι τελικά έχουμε μία δεντρική δομή στην τοπολογία ξεκινώντας από τις πηγές, όπου αυτό θα φανεί πολύ χρήσιμο κατά την διαχείρισης των περιπτώσεων συμφόρησης στο δίκτυο.

#### 4.4 Hierarchical Tree Alternative Path

Ο αλγόριθμος Hierarchical Tree Alternative Path αποτελείται από δύο μέρη, τον αλγόριθμο Alternative Path Creation και τον αλγόριθμο Hierarchical Tree Creation, όπου και οι δύο αυτοί αλγόριθμοι είναι βασισμένοι στην ίδια φιλοσοφία. Δηλαδή προσπαθούν να δημιουργήσουν εναλλακτικά μονοπάτια από τις πηγές προς τους τελικούς προορισμούς σε περιπτώσεις συμφόρησης. Αυτό το επιτυγχάνουν με την προσπάθεια εμπλοκής όσων περισσότερων κόμβων είναι δυνατόν, που πιθανός προηγούμενος να μην χρησιμοποιούνται. Σε γενικές γραμμές ο αλγόριθμος Alternative Path Creation χρησιμοποιεί αυτούς τους κόμβους με ένα πιο ελεύθερο τρόπο σε σχέση με τον αλγόριθμο Δημιουργίας Ιεραρχικού Δένδρου ο οποίος βασίζεται στην αρχική ιεράρχηση τους.

Έτσι η τελική μορφή του αλγόριθμου HTAP, είναι ο συνδυασμός αυτών των δύο αλγορίθμων όπου προσπαθεί να λύσει προβλήματα συμφόρησης σε τοπικό επίπεδο αποφεύγοντας τον υπερφορτωμένο κόμβο, δημιουργώντας εναλλακτικά μονοπάτια από τις πηγές προς τις κεντρικές μονάδες.

Το κριτήριο που διαχωρίζει την εκτέλεση του αλγόριθμου APC από τον αλγόριθμο HTC είναι το πόσο πυκνό ή πόσο αραιό είναι το δίκτυο ανάλογα. Δηλαδή θέτουμε κάποιο όριο (threshold) αριθμών γειτόνων που μπορεί να έχει κάθε κόμβος. Αν μετά την ανάπτυξη της τοπολογίας κάποιος κόμβος θέλει να δρομολογήσει κάποια πακέτα, ανάλογα με το όριο που θέσαμε σε σχέση πάντα με τον πραγματικό αριθμό γειτόνων του, θα αποφασίσει πιο από τους δύο αλγόριθμους θα εξακολουθήσει στη συνέχεια για την δρομολόγηση. Αν σε περίπτωση που ο αριθμός των γειτόνων του είναι μικρότερος από το όριο θα εφαρμόσει τον αλγόριθμο APC αλλιώς θα εφαρμόσει τον αλγόριθμο HTC.

---

---

HTAP: Hierarchical Tree Alternative Path Algorithm

---

---

```
Set neighbor_nodes_threshold to [prespecified value]
  if neighbor_nodes < neighbor_nodes_threshold
    apply APC
  else
    apply HTC
```

---

---

Σχήμα 4.3: Αλγόριθμος HTAP.[15]

#### 4.5 Alternative Path Creation

Ο Αλγόριθμος Alternative Path Creation θα εκτελεσθεί σε περίπτωση επιλογής απευθείας από τον αλγόριθμο HTAP ή σε περίπτωση κλήσης του διαμέσου του αλγόριθμου Δημιουργίας Ιεραρχικού Δένδρου. Έτσι όταν ένα νέο συμβάν λάβει μέρος τότε οι σχετικοί κόμβοι πηγές θα ξεκινήσουν την αποστολή πακέτων. Εάν σε κάποιο κόμβο λόγο της θέσης του μέσα στον δίκτυο παρατηρηθεί μεγαλύτερος ρυθμός αποδοχής πακέτων από ότι αποστολής σε σύντομο χρονικό διάστημα θα

παρατηρήσουμε ότι η προσωρινή μνήμη (buffer) του κόμβου θα γεμίσει έτσι ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να αποδεχτεί άλλα πλέον πακέτα και τα επόμενα πακέτα θα χάνονται (packet drop). Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων σε περίπτωση που κάποιος κόμβος αντιληφθεί ότι βρίσκεται σε τέτοια κατάσταση ενημερώνει τον κόμβο που βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο ότι σε σύντομο χρονικό διάστημα θα βρίσκεται σε κατάσταση συμφόρησης. Έτσι με αυτό τον τρόπο ο αποστολέας σταματάει τη μετάδοση πακέτων μέσω αυτού του κόμβου και προσπαθεί να βρει κάποιο κόμβο σε μικρότερο επίπεδο συμφόρησης από τη λίστα γειτόνων του για να συνεχίσει την μετάδοσης των πακέτων. Επίσης το συγκεκριμένο συμβάν μπορεί να εμφανιστεί σε οποιοδήποτε επίπεδο μεταξύ γειτονικών κόμβων. Τελικά με αυτόν τον τρόπο, δηλαδή τη αλλαγή των παραληπτών επιτυγχάνουμε την δημιουργία εναλλακτικών μονοπατιών.

---



---

**APC: Alternative Path Creation Algorithm**

---



---

```

if current_node receives ack with congestion_level full
    update neighbor_table
    search neighbor_table
    find node_id with min (congestion_level)
    send data packet
if current_node receives congestion_update_message
    update neighbor_table
else if current_node receives data packet and accepting them
    Set buffer to buffer+1
    if buffer+b=full //from Section 3.2
    send ack packet with congestion_level full

```

---



---

Σχήμα 4.4: Αλγόριθμος APC. [15]

Ο τρόπος αναγνώρισης ότι ο τρέχων κόμβος βρίσκεται σε κατάσταση συμφόρησης είναι ο εξής:

Αρχικά, το μέγεθος της μνήμης προσωρινής αποθήκευσης (buffer) του κόμβου είναι ήδη γνωστό. Σε μερικές περιπτώσεις όμως η εφαρμογή που τρέχει σε ψηλότερο επίπεδο, μπορεί να καθορίζει τα πακέτα να είναι κοινού μεγέθους είτε διαφορετικού. Έτσι μπορούμε να καθορίσουμε  $b$  αυτό το μέγεθος του πακέτου ή των πακέτων, ως το τελικό γινόμενο με τον ανάλογο χρόνο αναμετάδοσης. Σε περίπτωση που το τρέχων επίπεδο της μνήμης προσωρινής αποθήκευσης (buffer) συμπεριλαμβανομένου του

μεγέθους  $b$  είναι ίσο με την μέγιστη χωρητικότητα της μνήμης προσωρινής αποθήκευσης (buffer) μπορούμε να πούμε ότι ο κόμβος βρίσκεται σε συμφόρηση.

#### 4.6 Hierarchical Tree Creation

Αφού επιλεγεί η εκτέλεση του αλγορίθμου Hierarchical Tree Creation και ήδη έχουμε την ιεραρχική δενδρική μας τοπολογία σ' αυτό το σημείο θα καθοριστεί ο τρόπος δρομολόγησης των πακέτων για αποφυγή της συμφόρησης στο δίκτυο.

Σε κάθε ανταλλαγή πακέτων γίνεται μια ενημέρωση της κατάστασης του επιπέδου συμφόρησης στην οποία βρίσκεται ο παραλήπτης και γίνεται ανάλογη ενημέρωση της λίστας γειτόνων του.

Έτσι σε περίπτωση που κάποιος κόμβος αντιληφθεί ψηλά επίπεδα συμφόρησης κατά την επόμενη αποστολή πακέτων θα ακολουθήσει τον αλγόριθμο APC.

---

---

HTC: Hierarchical Tree Creation Algorithm

---

---

```
if current_node receives hello_message
send ack_hello
else if current_node sends hello_message
wait specific_time
    if current_node receives ack_hello
        update neighbor_table
    else if time_expires
        re-send hello_message
/** IN CASE OF CONGESTION APPLY APC **/
```

---

---

Σχήμα 4.5: Αλγόριθμος HTC. [15]

#### 4.7 Συντήρηση Τοπολογίας

Όπως είναι αναμενόμενο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε κάποιο σημείο κάποιοι κόμβοι θα ξεμείνουν από ενέργεια λόγω περισσότερης χρήσης από τους υπόλοιπους

κόμβους. Το πιο συνηθισμένο φαινόμενο είναι να εξαντλήσουν την ενέργεια τους πρώτοι οι κόμβοι που είναι άμεσα συνδεδεμένοι με την κεντρική μονάδα (sink) όπως επίσης και οι πλησιέστεροι κόμβοι από το συμβάν.

Εάν σε οποιαδήποτε περίπτωση κάποιος κόμβος εξαντλήσει την ενέργεια του πρέπει να αφαιρεθεί από το δίκτυο και να γίνει σχετική ενημέρωση των γειτόνων του. Λογικά αυτή η διαδικασία θα πρέπει να είναι όσο πιο απλή γίνεται έτσι ώστε να μην σπαταλήσει επιπλέον ενέργεια από το δίκτυο αφού συνήθως αυτή η διαδικασία συμβαίνει σε κρίσιμη στιγμή.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος χωρίζεται σε δύο κύρια σημεία:

Στην πρώτη περίπτωση ο κόμβος με περιορισμένη ενέργεια να είναι η ίδια η πηγή. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει η πηγή να μεταδώσει (broadcast) κάποιο μήνυμα εκλογής την στιγμή που θα αντιληφθεί ότι η ενέργεια έχει φτάσει σε κάποιο προκαθορισμένο σημείο. Οι γειτονικοί κόμβοι που θα παραλάβουν το σχετικό μήνυμα θα απαντήσουν με ένα πακέτο τύπου Βεβαίωσης Λήψης (ACK) που θα συμπεριλαμβάνει το επίπεδο ενέργειας τους. Έτσι η πηγή θα κάνει επιλογή του κόμβου του οποίου το επίπεδο ενέργειας είναι το μεγαλύτερο και θα τον ενημερώσει πίσω με μήνυμα, αν κάποιος κόμβος δεν παραλάβει μήνυμα αυτό σημαίνει ότι δεν έχει επιλεχθεί για να πάρει την θέση της πηγής.

Στην άλλη περίπτωση, ο κόμβος με περιορισμένη ενέργεια μπορεί να είναι ένας απλός ενδιάμεσος κόμβος στο δίκτυο. Η χειρότερη περίπτωση είναι να αποκόψει την ροή των πακέτων από τον τελικό προορισμό. Αυτό όμως αντιμετωπίζεται με την τοπολογία του δικτύου, δηλαδή με τον ιεραρχικό δενδρικό σχηματισμό τους δίνονται ευκαιρίες δρομολόγησης μέσω άλλων κόμβων προς των τελικό προορισμό.

