



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ενεργειακά Αποδοτική Συλλογή Δεδομένων σε Ασύρματα
Δίκτυα Αισθητήρων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Στυλιανή Α. Καφετζόγλου

Αθήνα, Ιούλιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ενεργειακά Αποδοτική Συλλογή Δεδομένων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Στυλιανή Α. Καφετζόγλου

Συμβουλευτική Επιτροπή : Συμεών Παπαβασιλείου
Βασίλειος Μάγκλαρης
Θεοδώρα Βαρβαρίγου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την:

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Βασίλειος Μάγκλαρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Θεοδώρα Βαρβαρίγου
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιλτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Ματσόπουλος
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δημήτριος Βέργαδος
Επ. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....

Στυλιανή Α. Καφετζόγλου

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Στυλιανή Α. Καφετζόγλου, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν ένα νέο παράδειγμα δικτύωσης το οποίο έχει μεταβάλλει τον τρόπο αντίληψης των χρηστών για τον περιβάλλοντα χώρο τους. Σε αντίθεση με τα υπάρχοντα αυτο-οργανούμενα δίκτυα, τα δίκτυα αισθητήρων προορίζονται για εφαρμογές όπου θα λειτουργούν δίχως επίβλεψη για ορισμένο χρονικό διάστημα και συνήθως η αντικατάσταση των πηγών ενέργειας τους (μπαταρίες στις περισσότερες περιπτώσεις) είναι ιδιαίτερα δύσκολη ή ακόμα και αδύνατη διαδικασία. Ως εκ τούτου, ο περιορισμός της κατανάλωσης της δαπανώμενης ενέργειας στα δίκτυα τέτοιου τύπου με σκοπό την αύξηση της διάρκειας ζωής τους, αποτελεί πρωταρχικό στόχο κατά την ανάπτυξη πρωτοκόλλων και διαδικασιών.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και μελέτη μεθοδολογιών και αλγορίθμων ασύρματης επικοινωνίας αισθητήρων με απώτερο στόχο την ενεργειακά αποδοτική συλλογή δεδομένων και την ταυτόχρονη εξασφάλιση συγκεκριμένων δεικτών ποιότητας υπηρεσίας. Οι μέθοδοι οι οποίες παρουσιάζονται υιοθετούν στοιχεία από τις προτεινόμενες λύσεις στην βιβλιογραφία ενώ την επεκτείνουν καθώς προτείνεται ένα γενικό πλαίσιο το οποίο κινείται σε δύο κατευθύνσεις. Αρχικά, παρουσιάζεται ένα μοντέλο συστήματος το οποίο επιτυγχάνει την μείωση της κίνησης των πακέτων πληροφορίας τα οποία συλλέγονται σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μέσω τεχνικών συνάθροισης, ενώ η δεύτερη προσέγγιση αφορά στην δημιουργία ενός ενεργειακά αποδοτικού πρωτοκόλλου πρόσβασης μέσου.

Πιο συγκεκριμένα, οδηγούμενη από τη μείωση του επικοινωνιακού κόστους που δύναται να επιφέρει η τεχνική της συνάθροισης, η οποία μειώνει το πλήθος των δεδομένων σε ένα δίκτυο, προτείνουμε ένα πλαίσιο συλλογής δεδομένων το οποίο λειτουργεί με κατανεμημένο και πιθανοτικό τρόπο. Η μέθοδος συνάθροισης μοντελοποιείται και αξιολογείται αναλυτικά, ενώ προδιαγράφεται και υλοποιείται ένα πρωτόκολλο συνάθροισης δεδομένων - ανεξάρτητο της δρομολόγησης - το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε εφαρμογή η οποία κάνει χρήση ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Επιπρόσθετα, το πρωτόκολλο αυτό λαμβάνει υπόψη του χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας επιτρέποντας την αποδοτική εφαρμογή και χρήση του σε εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων πραγματικού χρόνου καθώς και σε δίκτυα τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και μεταβλητότητα στο κανάλι επικοινωνίας, όπως είναι για παράδειγμα τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων. Κατ' επέκταση

η ενεργειακά αποτελεσματική συλλογή δεδομένων με ταυτόχρονη συνάθροιση αυτών ανάγεται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο και επιλύεται με τεχνικές αποσύνθεσης πρωτεύοντος-δυσικού προβλήματος. Προτείνεται και αξιολογείται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος ο οποίος επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με εύρεση των βέλτιστων σημείων - κόμβων και περιόδων συνάθροισης.