## Κεφάλαιο 5

### Ο Αλγόριθμος Dynamic Alternative Path Selection Scheme

---

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 5.1 Εισαγωγή                                           | 26 |
| 5.2 Μέθοδος Ελέγχου Συμφόρησης Δικτύου : Έλεγχος Πόρων | 27 |
| 5.3 Περιγραφή Δομής Αλγορίθμου                         | 28 |
| 5.4 Φάση Εγκατάστασης                                  | 29 |
| 5.5 Βασικοί Μηχανισμοί                                 | 31 |

---

#### 5.1 Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων μπορούν να υπάρξουν σχεδόν παντού και αρκετές φορές εμπλέκονται σε σενάρια όπου στο επίπεδο της εφαρμογής να έχουμε πολλές απαιτήσεις και ακρίβεια. Αρκετές εφαρμογές απαιτούν επίδοση σε θέματα ενέργειας, δηλαδή διάρκειας της ζωής του δικτύου αλλά και σε καλή διαχείριση σε κρίσιμες περιπτώσεις συμφόρησης δικτύου. Μέχρι τώρα πολλές προσπάθειες γίνονταν σε ξεχωριστούς αλγορίθμους για την επίτευξη τέτοιων στόχων.

Ο Αλγόριθμος Dynamic Alternative Path Selection Scheme (DALPaS) [14] προσπαθεί να διαχειριστεί θέματα συμφόρησης τους δικτύου με όσο πιο λίγη πολυπλοκότητα στον αλγόριθμο γίνεται, έτσι ώστε να μπορεί να αποτελεί παράλληλα και ένα οικονομικό σε θέματα ενέργειας αλγόριθμο. Έτσι τελικά να μπορεί με αποδοτικό αλλά και με προσαρμόσιμο τρόπο να επιλέγει εναλλακτικά μονοπάτια για την αποφυγή περιπτώσεων συμφόρησης, λαμβάνοντας υπόψη αρκετές σημαντικές παραμέτρους που

επιηρεάζουν την απόδοση του δικτύου, όμως ταυτόχρονα προσπαθεί να κρατήσει χαμηλά επίπεδα επιπλέον υπολογισμών (overhead) του δικτύου.

## **5.2 Μέθοδος Ελέγχου Συμφόρησης Δικτύου : Έλεγχος Πόρων**

Ένας άλλος ορισμός της συμφόρησης όπως δίνεται στο άρθρο [5] είναι: “Συμφόρηση σε ένα δίκτυο συμβαίνει όταν το προσφερόμενο φορτίο υπερβαίνει την διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου.” [5]. Σύμφωνα με αυτό το ορισμό υπάρχουν δυο τρόποι προσέγγισης του προβλήματος. Είτε με το να μειώσουμε το προσφερόμενο φορτίο ή να αυξήσουμε την χωρητικότητα του δικτύου. Στις μεθόδους αυτές Έλεγχος Κυκλοφορίας (Traffic Control) και Έλεγχος Πόρων (Resource Control) αντίστοιχα κάνουν αναφορά και άλλες σχετικές έρευνες όπως το [6]. Και στις δύο μεθόδους παρατηρούνται αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και αρκετά μειονεκτήματα. Οι μέθοδοι Ελέγχου Κυκλοφορίας μπορούν να θεωρηθούν ως πιο αποδοτικοί σε περιπτώσεις περιοδικής υπερφόρτωσης του δικτύου και οι μέθοδοι Ελέγχου Πόρων είναι πιο αποδοτικοί σε περιπτώσεις που έχουμε μόνιμα υπερφορτωμένο δίκτυο [7].

Πάραυτα, οι μέθοδοι Έλεγχου Κυκλοφορίας είναι πολύ πιο απλοί και με μικρότερο τελικό κόστος. Το γεγονός ότι ο ρυθμός των πακέτων μειώνεται ακριβώς την ώρα που διαδραματίζεται ένα γεγονός πολλές φορές καθιστά αδύνατων την εφαρμογή τέτοιους είδους μεθόδους σε αρκετές εφαρμογές. Έτσι ως επακόλουθο τις περισσότερες φορές να είναι επιθυμητή η ύπαρξη μιας μεθόδου διαχείρισης Ελέγχου Συμφόρησης που να ακολουθεί το σκεπτικό των μεθόδων Έλεγχων Πόρων.

Σε τέτοιες περιπτώσεις η πρόκληση επίτευξης τέτοιων αλγορίθμων είναι ακόμη πιο δύσκολη επειδή από τη μια θέλουμε ένα απλό αλγόριθμο με μικρούς υπολογισμούς ενώ από την άλλη θα θέλαμε να λαμβάνουμε υπόψη κάποιες παραμέτρους σε θέματα επίδοσης πριν πάρουμε κάποια απόφαση για το εναλλακτικό μονοπάτι που θα ακολουθηθεί έτσι ώστε να αποφευχθεί η συμφόρηση.

Επιπλέον, η επιλογή των εναλλακτικών μονοπατιών σε πυκνές τοπολογίες κατά τη διάρκεια συμφόρησης απαιτεί να ληφθούν υπόψη ακόμη περισσότερες παράμετροι και καθιστά την πρόκληση επίτευξης τέτοιων αλγορίθμων ακόμη πιο δύσκολη.

Γενικά οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράλληλα είναι:

- I. Η εναπομείναντα ενέργεια του κόμβου αλλά και του υπόλοιπου δικτύου.
- II. Συμφόρηση σε επίπεδο Υπερφόρτωσης Μνήμης και Παρεμβολών.
- III. Χρόνος μετάδοσης δεδομένων από την πηγή στην κεντρική μονάδα.
- IV. Τον ρυθμό στον οποίο χάνονται τα πακέτα σε τέτοιες περιπτώσεις.

Αρκετές έρευνες κατάφεραν να υποδείξουν κάποιες λύσεις σε περιπτώσεις δρομολόγησης Μοναδικής Διαδρομής (single path) σχετικά με θέματα απόδοσης ενέργειας [8] [9] ή για τον Έλεγχο Συμφόρησης [10] [11].

Δυστυχώς οι αλγόριθμοι δρομολόγησης Μοναδικής Διαδρομής παρουσιάζουν κάποια αδυναμία, όπου συγκεκριμένοι κόμβοι μπορούν να εξαντλήσουν την ενέργεια τους πάρα πολύ πιο γρήγορα, σαν αποτέλεσμα αυτό οδηγά στην δημιουργία νέων μονοπατιών. Το αποτέλεσμα αυτό θα επιφέρει μια πιο ακριβή λύση σε θέματα ενέργειας.

Ο μόνος τρόπος να γίνει χρήση δρομολόγησης Μοναδικής Διαδρομής για τον Έλεγχο Συμφόρησης, είναι να μειωθεί ο ρυθμός των κόμβων πηγών, όπως αναφέρεται και στο [6] και αυτό μπορεί να μην είναι αποδεκτό από κάποιες εφαρμογές.

### **5.3 Περιγραφή Δομής Αλγορίθμου**

Ο DAIPaS είναι ένας αλγόριθμος Ελέγχου Συμφόρησης που προσπαθεί να επιλέξει εναλλακτικά μονοπάτια σε περιπτώσεις υπερφόρτωσης του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη κάποιες βασικές παραμέτρους.

Μπορεί να δράσει σαν τα Πρωτόκολλα Επίγνωσης Ενέργειας (Energy Aware) [12] [13] που μπορούν να βρουν την οικονομικότερη σε ενέργεια διαδρομή για την δρομολόγηση των πακέτων τους αλλά και την επιλογή του εναλλακτικού μονοπατιού. Το σημαντικό όμως εδώ είναι ότι μπορεί επιπλέον από αυτά να λαμβάνει υπόψη του τη κατάσταση συμφόρησης στην οποία βρίσκεται ο κάθε κόμβος.

Είναι ένας δυναμικός και κατανεμημένος αλγόριθμος που χωρίζεται σε δυο μέρη, τη Φάση Εγκατάστασης (Setup Phase) και τους Βασικούς Μηχανισμούς (DAIPaS Mechanisms).

#### 5.4 Φάση Εγκατάστασης

Σε αυτή τη φάση γίνεται η ανάπτυξη της τοπολογίας του δικτύου. Η ανάπτυξη αυτή ακολουθεί τέτοια μέθοδο έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια ιεραρχική δενδρική δομή ξεκινώντας από την κεντρική μονάδα (Sink).

Με μια μικρή αλλά ίσως τη πιο σημαντική λεπτομέρεια ο κάθε κόμβος να μπορεί να αποτελεί παιδί κόμβος σε πάνω από ένα κόμβο. Έτσι θα του δίνεται η ευκαιρία επιλογής εναλλακτικού κόμβου για προώθηση των δεδομένων. Αυτή η επιλογή εναλλακτικού μονοπατιού για την προώθηση δεδομένων θα χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση περιπτώσεων υπερφόρτωσης του δικτύου αλλά και για την επίβλεψη της αποδοτικότητας της ενέργειας στο δίκτυο.

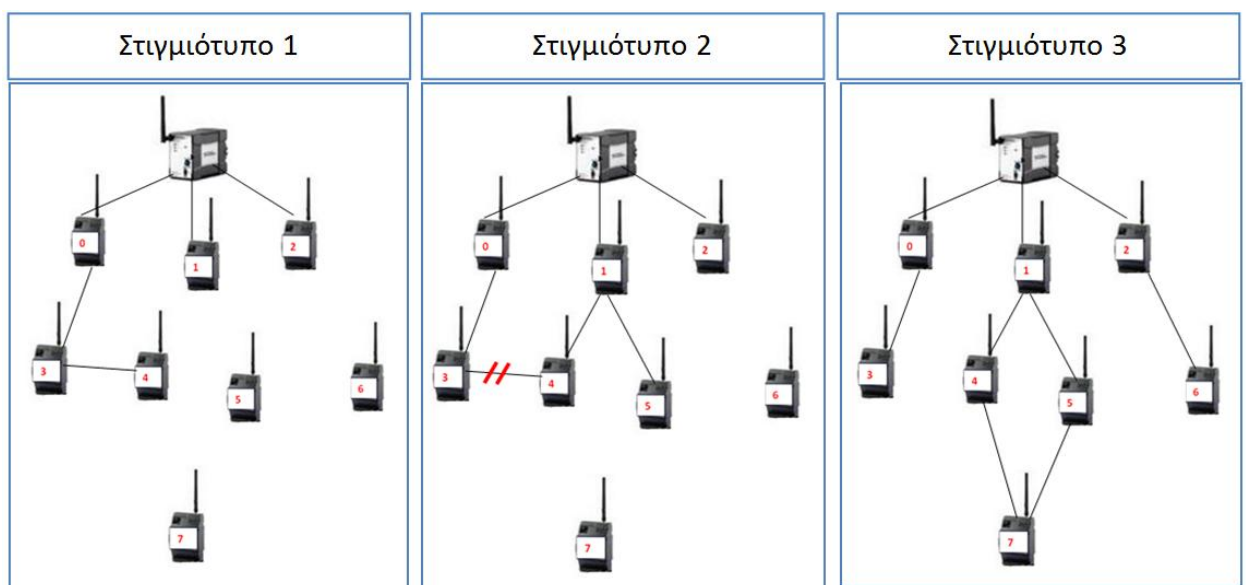
Κατά τη φάση αυτή η κεντρική μονάδα μεταδίδει ένα μήνυμα ελέγχου τύπου Hello, όπου σ' αυτό περιλαμβάνονται κάποιες πληροφορίες όπως ο αποστολέας και το επίπεδο (Level) του μέσα στο δέντρο που προσπαθούμε να δημιουργήσουμε. Αρχικά το επίπεδο θα έχει την τιμή 0. Έτσι στην συνέχεια όσοι κόμβοι ήταν εντός της εμβέλειας μετάδοσης του μηνύματος, αφού παραλάβουν το μήνυμα καθορίσουν σε πιο επίπεδο βρίσκονται, αυξήσουν κατά ένα την τιμή του επιπέδου στο μήνυμα, το προωθούν και αυτοί με την σειρά τους.

Αν κάποιος κόμβος παραλάβει κάποιο Hello μήνυμα για πρώτη φορά θα εκτελέσει ακριβώς τις ενέργειες που μόλις διατυπώσαμε πιο πάνω.

Αν όμως κάποιος κόμβος παραλάβει το μήνυμα περισσότερο από μια φορές προφανώς από διαφορετικούς γείτονες θα γίνει δεκτή η παραλαβή του μόνο αν το νέο μήνυμα έχει μικρότερη τιμή επιπέδου. Έτσι καθορίζει την νέα του τιμή, όπως και στο μήνυμα και αναμεταδίδει το μήνυμα.

Με αυτό τον τρόπο αν υπήρχαν κόμβοι σε χαμηλότερο από αυτόν επίπεδο θα παραλάβουν το νέο μήνυμα και θα πράξουν το ίδιο με τον πρώτο κόμβο που ενημερώθηκε ότι θα αλλάξει επίπεδο και αυτή η διακλάδωση συνεχίζεται μέχρι τον τελευταίο κόμβο που είναι συνδεδεμένος σ' αυτή την ιεραρχία.

Στο τέλος αυτή της διαδικασίας θα έχουμε ανακαλύψει το δίκτυο, οι κόμβοι θα έχουν αρχικοποιήσει τους πίνακες με τους γείτονες τους και θα έχουν ανά πάσα στιγμή γνώση της απόστασης από την κεντρική μονάδα.



Σχήμα 5.1: Παράδειγμα εφαρμογής αλγορίθμου.

Στην συνέχεια ακολουθεί μια περιγραφή της εκτέλεσης Σχήμα 5.1.

Αρχικά στο Στιγμιότυπο 1 παρατηρούμε ότι η κεντρική μονάδα μετάδωσε το μήνυμα Hello στους κόμβους 0,1 και 2 όπου και αυτοί το αποδέχτηκαν και τον καταχώρισαν στην λίστα γειτόνων τους και πήραν την σωστή τιμή για το επίπεδο τους (Level 1). Στην συνέχεια ο κόμβος 0 μετάδωσε το μήνυμα Hello στον κόμβο 3 όπου αυτός αποδέχτηκε και πήρε τη τιμή επιπέδου (Level 2) και τελικά αυτός με τη σειρά του μετάδωσε το μήνυμα Hello στον κόμβο 4 όπου αυτός αποδέχτηκε και πήρε τη τιμή επιπέδου (Level 3).

Στις επόμενες μεταδόσεις του μηνύματος Hello, δηλαδή στο Στιγμιότυπο 2 παρατηρούμε ότι ο κόμβος 1 μεταδίδει το μήνυμα στους κόμβους 4 και 5 όπου και αυτοί πρέπει να καταχωρήσουν το επίπεδο (Level 2). Ο κόμβος 5 λαμβάνοντας πρώτη φορά μήνυμα Hello καταχωρεί κανονικά το επίπεδο του. Ο κόμβος 4 αφού κατέχει τιμή επιπέδου (Level 3) από τον κόμβο 3, τον διαγράφει από την λίστα συνδεδεμένων κόμβων και καταχωρεί τη νέα σύνδεση που απέκτησε με χαμηλότερη τιμή επιπέδου (Level 2) με τον κόμβο 1. Και στο Στιγμιότυπο 3 μπορούμε να δούμε πως είναι η τοπολογία σε μια τελική μορφή αφού τελείωσε η διαδικασία της ανάπτυξης της τοπολογίας.

### 5.5 Βασικοί Μηχανισμοί

Αφού τελείωσε η φάση της ανάπτυξης της τοπολογίας, έχει σχηματιστεί η επιθυμητή ιεραρχική δενδρική μορφή και η διακλάδωση σε επίπεδα, το επόμενο στάδιο είναι η αξιόπιστη δρομολόγηση των δεδομένων.

Έτσι κατά την ανταλλαγή των πακέτων κάθε κόμβος περιμένει να λάβει πίσω το σχετικό πακέτο τύπου Βεβαίωσης Λήψης (ACK). Εδώ μπορούμε να αναφέρουμε με περισσότερη λεπτομέρεια τα ακριβές πεδία του πακέτου όπως φαίνονται και στο Σχήμα 5.2 (Node ID, Next Packet Sequence Number, Buffer Occupancy, Remaining Power, Number of Hops, Flag).

| node ID | Next<br>Packet<br>Sequence<br>Number | Buffer<br>Occu-<br>pancy | Remaining<br>Power | Number<br>of Hops | Flag |
|---------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|------|
|---------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|------|

Σχήμα 5.2: Ack Packet Header [14]

Τα συγκεκριμένα δεδομένα αποθηκεύονται ανάλογα στον πίνακα γειτόνων του κόμβου. Το πεδίο Flag καθορίζει κατά πόσο ο κόμβος είναι σε ενεργή κατάσταση ή όχι.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα στάδια του αλγόριθμου DAIPaS :

**Soft Stage:** Το στάδιο αυτό έχει ως στόχο να δράσει περισσότερο σαν ένα προληπτικό μέτρο αποφυγής, παρά αντιμετώπισης της συμφόρησης. Επίσης είναι ικανός να εξαπλώνει τις ροές των δεδομένων αποφεύγοντας έτσι την υπερφόρτωση σε συγκεκριμένα μονοπάτια και την εξάντληση ενέργειας μεμονωμένων κόμβων.

Ο κόμβος μπορεί να αναγνωρίσει ότι βρίσκετε σε αυτό το στάδιο όταν παραλαμβάνει πακέτα από πολλές ροές. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο συγκεκριμένος κόμβος απλά αποτελεί “υποψήφιο υπερφορτωμένο” κόμβο. Για την αποτροπή τέτοιων καταστάσεων ο αλγόριθμος προσπαθεί να κρατήσει μόνο μια εισερχόμενη ροή σε κάθε κόμβο. Αυτό επιτυγχάνετε όταν ο κόμβος που παραλαμβάνει τα δεδομένα απαντήσει πίσω με πακέτο τύπου Βεβαίωσης Λήψης (ACK) και στο σχετικό πεδίο του “Next Packet Sequence Number” να έχει καταχωρημένη την τιμή “False” έτσι ώστε να κρατήσει μόνο μια εισερχόμενη ροή. Ο κόμβος που παραλαμβάνει ένα τέτοιο ACK μήνυμα ενημερώνεται και προσπαθεί να προωθήσει τα επόμενα πακέτα από διαφορετικό μονοπάτι την επόμενη φορά. Επίσης εδώ ο κόμβος μπορεί να ξεχωρίσει ότι ο λόγος που δεν αποστέλλει νέο μήνυμα είναι άλλη ροή αφού το πεδίο Flag στο πακέτο τύπου Βεβαίωσης Λήψης είναι “True”, εφόσον το πεδίο Flag αποτελεί ένα πεδίο ένδειξης της διαθεσιμότητας του κόμβου.

Γενικά σε αυτό το στάδιο οι κόμβοι απλά συμβουλεύουν τους αποστολείς να βρουν εναλλακτικό μονοπάτι για να προωθήσουν τα δεδομένα τους. Το κριτήριο επιλογής της ροής που θα μένει ανοικτή, είναι ο ρυθμός μετάδοσης, όπου η σύνδεση με το μεγαλύτερο ρυθμό μένει ανοικτή. Έτσι εφαρμόζοντας αυτήν τη τακτική, όχι μόνο ωφελούμαστε από τη αποφυγή καταστάσεων συμφόρησης, αλλά αναγκάζουμε το δίκτυο να χρησιμοποιήσει τους κόμβους του ομοιόμορφα.

**Hard Stage:** Είναι η κατάσταση η οποία αναγκάζει τις ροές δεδομένων του δικτύου να αλλάξουν μονοπάτια αν γίνει υπέρβαση κάποιου κατώτατου κατωφλίου σχετικά με την απόδοση (performance threshold).

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα εναλλακτικά μονοπάτια που υπάρχουν για την προώθηση δεδομένων σε περιπτώσεις συμφόρησης, να μην πληρούν κάποιες προϋποθέσεις των εφαρμογών. Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχει πιθανότητα να γίνονται εξαιρέσεις και να συνεχίζεται η μετάδοση δεδομένων σε υποψήφιους κόμβους παρόλο που ξέρουμε ότι υπάρχει κάποια πιθανότητα πρόκλησης συμφόρησης στο δίκτυο.

Έτσι σε τέτοιες περιπτώσεις αν κάποιος κόμβος υπερβεί αυτό το καθορισμένο κατώφλι βρίσκεται σε κατάσταση Hard Stage. Το κατώφλι αυτό μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους για διαφόρους παράγοντες, όπως πιο κάτω:

- I. Η προσωρινή μνήμη Buffer του κόμβου τείνει να γεμίζει.
- II. Μικρά ποσοστά εναπομείναντας ενέργειας
- III. Μη διαθέσιμοι κόμβοι σε ψηλότερο επίπεδο.

Υπάρχει επίσης ο αλγόριθμος Flag Decision ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη παρακολούθηση και την εφαρμογή αυτού του κατωφλίου απόδοσης.

**Flag Decision Algorithm:** Ο αλγόριθμος αυτός εκτελείται όταν κάποιος κόμβος βρίσκεται σε Hard Stage. Τότε ο κόμβος δεν θα είναι διαθέσιμος πλέον για αποδοχή νέων πακέτων. Δηλαδή θα αποστέλλεται σχετικό πακέτο τύπου Βεβαίωσης Λήψης (ACK) με το πεδίο Flag να έχει τιμή “False”. Αυτό σηματοδοτεί ότι ο κόμβος θα είναι πλέον μην διαθέσιμος. Όταν ο κόμβος έχει ξεπεράσει τις συνθήκες υπερφόρτωσης μπορεί να ενημερώσει πάλι πίσω ότι είναι διαθέσιμος με ένα μήνυμα ελέγχου τύπου Hello όπου στο πακέτο τύπου Βεβαίωσης Λήψης (ACK) το πεδίο Flag θα έχει την τιμή “True”.

## Κεφάλαιο 6

### Ο Προσομοιωτής Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων Atarraya

---

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 6.1 Εισαγωγή.                                        | 34 |
| 6.2 Περιγραφή εσωτερικής δομής Atarraya              | 35 |
| 6.3 Διαχείριση γεγονότων και η δομή των πρωτοκόλλων. | 38 |
| 6.4 Το περιβάλλον εργασίας του Atarraya              | 40 |

---

#### 6.1 Εισαγωγή.

Ο Προσομοιωτής Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων Atarraya [2], που σημαίνει “δίκτυα του ψαρά” στα ισπανικά, σχεδιάστηκε από τους Pedro M. Wightman και Miguel A. Labrador του University of South Florida κατά τη προσπάθεια τους να ελέγξουν την κατασκευή μιας τοπολογίας, μέσα στα πλαίσια της έρευνας του νέου τους πρωτοκόλλου A3. Όμως, όπως ήταν αναμενόμενο υπήρχε ανάγκη σύγκρισης της απόδοσης αυτού του νέου πρωτοκόλλου με τα άλλα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα, και έτσι απλά ο σχεδιασμός μόνο του εργαλείου δεν ήταν αρκετός. Στην συνέχεια δημιουργήθηκε ένας πιο γενικός προσομοιωτής όπου θα μπορούσαν να ενταχθούν νέοι αλγόριθμοι και πρωτόκολλα σε αυτό για αξιολόγηση και σύγκριση κάτω από τις ιδέες συνθήκες.