Η δεύτερη στρατηγική, εστιάζει στο στρώμα πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control) και στοχεύει στην δημιουργία ενός ενεργειακά αποδοτικού πρωτοκόλλου πρόσβασης σε αυτό. Η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει την επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου αισθητήρων, κάνοντας χρήση προγραμμάτων *ακρόασης – ύπνου*, μειώνοντας ταυτόχρονα τον χρόνο αδρανούς ακρόασης των αισθητήρων. Οι αισθητήρες επιλέγουν πρόγραμμα λειτουργίας, συγχρονίζονται με τους γειτονικούς τους κόμβους και σχηματίζονται μονοπάτια πληροφορίας τα οποία επιτυγχάνουν χαμηλή μέση καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο. Παράλληλα, επιθυμώντας τη μεγιστοποίηση των ενεργειακών κερδών από τις δύο διαφορετικές τεχνικές - συνάθροιση δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογής και χρήση προγραμμάτων στο επίπεδο πρόσβασης - προτάθηκε ένας συνδυασμένος κατανεμημένος αλγόριθμος συλλογής, ο οποίος εφαρμόζει συνάθροιση δεδομένων για χρονικό διάστημα εξαρτώμενο από την κατάσταση του κάθε κόμβου. Η προτεινόμενη μέθοδος, επιπλέον, υποστηρίζει διασφάλιση συγκεκριμένων μετρικών Ποιότητας της Υπηρεσίας. Για την αξιολόγηση του πρωτοκόλλου πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένα πειράματα προσομοιώσεων, όπου διαπιστώθηκαν τα ενεργειακά οφέλη τα οποία επιφέρει η μέθοδος μας, ιδιαίτερα όταν συγκρίνεται με παραδοσιακά πρωτόκολλα πρόσβασης στο μέσο.

Λέξεις κλειδιά: Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, συνάθροιση και συλλογή δεδομένων, ποιότητα υπηρεσίας, πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου

Abstract

Wireless sensor networking is an emerging technology that has revolutionized the way people perceive their environment. As a result, Wireless Sensor Networks (WSN) comprises a fast-developing research area with a vast spectrum of applications. However, unlike other wireless ad-hoc networks, sensor networks are envisioned to work unattended for a period of time and it is generally hard, or sometimes impossible, to replace or recharge their energy supply (e.g. sensors are usually battery operated). There is no doubt that protocols designed for sensor networks must consider energy conservation as the primary objective due to the power/energy limitations in tiny sensors and the need to promote system longevity. This thesis addresses the problem of energy efficient data gathering in wireless sensor networks, while satisfying certain Quality of Service (QoS) criteria. Focus is placed on two directions: minimize energy consumption by means of data aggregation and development of an energy efficient MAC layer protocol that reduces the idle period of sensor nodes.

Specifically, our first approach is driven by the observation that data aggregation can significantly reduce the amount of data in the network, thus resulting in less communication cost. In that direction, we introduce a novel data gathering framework for resource-constrained sensor networks. The proposed framework is also suitable for stringent sensor networking environments, which on top of the conventional sensor technology limitations, present additional constraints such as limited bandwidth and large propagation delays. In the proposed approach a distributed and probabilistic method is applied by the various sensor nodes to perform data aggregation based only on local information. The adopted aggregation method aims at utilizing the available limited resources efficiently and effectively reducing significantly the network traffic, and as a result shortening the delays at the intermediate nodes and reducing the corresponding collisions and energy wastage in data transmission. Moreover, the problem of energy efficient data gathering via aggregation is modeled as a convex optimization problem and primal dual decomposition is enforced for its solution. Our goal is to minimize the consumption of energy in the sensor nodes, by means of data aggregation, in order to increase the lifetime of the network, while at the same time satisfy some delay constraint. Solving this problem results in obtaining the optimal probability value, for a node to aggregate packets, as well as the optimal aggregation period that a node waits so as to minimize the overall energy consumption.