Έτσι είχαμε σαν τελικό αποτέλεσμα ένα βασισμένο σε Java, οδηγούμενο από συμβάντα (event-driven) προσομοιωτή για αλγορίθμους Ελέγχου Τοπολογίας σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Παρόλο που το εργαλείο αυτό είναι υπό ανάπτυξη, συνιστάται για έρευνες, ανάπτυξη και δοκιμή νέων αλγορίθμων. Μπορούμε να πούμε εδώ ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για σκοπούς εκπαίδευσης αφού οι δυνατότητες απεικόνισης τέτοιου εργαλείου μπορούν να αποτελέσουν ένα εύκολο μέσο επεξήγησης και ανάλυσης περίπλοκων αλγορίθμων.

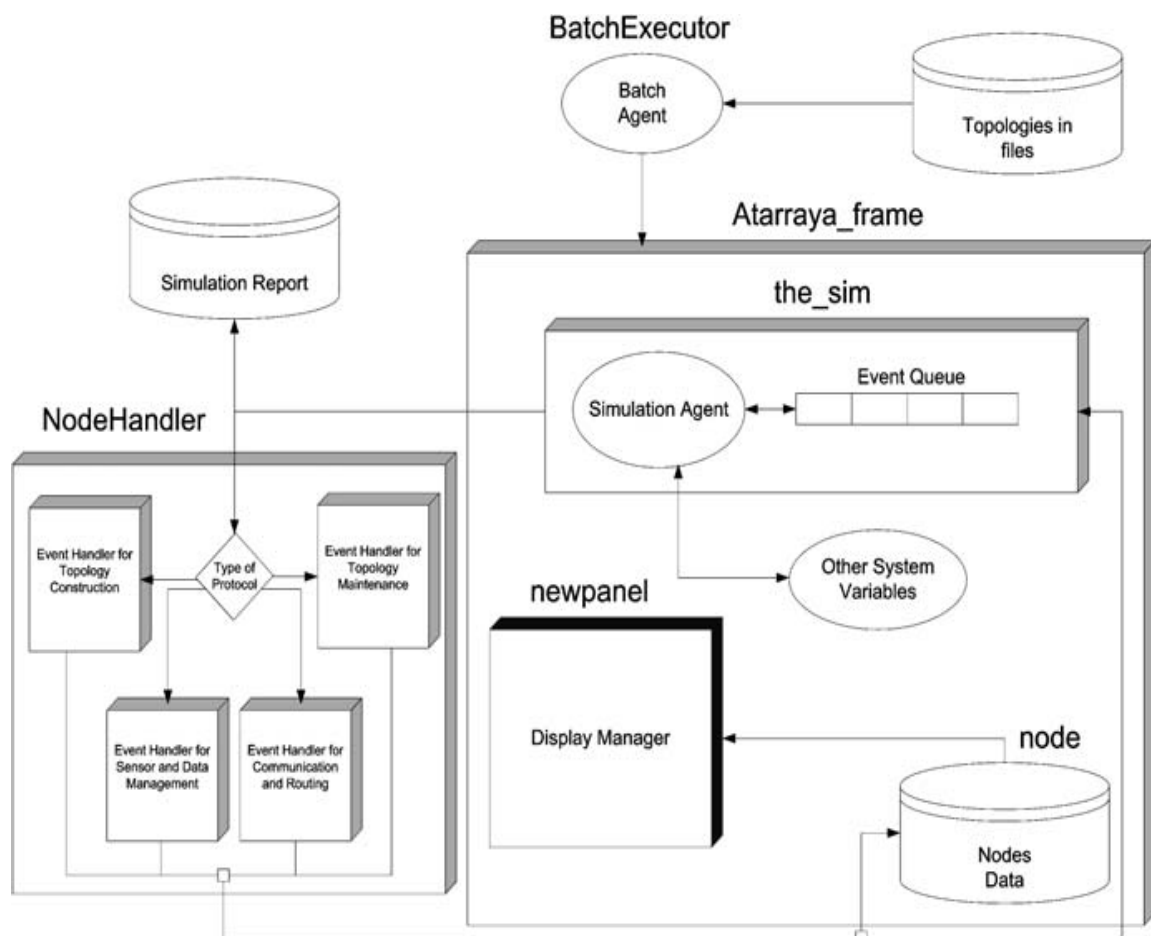
Μπορεί μέσω της διεπαφής χρήστη που διαθέτει να δείξει πως λειτουργούν οι τοπολογίες αλλά και πως οι τοπολογίες σχηματίζονται κατά την εκτέλεση κάπου αλγορίθμου. Περιλαμβάνει επίσης τους απαραίτητους μηχανισμούς για πειραματισμούς με τις κλασσικές θεωρίες σχετικά με τον Έλεγχο Τοπολογίας.

Είναι βασισμένο στην θεωρία όπου ο Έλεγχος Τοπολογίας είναι διαχωρισμένος σε δύο τμήματα. Το πρώτο που ονομάζεται Κατασκευή Τοπολογίας όπου κτίζεται η αρχική μειωμένη τοπολογία και στην συνέχεια το δεύτερο που είναι υπεύθυνο για την επαναφορά, επαναδημιουργία ή χρήση άλλης εναλλακτικής τοπολογίας κατά τη διάρκεια ζωής του δικτύου, που ονομάζεται Συντήρηση Τοπολογίας.

## **6.2 Περιγραφή εσωτερικής δομής Atarraya.**

Το Atarraya αποτελείται από τέσσερα βασικά εσωτερικά λειτουργικά στοιχεία, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1:

- I. Βασικό Νήμα Προσομοίωσης : Η Κλάση `the_sim`
- II. Διαχειριστής Πρωτοκόλλων : Η Κλάση `NodeHandler`
- III. Νήμα Πολλαπλών Διεργασιών: Η Κλάση `BatchExecutor`
- IV. Διαχειριστής Εμφάνισης : Η Κλάση `newpanel`



Σχήμα 6.1: Λειτουργικά Στοιχεία του Atarraya [2].

### Βασικό Νήμα Προσομοίωσης : Η Κλάση the\_sim

Στο αρχείο atarraya\_frame.java εκτός από τη δήλωση της κλάσης atarraya\_frame υπάρχει και η δήλωση της κλάσης the\_sim. Η κλάση the\_sim αποτελεί βασικό στοιχείο αυτού του συστήματος αφού μέσα σε αυτή γίνεται η δήλωση των βασικών νημάτων της προσομοίωσης. Κύριος ρόλος αυτού του νήματος είναι να παίρνει το επόμενο στη σειρά γεγονός από τη ουρά εκτέλεσης και να το μεταβιβάζει στην διεργασία Node Handler.

Έτσι η κλάση atarraya\_frame μπορεί να έχει αρκετά αντίγραφα τύπου the\_sim και τις σχετικές πληροφορίες για την διαχείριση κάθε προσομοίωσης όπως χρόνος εκτέλεσης κάθε συμβάντος μέσα στην ουρά του κάθε νήματος. Ακόμη η κλάση atarraya\_frame μπορεί να περιέχει πληροφορίες σχετικές με την διαχείριση πρωτοκόλλων αφού στην ίδια κλάση γίνονται οι δηλώσεις των Node Handler στιγμιότυπων. Επίσης κρατά τις

βασικές δομές σχετικά με την τοπολογία του δίκτυο και τις αντίστοιχες και μεταβλητές και πληροφορίες διαχείρισης τους. Έναν επιπλέον ρόλο που έχει η κλάση αυτή είναι η διαχείριση της διεπαφής χρήστη και οι κατάλληλες μέθοδοι παρουσίασης των πληροφοριών σε ένα δυο διαστάσεων γραφικό περιβάλλον. Στο τέλος όπως είναι φυσικό υπάρχουν και οι δηλώσεις των μεταβλητών και συναρτήσεων που είναι υπεύθυνες για τα διάφορα στατιστικά και αποτελέσματα που μπορεί να προσφέρει το εργαλείο.

Επιστρέφοντας πίσω στην κλάση `the_sim`, κατά τη δημιουργία ενός στιγμιότυπου, γίνεται μια εισαγωγή των αρχικών γεγονότων στην ουρά προτού ξεκινήσει και αν όντος σε κάποια περίπτωση αυτή η ουρά είναι άδεια πριν την εκτέλεση θεωρούμε ότι έχει συναντήσει κάποιο πρόβλημα και σταματά η εκτέλεση.

Αφού ξεκινήσει το νήμα, μπαίνει σε ένα βρόγχο εκτέλεσης, όπου κάθε φορά παίρνει ένα νέο γεγονός από την ουρά και το στέλνει στην διεργασία `Node Handler`. Εδώ υπάρχουν τρεις διαφορετικές συνθήκες για τον τερματισμό του βρόγχου. Η πρώτη περίπτωση είναι να μην υπάρχουν άλλα γεγονότα στην ουρά, άλλη περίπτωση είναι να μπαίνουν όλοι οι κόμβοι σε μία τελική κατάσταση ή όταν γίνεται άμεση εισήγηση τερματισμού προσομοίωσης από κάποιο πρωτόκολλο.

### **Διαχειριστής Πρωτοκόλλων : Η Κλάση `NodeHandler`**

Η κλάση αυτή διαχειρίζεται τα αντίστοιχα πρωτόκολλα που επιλέγηκαν για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Μπορεί να υποστηρίξει τεσσάρων ειδών πρωτόκολλα:

- I. Ελέγχου Τοπολογίας
- II. Συντήρηση Τοπολογίας
- III. Διαχείριση αισθητήρων και δεδομένων
- IV. Επικοινωνίας και δρομολόγησης

Έτσι κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, μέσω αυτής της κλάσης δημιουργούνται τα αντίστοιχα στιγμιότυπα.

## Το Νήμα Πολλαπλών Διεργασιών: Η Κλάση BatchExecutor

Αυτό το νήμα βοηθά στην προσομοίωση γεγονότων που απαιτούν πολλαπλές εκτελέσεις. Όπως για παράδειγμα είναι η εκτέλεση μια ομάδας από συγκεκριμένες τοπολογίες που συνήθως γίνεται για σκοπούς έρευνας, ή ακόμη και για εκτελέσεις πολλαπλών προσομοιώσεων.

## Διαχειριστής Εμφάνισης: Η Κλάση newpanel

Σε αυτή τη κλάση γίνεται η αναπαράσταση της προσομοίωσης σε ένα δυο διαστάσεων γραφικό περιβάλλον. Μέσα στο αρχείο atarraya\_frame.java υπάρχει η δήλωση της κλάσης newpanel που είναι μια επέκταση της JPanel κλάσης και είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση της τοπολογίας στο σχετικό παράθυρο του εργαλείου.