Our second approach deals with energy minimization at a lower level, i.e. the Medium Access Control layer, where an energy efficient protocol which utilizes sleep / wake schedules, in order to reduce the energy consumed by idle listening, is proposed. Sensor nodes synchronize with their neighbors, so as to form paths of information, resulting in a decrease in the average end to end delay. We further extend the proposed framework, by combining the two different energy saving methods, one at the application layer, namely data aggregation, and one at the MAC layer by appropriately adopting sleeping mechanisms. Its combined operation is coordinated and its effectiveness is improved by following a cross layer approach where local information about the status of each sensor, including its sleep/awake schedules, feed a subsequent data aggregation phase, that gathers correlated data and aggregates it to a single packet towards its way to the sink by applying a fully localized, distributed, probabilistic method. The proposed framework also supports delay constraint enforcement to ensure that the Quality of Service constraints are met, and is highly adjustable in order to adapt to the unique demands of each application. Simulation results demonstrate the significant energy savings achieved by our proposed framework, especially when compared to conventional MAC layer approaches and/or data aggregation approaches.

Keywords: Wireless sensor networks, Data aggregation, Energy efficient data gathering, Quality of service, Medium access control layer protocols

Ευχαριστίες

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής μου ήταν πολλοί οι άνθρωποι που με στήριξαν και με βοήθησαν και προέρχονται τόσο από το ακαδημαϊκό όσο και από το φιλικό και συγγενικό μου περιβάλλον.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Συμεών Παπαβασιλείου για την ουσιαστική υποστήριξη που μου προσέφερε και για την υποδειγματική μας συνεργασία. Η εμπιστοσύνη του στο πρόσωπο μου και η καθοδήγηση του αποτέλεσαν τα σημαντικότερα εφόδια για την εκπόνηση και ολοκλήρωση των διδακτορικών σπουδών μου, ακόμα και όταν ο δρόμος φαινόταν δύσβατος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Βασίλη Μάγκλαρη για την βοήθεια του αλλά και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ως μέλος του εργαστηρίου Διαχείρισης και Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων (NETMODE) , καθώς επίσης τη Μαίρη Γραμματικού για την άψογη συνεργασία μας.

Θα ήθελα, επιπλέον, να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ), του οποίου είμαι υπότροφος από το 2005, για την οικονομική υποστήριξη που μου προσέφερε.

Η πορεία αυτή θα ήταν πολύ πιο δύσβατη χωρίς την άψογη συνεργασία και τις γόνιμες συζητήσεις με τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω τον Κώστα, τον Γιώργο, τον Βασίλη, τον Άγγελο, τον Τίμο, τη Βασιλική, τον Κώστα, το Βαγγέλη, την Ειρήνη, την Έλενα, την Χρύσα, το Χρήστο, τον Άρη και τον Αλέξανδρο, για τις ιδέες, του προβληματισμούς αλλά και τα διαλλείματα που μοιραστήκαμε. Ιδιαίτερα θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Γιώργο Αριστομενόπουλο, οι συμβουλές και η βοήθεια του οποίου συντέλεσαν στην ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους γονείς μου, τον παππού, τη γιαγιά μου και τον αδερφό μου Χάρη, καθώς και τον Γιώργο για την ανεκτίμητη υποστήριξη και φροντίδα που μου έχουν προσφέρει. Τους αγαπώ και τους ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου.

Στην οικογένεια μου ...