## 6.3 Διαχείριση γεγονότων και η δομή των πρωτοκόλλων.

Είναι η κλάση που μοντελοποιεί τη δομή κάποιου πρωτόκολλου στον Atarraya και διαχειρίζεται όλα τα γεγονότα. Με τον όρο γεγονότα στα πλαίσια αυτού του εργαλείου εννοούμε την αποστολή και παραλαβή κάποιου μηνύματος. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μηνυμάτων καθορισμένες στο αρχείο με τις σταθερές constants.java όπως για παράδειγμα μηνύματα ελέγχου που είναι τα Hello ή και απλά μηνύματα Data, περιέχοντας δεδομένα που δημιουργήθηκαν όπου τον αισθητήρα.

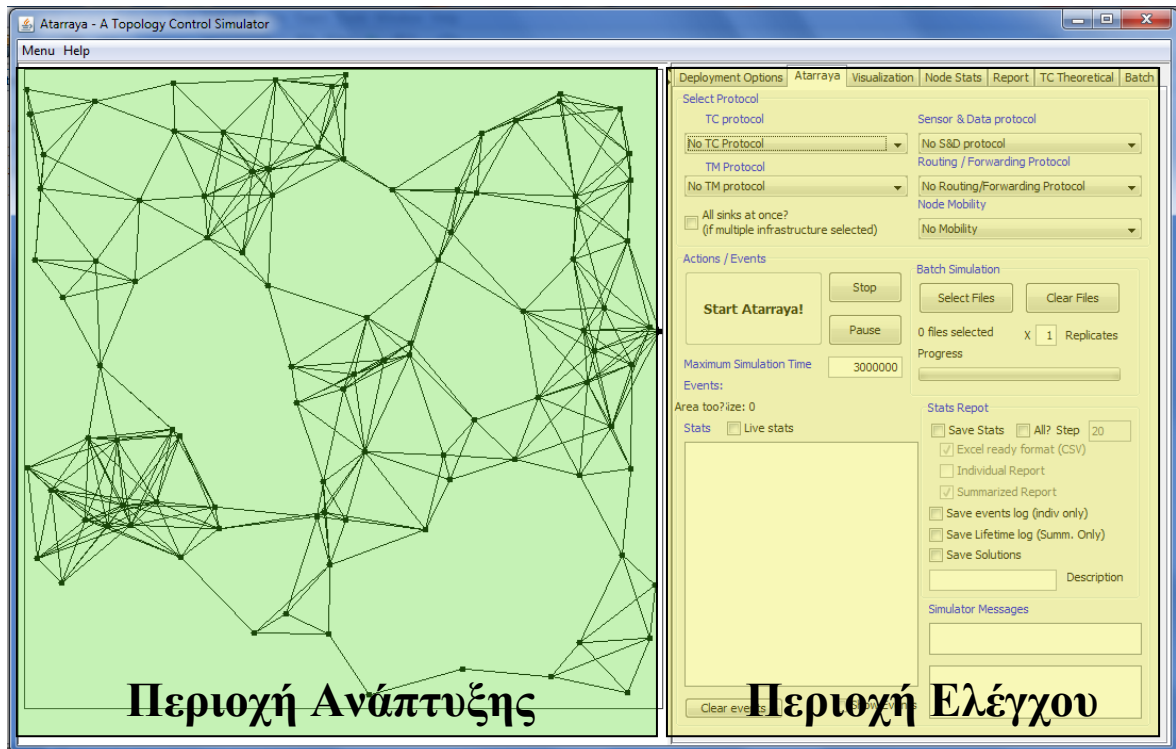
Κάθε νέο πρωτόκολλο που ορίζεται θα πρέπει να υλοποιεί το interface αυτό. Επίσης πρέπει να υπάρχει στιγμιότυπο αναφοράς στο atarraya\_frame έτσι ώστε να γίνεται η διαχείριση των επιλογών συνδυασμού λειτουργίας διάφορων πρωτοκόλλων. Σε κάθε πρωτόκολλο δίνεται η δυνατότητα δήλωσης των καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρίσκετε ένας κόμβος όπως για παράδειγμα: “Initial”, “Active”, “Inactive”, “Sleeping”.

Μια άλλη μέθοδος που αξίζει να σημειωθεί είναι η init\_nodes όπου σε αυτή γίνονται οι βασικές αρχικοποιήσεις σε κάθε κόμβο, οι οποίες αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για την εκτέλεση του κάθε αλγορίθμου.

Η μέθοδος `initial_event` αφού καθορίσει κάποιες αρχικές επιλογές στον κόμβο από τον οποίο θα ξεκινήσει η προσομοίωση συνήθως είναι η κεντρική μονάδα (Sink), σπρώχνει στην ουρά γεγονότων το πρώτο μήνυμα.

Τα πρωτόκολλα μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις έτοιμες δομές του εργαλείου για να αποστείλουν ένα μήνυμα, όπως για παράδειγμα χρησιμοποιώντας την μέθοδο μετάδοσης (broadcast), αλλά ακόμη και να καθορίσουν νέες μεθόδους αν είναι απαραίτητες από το πρωτόκολλο. Μια επιλογή στις παραμέτρους αποστολής κάποιου μηνύματος είναι ο τύπος του μηνύματος. Όπως αναφέραμε και πιο πριν το μήνυμα μπορεί να είναι διαφόρων τύπων. Άλλες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην κλήση τέτοιων μεθόδων, όπως τα πραγματικά δεδομένα που παρέχει το μήνυμα μπορούν να καθοριστούν ξεχωριστά σε κάθε πρωτόκολλο αν υπάρχει ανάγκη γι' αυτό. Η παραλαβή των μηνυμάτων γίνεται μέσω ενός μηχανισμού ελέγχου επιλογής Switch-case. Έτσι ανάλογα με τον τύπο που αναφέρει το μήνυμα καταλήγει στην κατάλληλη περίπτωση του τρέχων πρωτόκολλου.

## 6.4 Το περιβάλλον εργασίας του Atarraya



Σχήμα 6.2: Γενική Δομή Γραφικού Περιβάλλοντος

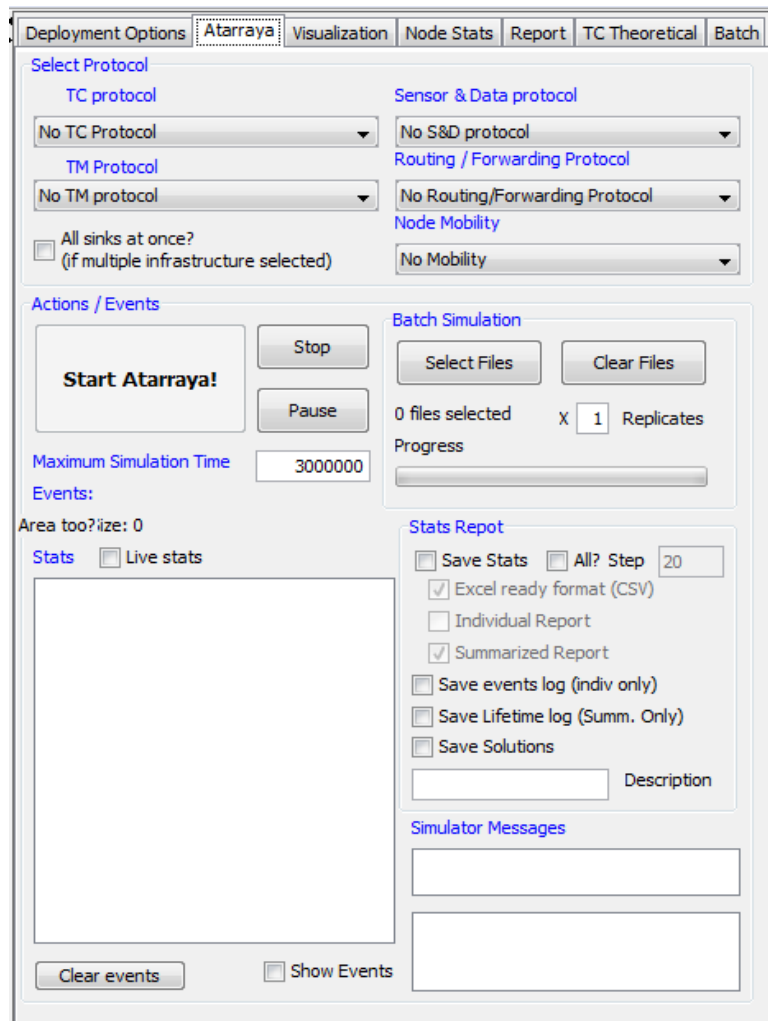
Στο Σχήμα 6.2 μπορούμε να δούμε ότι το εργαλείο προσομοίωσης διαχωρίζεται σε δυο τμήματα, στο αριστερό μέρος εμφανίζονται τα εικονικά αποτελέσματα της αναπαράστασης των ανάλογων επιλογών που έγιναν στην Περιοχή Ελέγχου των επιλογών της προσομοίωσης (δεξιό μέρος).

Στην Περιοχή Ελέγχου υπάρχουν διάφορες επιλογές (Tabs) όπου στην κάθε φόρμα μπορούμε να συμπληρώσουμε διάφορα στοιχεία για τη προσομοίωση, όπως για παράδειγμα στοιχεία για την ανάπτυξη και συντήρηση της τοπολογίας.

Σχήμα 6.3: Επιλογές Ανάπτυξης Προσομοίωσης (Deployment Options)

Έτσι στην φόρμα Επιλογών Ανάπτυξης Προσομοίωσης (Deployment Options) όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3 μπορούμε να καθορίσουμε πληροφορίες όπως των αριθμών των κόμβων, την εμβέλεια των αισθητήρων, την εμβέλεια της επικοινωνίας των κόμβων και την μέθοδο κατανομής των κόμβων.

Ένα χαρακτηριστικό της εφαρμογής που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι έχει τη δυνατότητα να μας παρουσιάσει στον ίδιο γράφο πολλές διαφορετικές τοπολογίες με διαφορετικές κεντρικές μονάδες (Sinks).



Σχήμα 6.4: Επιλογές Πρωτοκόλλων Προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 6.4 μπορούμε να διαλέξουμε το πρωτόκολλο Ελέγχου Τοπολογίας (TC Protocol), Συντήρησης Τοπολογίας (TM Protocol), το πότε τα πακέτα θα δημιουργηθούν και από τι θα αποτελούνται στη επιλογή πρωτοκόλλων Αισθητήρων και Δεδομένων (Sensor and Data Protocol), πως θα δρομολογούνται στο δίκτυο και πως θα μεταβιβάζονται στον επόμενο κόμβο με τα πρωτόκολλα Δρομολόγησης και Προώθησης (Routing and Forwarding Protocol) και αν υπάρχουν σενάρια όπου οι κόμβοι είναι κινητοί μπορούν να επιλεχθούν πρωτόκολλα Κινητικότητας (Mobility Protocol).

Η προσομοίωση μπορεί να διακοπεί προσωρινά από τον χρήστη ή και να διακοπεί και να τερματιστεί η εκτέλεση της εφαρμογής. Τα διάφορα στατιστικά στοιχεία μπορούν να

αποθηκευτούν σε CSV μορφότυπο. Επίσης τα σενάρια προσομοίωσης μπορούν να αποθηκευτούν σε μορφότυπο ATA, όπου μπορεί κανείς να εκτελέσει την προσομοίωση της ίδιας τοπολογίας ξανά με διαφορετικές επιλογές πρωτοκόλλων.