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 23 |
| 1.1 | Αντικείμενο & συμβολή της διατριβής | 24 |
| 1.2 | Διάθρωση της διατριβής..... | 26 |
| 2 | ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ | 29 |
| 2.1 | Εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων | 30 |
| 2.1.1 | Στρατιωτικές εφαρμογές | 30 |
| 2.1.2 | Παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος | 31 |
| 2.1.3 | Εφαρμογές υγείας | 33 |
| 2.1.4 | Άλλες εφαρμογές..... | 34 |
| 2.2 | Μέθοδοι συλλογής και συνάθροισης δεδομένων | 34 |
| 2.2.1 | Ιεραρχικές προσεγγίσεις | 38 |
| 2.2.2 | Μη ιεραρχικές προσεγγίσεις | 44 |
| 2.2.3 | Τεχνικές κατανεμημένης συμπίεσης δεδομένων | 45 |
| 2.2.4 | Συλλογή και συνάθροιση δεδομένων κατ' απαίτηση του κέντρου συλλογής..... | 46 |
| 2.2.5 | Επίδραση της διαδικασίας της συνάθροισης στη μέση καθυστέρηση | 49 |
| 2.3 | Ενεργειακά αποδοτικές μέθοδοι πρόσβασης μέσου | 51 |
| 2.3.1 | Πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης στο μέσο..... | 53 |
| 2.3.2 | Πρωτόκολλα προγραμματισμένης πρόσβασης στο μέσο | 56 |
| 2.3.3 | Υβριδικά πρωτόκολλα | 59 |
| 2.3.4 | Επίδραση των προγραμμάτων λειτουργίας των αισθητήρων στη μέση καθυστέρηση | 60 |
| 3 | ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ & ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ | 63 |
| 3.1 | Μοντέλο συστήματος & διαδικασία συνάθροισης..... | 63 |
| 3.2 | Μοντελοποίηση της διαδικασίας συνάθροισης | 66 |
| 3.2.1 | Εύρεση του κάτω ορίου για την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης P_{succ} .. | 68 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3 | Συλλογή και προώθηση δεδομένων | 70 |
| 3.3.1 | Πολυπλοκότητα αλγορίθμου HELLO | 73 |
| 3.3.2 | Ανακατασκευή του δέντρου συλλογής..... | 73 |
| 3.3.3 | Κατασκευή ισοσταθμισμένου δέντρου | 75 |
| 3.4 | Αποτελέσματα προσομοιώσεων..... | 78 |
| 3.4.1 | Περιβάλλον προσομοίωσης..... | 78 |
| 3.4.2 | Μελέτη της επίδρασης του γ στην πιθανότητα επιτυχίας & την ποσότητα της καταναλισκόμενης ενέργειας | 82 |
| 3.4.3 | Μελέτη της επίδρασης του τ στην πιθανότητα επιτυχίας & την ποσότητα καταναλισκόμενης ενέργειας | 86 |
| 3.4.4 | Μελέτη της επίδρασης του ρυθμού γεννήσεων πακέτων στη μέση καθυστέρηση & την ποσότητα καταναλισκόμενης ενέργειας..... | 88 |
| 3.4.5 | Μελέτη της επίδρασης του γ στη μέση καθυστέρηση & την ποσότητα καταναλισκόμενης ενέργειας | 90 |
| 3.5 | Χρήση του αλγορίθμου σε περιβάλλοντα με περιορισμό στο ρυθμό μετάδοσης | 91 |
| 3.5.1 | Κατασκευή του δέντρου συλλογής..... | 95 |
| 3.5.2 | Συλλογή δεδομένων | 95 |
| 3.5.3 | Αποτελέσματα προσομοιώσεων | 96 |