## Κεφάλαιο 7

### Υλοποίηση Αλγορίθμων στο Atarraya

---

|                 |    |
|-----------------|----|
| 7.1 Επεκτάσεις  | 44 |
| 7.2 Περιορισμοί | 45 |

---

#### 7.1 Επεκτάσεις

Ακολουθώντας τη δομή του προσομοιωτή Atarraya δημιουργήσαμε τέσσερα διαφορετικά αρχεία, δύο για τον κάθε αλγόριθμο. Στο ένα είναι η περιγραφή της δημιουργίας της αρχικής τοπολογίας και στο άλλο η περιγραφή συμπεριφοράς του αλγορίθμου κατά την αποστολή δεδομένων και των τρόπων αντίδρασης του σε περιπτώσεις συμφόρησης. Για την αρχική τοπολογία του αλγορίθμου HTAP είναι υπεύθυνο το αρχείο `EventHandlerTCHTAP` και για τη δρομολόγηση και αντιμετώπιση των καταστάσεων συμφόρησης το αρχείο `EventHandlerSensorAvoidCongestionAPC`. Στον αλγόριθμο DAIPaS η αρχική τοπολογία καθορίζεται από το αρχείο `EventHandlerTCDALPAS` ενώ για την δρομολόγηση και την αντιμετώπιση των καταστάσεων συμφόρησης το αρχείο `EventHandlerSensorDynamicCongestionControl`.

Όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η βασική δομή δεδομένων του προσομοιωτή είναι μια ουρά στην οποία καταχωρούνται διάφορα γεγονότα με χρονολογική σειρά. Για παράδειγμα μια οντότητα που μπορεί να βρίσκεται στην ουρά αυτή, είναι ένα γεγονός μετάδοσης κάποιου συγκεκριμένου τύπου μηνύματος κάποιου πρωτοκόλλου. Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά του γεγονότος αυτού είναι ο τελικός παραλήπτης, άμεσος παραλήπτης, τρέχον αποστολέας και αρχικός αποστολέας, όπως επίσης και τα δεδομένα που μπορεί να μεταφέρει στο μήνυμα.

Έτσι με αυτό τον τρόπο οι αλγόριθμοι πρέπει να έχουν κάποια δομή βασισμένη στην συνθήκη ελέγχου επιλογής (Switch-case) όπου σε κάθε περίπτωση περιγράφεται η διαδικασία του συγκεκριμένου γεγονότος. Αρχικά, με την κλήση της συνάρτησης `initial_event` όπου είναι υπεύθυνη για την αρχικοποίηση του γεγονότος ανίχνευσης δεδομένων, προσθέτει στη ουρά ένα γεγονός τύπου `QUERY_SENSOR`. Στην περίπτωση αυτή κατά την εκτέλεση του, καθορίζεται η ανίχνευση του γεγονότος σε συγκεκριμένο κόμβο, στην περίπτωση μας, συνήθως καθορίζουμε το γεγονός να είναι κοντά στον κόμβο με ταυτότητα (`id`) 0. Αφού γίνει η αναμετάδοση των δεδομένων, στην περίπτωση ελέγχου `DATA` γίνεται η παραλαβή τους και στο τμήμα αυτό του κώδικα περιγράφεται ακριβώς η συμπεριφορά του κάθε τμήματος του αλγορίθμου.

Επιπλέον, έγιναν οι κατάλληλες ρυθμίσεις για σύνδεση των αλγορίθμων έτσι ώστε να μπορούν να επιλεγούν από το μενού επιλογής που παρουσιάζεται στην επιφάνια χρήστη. Οι αλγόριθμοι αυτοί παρουσιάζονται κάτω από τις επιλογές `Sensor and Data protocol`.

## 7.2 Περιορισμοί

Για την υλοποίηση της δημιουργίας των τοπολογιών, ο προσομοιωτής δεν αντιμετώπιζε καμία αδυναμία αναπαράστασης. Εξάλλου, ως εργαλείο Ελέγχου Τοπολογίας παρείχε όλες τις αναγκαίες λειτουργικότητες και μηχανισμούς για την κατασκευή των τοπολογιών των αλγορίθμων. Επίσης παρείχε κάποιους βασικούς μηχανισμούς, όπου διαχειρίζονταν την ανίχνευση κάποιου συμβάν και την άμεση δρομολόγηση των πακέτων. Αυτά όμως που δεν υλοποιούσε ήταν κάποια αναγκαία στοιχεία, όπως την υλοποίηση προσωρινής μνήμης (`buffer`) και άλλους μηχανισμούς για την διαχείριση θεμάτων σχετικών με τον Έλεγχο Συμφόρησης.

Η υλοποίηση της προσωρινής μνήμης (`buffer`) έγινε σε καθολικό επίπεδο έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα χρήσης της από οποιαδήποτε άλλα πρωτόκολλα. Το μέγεθος της ορίζεται στο κοινό αρχείο σταθερών `constants.java` και μετριέται σε μονάδες (`units`) σε σχέση με τα πακέτα, που κάθε πακέτο ορίζεται σε μια μονάδα.

Για την δρομολόγηση των πακέτων προϋπήρχε ένας συγκεκριμένος πίνακας γειτονικών κόμβων. Όμως, οι αλγόριθμοι που θα ενσωματώναμε παρουσίαζαν κάποιες διαφορετικές ανάγκες ως προς τα πεδία. Για το λόγο αυτό, αντί να διαμορφωθεί ο ήδη υπάρχων πίνακας που τυχόν να επηρέαζε κάποια πρωτόκολλα που τον χρησιμοποιούσαν, έγινε δημιουργία νέου πίνακα που περιλαμβάνει μόνο τους γείτονες που αποτελούν πύλες (gateways) δικτύου και καταδεικνύουν την κατεύθυνση ροής των δεδομένων.

## Κεφάλαιο 8

### Αξιολόγηση Υλοποίησης

---

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 8.1 Κριτήρια Αξιολόγησης         | 47 |
| 8.2 Αξιολόγηση Υλοποίησης HTAP   | 48 |
| 8.3 Αξιολόγηση Υλοποίησης DAIPaS | 50 |
| 8.4 Σχόλια                       | 53 |

---

#### 8.1 Κριτήρια Αξιολόγησης

Όπως είναι φυσικό, για την αξιολόγηση της υλοποίησης των αλγορίθμων στον προσομοιωτή Atarraya, θα πρέπει να πάρουμε προηγούμενα σενάρια εκτέλεσης των αλγορίθμων και να δοκιμαστούν με την νέα υλοποίηση, στον Atarraya. Αφού γίνει αυτό, να συγκριθούν τα νέα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προηγούμενων εκτελέσεων που έγιναν.

Στα προηγούμενα σενάρια, για σκοπούς απόδειξης αποτελεσματικότητας των αλγορίθμων, έγιναν κάποιες μετρήσεις όπως :

- I. Ενέργεια Δικτύου / Αριθμός Κόμβων
- II. Χάσιμο Πακέτων / Αριθμός Κόμβων (Σταθερός Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων )
- III. Χάσιμο Πακέτων / Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων (Σταθερός Αριθμός Κόμβων)
- IV. Κατανάλωση Ενέργειας / Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων (Σταθερός Αριθμός Κόμβων)

Έτσι θα ήταν επιθυμητό να εκτελέσουμε τα ίδια ακριβώς σενάρια με τις ίδιες παραμέτρους και στον Atarraya για να μπορούμε να έχουμε ένα κοινό μέτρο σύγκρισης μεταξύ τους.

Τα προηγούμενα αποτελέσματα είχαν δημιουργηθεί επίσης από κάποιον προσομοιωτή ο αλγόριθμος HTAP σε Matlab, και ο DAIPaS σε Matlab-Prowler [17] ασύρματων δικτύων αισθητήρων και δυστυχώς πάρα πολλές παράμετροι που καθορίζονταν σε εκείνες τις προσομοιώσεις αδυνατούν να χαρακτηριστούν από τον προσομοιωτή Atarraya.

Με τον όρο Συντελεστής Πιστότητας (Fidelity Factor) εννοούμε το ποσοστό ομοιότητας της προσομοίωσης με την πραγματικότητα ή με το σχετικό περιβάλλον που γίνεται η σύγκριση. Ωστόσο ο δείκτης ομοιότητας αυτός στα αποτελέσματα προσομοιώσεων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο αφού καταδεικνύει κατά πόσο τα νέα αποτελέσματα μπορούν να υπάρξουν. Έτσι και στην δική μας υλοποίηση έγιναν αρκετές προσπάθειες σε κάθε προσομοίωση να κρατηθεί αυτός ο δείκτης σε υψηλά ποσοστά.

## **8.2 Αξιολόγηση Υλοποίησης HTAP**

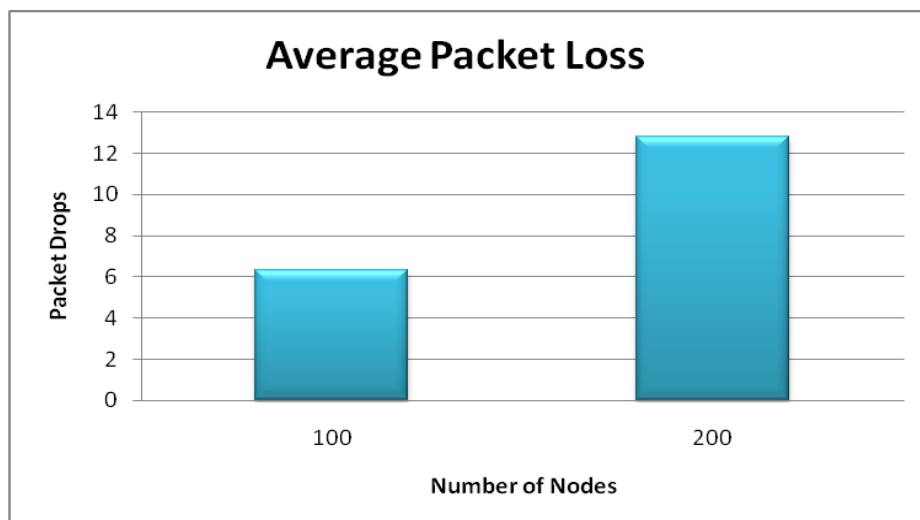
Για να έχουμε ορατά αποτελέσματα της εφαρμογής των αλγορίθμων έγιναν κατάλληλες ρυθμίσεις στις παραμέτρους της προσομοίωσης, όπως αναφέρονται και στον Πίνακα 8.1 έτσι ώστε να παίρνουμε δείγματα από δίκτυα που βρίσκονται σε κατάσταση συμφόρησης .