4 ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ 104

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1 | Το πρόβλημα της αύξησης της ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στη βιβλιογραφία..... | 104 |
| 4.2 | Μοντελοποίηση & καθορισμός του προβλήματος..... | 106 |
| 4.2.1 | Μοντέλο συστήματος..... | 106 |
| 4.2.2 | Μοντέλο κίνησης & συνάθροισης..... | 106 |
| 4.2.3 | Διατύπωση προβλήματος..... | 107 |
| 4.2.4 | Παραδοχές & αιτιολόγηση | 109 |
| 4.3 | Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης | 112 |
| 4.3.1 | Επιλύοντας τα ανεξάρτητα υπο-προβλήματα αισθητήρων (SP) | 113 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 4.3.2 | Υπολογίζοντας τον πολλαπλασιαστή <i>Lagrange</i> της <i>SP</i> | 114 |
| 4.3.3 | Επιλύοντας το πρόβλημα της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας (Κυρίαρχο Πρόβλημα) | 115 |
| 4.3.4 | Σύγκλιση & βελτιστότητα | 116 |
| 4.4 | Κατανεμημένος αλγόριθμος ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας..... | 117 |
| 4.5 | Αριθμητικά αποτελέσματα | 119 |
| 5 | ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΚΡΟΑΣΗΣ / | |
| ΥΠΝΟΥ | 128 | |
| 5.1 | Το πρωτόκολλο SMAC..... | 128 |
| 5.2 | Προτεινόμενο πρωτόκολλο ακρόασης - Ύπνου | 130 |
| 5.2.1 | Αποτελέσματα προσομοιώσεων | 132 |
| 5.3 | Συνδυασμός πρωτοκόλλου Ακρόασης - Ύπνου με συνάθροιση δεδομένων..... | 136 |
| 5.3.1 | Υπολογισμός του χρόνου συνάθροισης..... | 138 |
| 5.3.2 | Αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγόριθμου..... | 141 |
| 5.3.3 | Υβριδικός ενεργειακά αποδοτικός αλγόριθμος | 148 |
| 6 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ..... | 151 |
| 6.1 | Τρέχουσες & μελλοντικές κατευθύνσεις | 153 |
| 6.1.1 | Μοντελοποίηση & ανάλυση του δικτύου αισθητήρων μέσω της θεωρίας ουρών αναμονής | 153 |
| 6.1.2 | Δίκτυα με ανοχή στην καθυστέρηση & ασύρματα δίκτυα αισθητήρων..... | 154 |
| 7 | ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ | 157 |
| 8 | ΑΝΑΦΟΡΕΣ | 159 |

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|------------|
| <i>Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου αισθητήρων στο Great Duck Island.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Εικόνα 2: Αισθητήρες στο δάσος για την υλοποίηση του James Reserve προγράμματος</i> | <i>32</i> |
| <i>Εικόνα 3: Αισθητήρας SHIMMER</i> | <i>33</i> |
| <i>Εικόνα 4: Διαδικασία Συνάθροισης.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Εικόνα 5: Δημιουργία Ομάδων Αισθητήρων</i> | <i>39</i> |
| <i>Εικόνα 6: Δημιουργία Αλυσίδας Αισθητήρων</i> | <i>41</i> |
| <i>Εικόνα 7: Δημιουργία Δέντρου Αισθητήρων</i> | <i>43</i> |
| <i>Εικόνα 8: Διαδικασία Συνάθροισης.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Εικόνα 9: Απεικόνιση των επιπέδων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων</i> | <i>70</i> |
| <i>Εικόνα 10: Δομή επικεφαλίδας HELLO</i> | <i>71</i> |
| <i>Εικόνα 11: Δέντρο συλλογής πριν την πτώση του κόμβου 24</i> | <i>74</i> |
| <i>Εικόνα 12: Δέντρο συλλογής μετά την πτώση του κόμβου 24</i> | <i>75</i> |
| <i>Εικόνα 13: Τοπολογία δικτύου αισθητήρων.....</i> | <i>79</i> |
| <i>Εικόνα 14: Ενέργεια μετάδοσης και λήψης.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Εικόνα 15: Τυπική τοπολογία υποβρύχιου δικτύου αισθητήρων</i> | <i>93</i> |
| <i>Εικόνα 16: Διαδικασία συλλογής δεδομένων.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Εικόνα 17: Σχηματική Αναπαράσταση του αλγορίθμου ΑΕΜ</i> | <i>119</i> |
| <i>Εικόνα 18: Χρονική δομή κύκλου ακρόασης / ύπνου</i> | <i>128</i> |
| <i>Εικόνα 19: Δημιουργία συγχρονισμένων υπο-δέντρων</i> | <i>131</i> |
| <i>Εικόνα 20: Στρωματική αναπαράσταση προτεινόμενου αλγορίθμου.....</i> | <i>138</i> |