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη δειγμάτων και την εξαγωγή μέσων όρων των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1.

|                      |                                    |
|----------------------|------------------------------------|
| Deployment Area      | 600x600                            |
| Communication Radius | 100                                |
| Buffer Size          | 10                                 |
| Data Message Size    | 1                                  |
| Sending Rate         | 30packets/sec                      |
| Simulation Duration  | 35sec                              |
| Event Occurs         | More than 3 Hops<br>away from Sink |

Πίνακας 8.1: Παράμετροι Προσομοίωσης

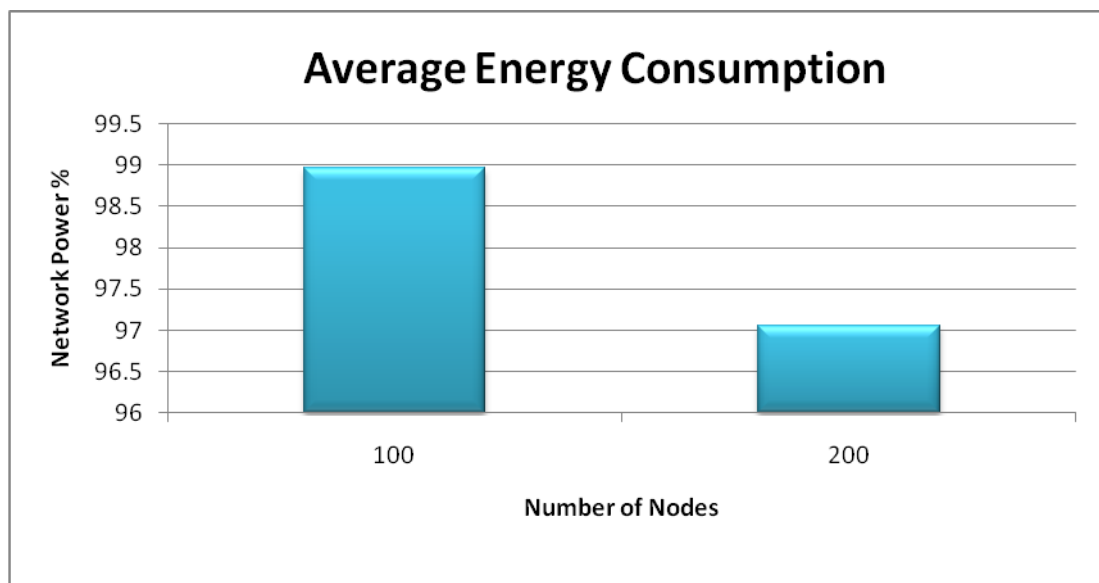
Αρχικά, έγιναν μετρήσεις σχετικά με τον αριθμό των πακέτων που χάνονται στο δίκτυο σε τέτοιες συνθήκες. Αφού πήραμε αρκετά δείγματα σε κάθε περίπτωση των 100 και 200 κόμβων αντίστοιχα υπολογίσαμε τους μέσους όρους τους. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.1 πιο κάτω στους 100 κόμβους χάνουμε 6.3 πακέτα (μέσος όρος) και 12.8 στους 200 αντίστοιχα. Στην αντίστοιχη αξιολόγηση στο [15] οι μετρήσεις έδειχναν 7 πακέτα χάνονταν στους 100 κόμβους και 15 στους 200, που αυτό καταδεικνύει ότι βρισκόμαστε στα ίδια περίπου επίπεδα.



Σχήμα 8.1: Μέση Τιμή - Χάσιμο Πακέτων

Στην συνέχεια πήραμε στοιχεία σχετικά με την κατανάλωση της ενέργειας που γίνεται στο δίκτυο την στιγμή που εμφανίζεται η συμφόρηση. Γενικά η υλοποίηση του αλγορίθμου είχε ως στόχο την αποφυγή υπερφορτωμένων κόμβων κατά τη δρομολόγηση των πακέτων αλλά και συνάμα αφού αυτό διεκπεραιώνεται μέσα από μηχανισμό τοπολογίας που εμπλέκει την αύξηση της χωρητικότητας έχουμε μειωμένα επίπεδα κατανάλωσης. Αυτά τα χαμηλά επίπεδα οφείλονται και στην απλότητα της υλοποίησης του αλγορίθμου.

Στο Σχήμα 8.2 παρουσιάζονται τα ποσοστά κατανάλωσης της ενέργειας, όπου μπορούμε να δούμε ότι το δίκτυο έχει απομείνει με 98.96% στις προσομοιώσεις των 100 κόμβων και 97.06% στις προσομοιώσεις των 200. Παρόμοια αποτελέσματα είχαμε και στο [15] αφού είχαμε ποσοστά 97.14% στις προσομοιώσεις των 100 κόμβων και 96.80% στις προσομοιώσεις των 200.



Σχήμα 8.2: Μέση Τιμή Ενέργειας Δικτύου

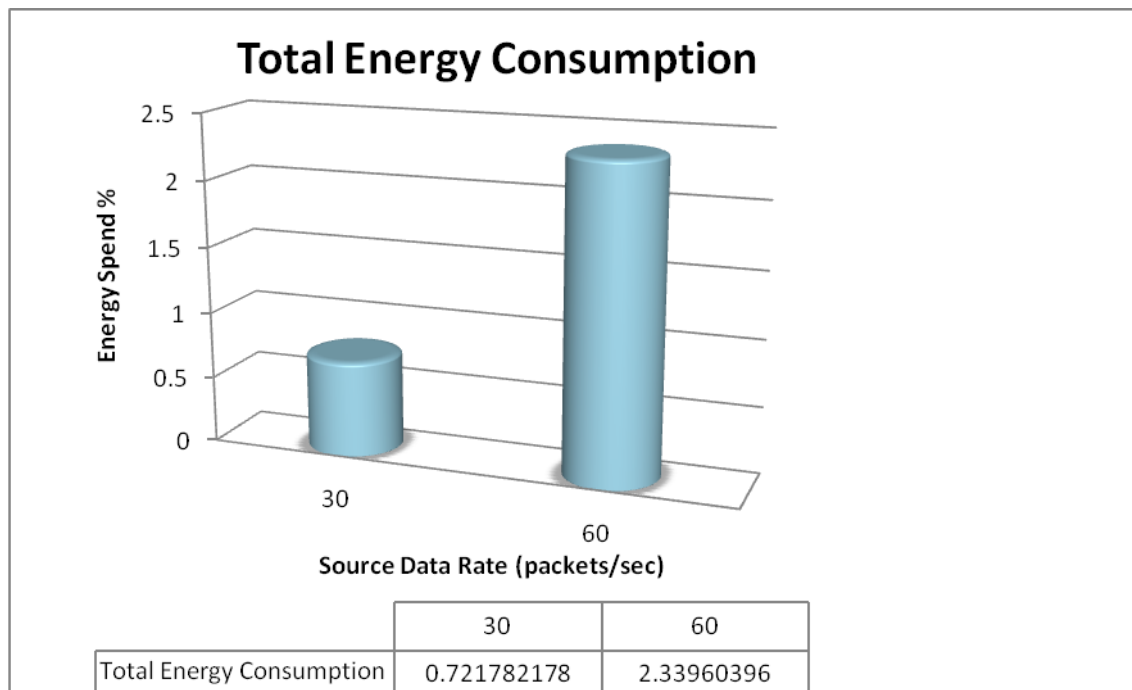
### 8.3 Αξιολόγηση Υλοποίησης DAIPaS

Και σε αυτό τον αλγόριθμο πάλι προσπαθήσαμε να προκαλέσουμε συνθήκες συμφόρησης μέσα από τις κατάλληλες ρυθμίσεις των παραμέτρων προσομοίωσης. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι για να μπορέσουμε να δούμε τα αποτελέσματα σε περιπτώσεις που το δίκτυο βρίσκεται σε κρίσιμες καταστάσεις και όχι απλά κατά την

ομαλή λειτουργία των αλγορίθμων. Έτσι έγιναν κατάλληλες ρυθμίσεις στις παραμέτρους της προσομοίωσης, όπως αναφέρθηκαν στον Πίνακα 6.2. Εδώ όμως ο χρόνος εκτέλεσης της κάθε προσομοίωσης ήταν 45sec και ο αριθμός των κόμβων μένει σταθερός.

|                      |                                    |
|----------------------|------------------------------------|
| Deployment Area      | 600x600                            |
| Communication Radius | 100                                |
| Buffer Size          | 10                                 |
| Data Message Size    | 1                                  |
| Number of Nodes      | 100                                |
| Simulation Duration  | 45sec                              |
| Event Occurs         | More than 3 Hops<br>away from Sink |

Πίνακας 8.2: Παράμετροι Προσομοίωσης

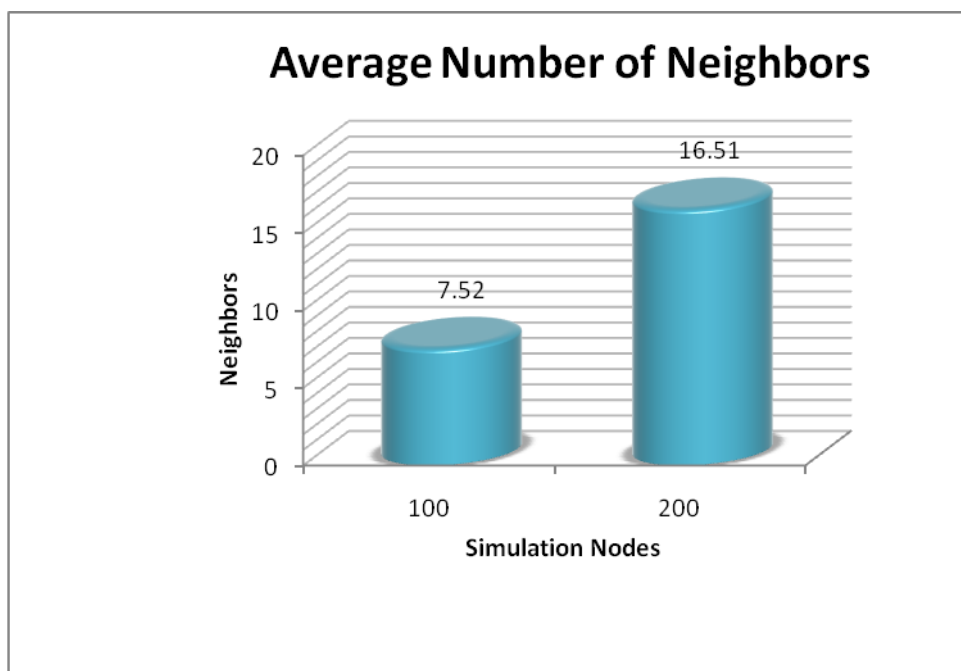


Σχήμα 8.3: Κατανάλωση Ενέργειας αναλόγως Ρυθμού Μετάδοσης Πακέτων

Στο [14] κατά την αξιολόγηση του αλγορίθμου οι μετρικές που λαμβάνονται υπόψη είναι η κατανάλωση της ενέργειας σε σχέση με τον ρυθμό δημιουργίας των δεδομένων στις πηγές. Στην περίπτωση μας εξετάσαμε τις περιπτώσεις όπου οι πηγές ανίχνευαν δεδομένα με ρυθμό 30 πακέτα ανά δευτερόλεπτο και 60 πακέτα ανά δευτερόλεπτο αντίστοιχα και η απόδοση είναι ανάλογη όπως και στο [14].

Στο τέλος αξίζει να σημειωθεί μια επιπλέον παράμετρος/παρατήρηση των προσομοιώσεων αυτών, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς σύγκρισης των δειγμάτων των τοπολογιών που παίρνουν μέρος στις προσομοιώσεις.

Η τιμή αυτή όπως βλέπουμε από το Σχήμα 6.4 αφορά τον αριθμό των γειτονικών κόμβων που μπορεί να είχε ο κάθε κόμβος και όπως είναι φυσικό αυτό εξαρτάται από την ακτίνα επικοινωνίας των κόμβων, το εμβαδόν της περιοχής ανάπτυξης και από την τυχαία τοποθέτησή τους σ' αυτή τη περιοχή.



Σχήμα 8.4: Μέση Τιμή Γειτόνων του κάθε κόμβου

## 8.4 Σχόλια

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η υλοποίηση του αλγόριθμου HTAP στον προηγούμενο προσομοιωτή κατασκεύαζε την τοπολογία, αφού είχε ήδη διαδραματιστεί κάποιο γεγονός κοντά σε κάποιους κόμβους αισθητήρες. Έτσι με αυτό τον τρόπο όσοι κόμβοι ήταν εντός εμβέλειας μπορούσαν να ξεκινήσουν την κατασκευή του δέντρου τους. Αυτό δεν ήταν εφικτό να γίνει ακριβώς έτσι αλλά μπορούσαμε να καθορίσουμε τους κόμβους τους οποίους μπορούν να κάνουν ανίχνευση τέτοιων γεγονότων. Συγκεκριμένα καθοριζόταν ένας κόμβος πηγή όπου πάντοτε τη πρώτη φορά που ανίχνευε το γεγονός μετάδιδε (broadcast) σε όλους τους γειτονικούς σχετικούς κόμβους τα δεδομένα και έτσι με αυτό τον τρόπο ήταν σαν να γινόταν από περισσότερους κόμβους η ανίχνευσης αν όντος έτσι θα ήταν.

Επίσης δεν ήταν δυνατό να καθορίσουμε παραμέτρους όπως την ταχύτητα του επεξεργαστή των κόμβων όπως γινόταν στο [14] ή την επιλογή του πρωτοκόλλου Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC Layer) όπως το [15] αλλά έγιναν ανάλογες προσπάθειες της δημιουργίας της επιθυμητής συμπεριφοράς μέσω του κατάλληλου κώδικα.

## Κεφάλαιο 9

### Συμπεράσματα

---

|                        |    |
|------------------------|----|
| 9.1 Συμπεράσματα       | 54 |
| 9.2 Μελλοντική δουλειά | 55 |

---

#### 9.1 Συμπεράσματα

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αρκετούς σκοπούς σε πολλούς τομείς. Συνήθως όμως κάθε περίπτωση η χρήση τους έχει διαφορετικούς λόγους. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι η εφαρμογή να απαιτεί την ασφαλή μεταφορά των δεδομένων που ανιχνεύθηκαν με βάση κάποιο γεγονός. Έτσι αυτά τα οδηγούμενα από γεγονότα δίκτυα μπορούν να βρεθούν σε μια κρίσιμη κατάσταση την στιγμή που θα ανιχνευτούν τα νέα γεγονότα. Εκεί ακριβώς πρέπει το δίκτυο να καταφέρει να συγκρατήσει και να μεταφέρει επιτυχώς όλα τα πακέτα. Την ευθύνη για τέτοιες κατάστασης έχουν οι μηχανισμοί Ελέγχου συμφόρησης.

Γενικά οι αλγόριθμοι Ελέγχου Συμφόρησης τείνουν να διαχωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Στην πρώτη προσπαθούν να μειώσουν των ρυθμό μετάδοσης των πληροφοριών, όπου πολλές φορές είναι ανέφικτο λόγω περιορισμών της εφαρμογής και στην άλλη περίπτωση προσπαθούν να αυξήσουν την χωρητικότητα του δικτύου προσθέτοντας ή αξιοποιώντας επιπλέον κόμβους σε κάθε νέο γεγονός.

Όπως είδαμε οι αλγόριθμοι Ελέγχου Συμφόρησης που παρουσιάσαμε προσπαθούσαν να αυξήσουν την χωρητικότητα του δικτύου αξιοποιώντας νέους κόμβους. Για να το πετύχουν αυτό έκαναν χρήση μηχανισμών Ελέγχου Τοπολογίας όπου δημιουργούσαν

νέες τοπολογίες με απώτερο σκοπό την εύρεση εναλλακτικών μονοπατιών, αποφεύγοντας έτσι τους υπερφορτωμένους κόμβους.

Αυτή η προσπάθεια δεν είναι η μόνη αλλά όπως και σε άλλες σχετικές έρευνες όπως στο άρθρο με τίτλο “TARA: Topology-Aware Resource Adaptation to Alleviate Congestion in Sensor Networks” [6] τα αποτελέσματα επίσης ήταν θετικά.

Η μελέτη αλγορίθμων με παρόμοια λογική φαίνεται να οδηγεί σε αποδοτικά αποτελέσματα αλλά θα ήταν επιθυμητή η ύπαρξη ενός προσομοιωτή που θα υποστήριζε τις προσπάθειες αυτές και όπου να έδινε περισσότερες δυνατότητες για μελέτη και έρευνα. Ο Atarraya μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τέτοιες μελέτες αλλά όπως αναφέραμε και πιο πριν μερικές επιπλέον λειτουργικότητες θα τον έκαναν ακόμη πιο κατάλληλο για τέτοιες περιπτώσεις.

Κατά τη αξιολόγηση τα αποτελέσματα έδειξαν την σημασία και τις δυνατότητες αυτής της νέας λογικής που πραγματικά αποτελεί υποσχόμενη λύση για τέτοια θέματα. Ο συνδυασμός αυτός της αποφυγής περιπτώσεων συμφόρησης με το να λαμβάνει υπόψη θέματα ενέργειας παράλληλα οδηγεί σε νέους καινοτομικούς τρόπους σκέψης και θέματα για έρευνα. Ωστόσο η υλοποίηση των αλγορίθμων στον προσομοιωτή Atarraya παρόλο που ήταν σε ικανοποιητικά επίπεδα μπορεί να βελτιωθεί και να μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα στις περιγραφές τέτοιου είδους αλγορίθμων.

## **9.2 Μελλοντική δουλειά**

Το εργαλείο προσομοίωσης Atarraya όπως αναφέραμε δημιουργήθηκε κατά την προσπάθεια παρουσίασης και αξιολόγησης αλγορίθμων τοπολογίας. Για το λόγο αυτό, κατά την κατασκευή του, δόθηκε περισσότερη έμφαση σε στοιχεία που αφορούν την κάλυψη μιας περιοχής αλλά και λεπτομέρειες σχετικά με την ενέργεια του δικτύου.

Επειδή οι αλγόριθμοι σαν απώτερο σκοπό δεν είχαν μόνο την εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και την αποφυγή καταστάσεων συμφόρησης κατά τη προσπάθεια υλοποίησης τους ήταν απαραίτητη η αναπαράσταση της προσωρινής μνήμης (buffer) των κόμβων και κατάλληλων μηχανισμών διαχείρισης τους. Αυτή η προσπάθεια έγινε σε ένα πιο

γενικό επίπεδο για σκοπούς διαλειτουργικότητας, δηλαδή να μπορούν αργότερα όλοι οι αλγόριθμοι ή μελλοντικοί να χρησιμοποιήσουν τις νέες δομές της προσωρινής μνήμης και των επιπλέον αναγκαίων πινάκων που είχαν οι κόμβοι, για την αποθήκευση πληροφοριών σχετικά με τους γειτονικούς κόμβους.

Για πιο ακριβείς προσομοιώσεις αλγόριθμων ελέγχου συμφόρησης θα μπορούσαμε να παρουσιάσουμε ένα πραγματικό πρωτόκολλο επιπέδου Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC Layer) όπου θα υλοποιούνταν μηχανισμοί όπως αναμεταδώσεις σε αυτό το επίπεδο (MAC level retransmissions) αλλά και τον ανάλογο Κατακερματισμό (Fragmentation).

Επιπλέον, μια εισήγηση θα ήταν ο πειραματισμός με τις υπόλοιπες τοπολογίες που μπορεί να κατασκευάσει ο Atarraya σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους που ενσωματώσαμε. Δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τοπολογίες, έτσι ώστε να εκμεταλλευτούμε τυχόν επιπλέον δυνατότητες και στην συνέχεια να εφαρμοστεί κάποια συμπεριφορά Ελέγχου Συμφόρησης όπως στους αλγορίθμους HTAP και DAIPaS.

## Βιβλιογραφία

- [1] K. Sohraby, D. Minoli, T. Znati, *Wireless Sensor Networks - Technology, Protocols, and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007
- [2] Miguel A. Labrador , Pedro M. Wightman. *Topology Control in Wireless Sensor Network*". Springer Science + Business Media B.V. 2009
- [3] Chee-Yee Chong, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges" *Proceedings of The IEEE*, Vol. 91, No. 8, pp.1247-1256, August 2003
- [4] Pedro M. Wightman<sup>1</sup> and Miguel A. Labrador, "Topology Control in Wireless Sensor Networks". Tutorial given at *IEEE Latincom 2010*
- [5] Bret Hull, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, "Mitigating Congestion in Wireless Sensor Networks", *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, November 03-05, 2004, Baltimore, MD, USA.
- [6] J. Kang, Y. Zhang, and B. Nath, "TARA: Topology-aware resource adaptation to alleviate congestion in sensor networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 18, no. 7, pp. 919–931, 2007.
- [7] C. Sergiou and V. Vassiliou, "Alternative path creation vs data rate reduction for congestion mitigation in wireless sensor networks," in *IPSN '10: Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (Poster Session). New York, NY, USA: ACM, 2010, pp. 394–395.
- [8] C. K. Toh, "Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks", *IEEE Communication Magazine*, pp. 138–147, June 2001.

- [9] M. K. Marina and S. R. Das, "Ad Hoc on-demand Multipath Distance Vector Routing," *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 6, no. 3, pp. 92–93, 2002.
- [10] Y. Sankarasubramaniam, Akan, and I. F. Akyildiz, "ESRT: Event-to-Sink Reliable Transport in wireless sensor networks," in *MobiHoc '03: Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. New York, NY, USA: ACM, 2003, pp. 177–188. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/778415.778437>
- [11] C.-Y. Wan, S. B. Eisenman, and A. T. Campbell, "CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks," in *SenSys '03: Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. New York, NY, USA: ACM Press, 2003, pp. 266–279. [Online]. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=958523>
- [12] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, and D. Estrin, "Highlyresilient, Energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks," *Sigmobile Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 5, no. 4, pp. 11–25, 2001.
- [13] R. P. Mann, K. R. Namuduri and R. Pendse, "Energy-Aware Routing Protocol for Ad Hoc Wireless Sensor Networks", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol 5, pp. 635–644, 2005.
- [14] Charalambos Sergiou and Vasos Vassiliou "DAIPaS: A Performance Aware Congestion Control Algorithm in Wireless Sensor Networks", *ICT 2011*, Ayia Napa, Cyprus.
- [15] Charalambos Sergiou, Vasos Vassiliou, Andreas Pitsillides, "Reliable Data Transmission in Event-based Sensor Networks During Overload Situation", *PWSN 2007 - 2nd International ICST Workshop on Performance Control in Wireless Sensor Networks*, Austin, Texas, October, 2007.

- [16] Akyildiz, I.F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-114, August 2002.
- [17] Prowler: Probabilistic wireless network simulator. [Online]. Available: <http://www.isis.vanderbilt.edu/Projects/nest/prowler>