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

| | |
|---|-----|
| Διάγραμμα 1: Ελάχιστος χρόνος ζωής του δικτύου για τις μεθόδους HELLO και LBTP | 76 |
| Διάγραμμα 2: Πλήθος πακέτων τα οποία ανταλλάσσονται για την κατασκευή του δέντρου για τις μεθόδους HELLO και LBTP..... | 77 |
| Διάγραμμα 3: Πιθανότητα επιτυχίας συναρτήσει του γ και πιθανότητα επιτυχίας για μη εφαρμογή της μεθόδου ($\tau = 0.4 \text{ sec}, D = 2 \text{ sec}, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)..... | 83 |
| Διάγραμμα 4: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του γ και για μη εφαρμογή της μεθόδου ($\tau = 0.4 \text{ sec}, D = 2 \text{ sec}, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)..... | 83 |
| Διάγραμμα 5: Πιθανότητα επιτυχίας συναρτήσει του γ για $D = 2 \text{ sec}$ και $D = 4 \text{ sec}$ ($\tau = 0.4 \text{ sec}, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)..... | 84 |
| Διάγραμμα 6: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του γ για $D = 2 \text{ sec}$ και $D = 4 \text{ sec}$ ($\tau = 0.4 \text{ sec}, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)..... | 84 |
| Διάγραμμα 7: Πιθανότητα επιτυχίας συναρτήσει του τ για $D = 4 \text{ sec}$ και $D = 6 \text{ sec}$ ($\gamma = 1, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)..... | 86 |
| Διάγραμμα 8: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του τ για $D = 4 \text{ sec}$ και $D = 6 \text{ sec}$ ($\gamma = 1, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)..... | 87 |
| Διάγραμμα 9: Μέση καθυστέρηση για $1/\lambda$ για $D = \infty$ για εφαρμογή και μη της μεθόδου | 88 |
| Διάγραμμα 10: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του φορτίου για $D = \infty$ για εφαρμογή και μη της μεθόδου | 89 |
| Διάγραμμα 11: Μέση καθυστέρηση και καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του $\gamma \in [0.2, 1.0]$ για $D = \infty$ και $\tau = 0.4 \text{ sec}$ | 91 |
| Διάγραμμα 12: Μέση καθυστέρηση για διάφορους ρυθμούς γέννησης πακέτων..... | 97 |
| Διάγραμμα 13: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ | 98 |
| Διάγραμμα 14: Καταναλισκόμενη ενέργεια για διάφορους ρυθμούς γέννησης πακέτων | 99 |
| Διάγραμμα 15: Μέση καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ | 100 |
| Διάγραμμα 16: Πιθανότητα επιτυχημένης συνάθροισης συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ | 101 |
| Διάγραμμα 17: Πιθανότητα επιτυχημένης συνάθροισης συναρτήσει της περιόδου συνάθροισης τ για $D = 6 \text{ sec}$ | 102 |
| Διάγραμμα 18: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης για χρονικό περιορισμό $D = 20 \text{ sec}$ | 121 |

| | |
|---|-----|
| Διάγραμμα 19: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης για χρονικό περιορισμό $D = 40sec$ | 121 |
| Διάγραμμα 20: Κατανάλωση Ενέργειας για χρονικό περιορισμό $D = 20sec$ | 122 |
| Διάγραμμα 21: Κατανάλωση Ενέργειας για χρονικό περιορισμό $D = 40sec$ | 123 |
| Διάγραμμα 22: Κέρδος πληροφορίας για χρονικό περιορισμό $D = 40sec$ | 125 |
| Διάγραμμα 23: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης σε δυναμικό περιβάλλον..... | 126 |
| Διάγραμμα 24: Κατανάλωση ενέργειας σε δυναμικό περιβάλλον..... | 127 |
| Διάγραμμα 25: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης συναρτήσει του ρυθμού γεννήσεων πακέτων ($D = 8 sec$)..... | 134 |
| Διάγραμμα 26: Μέση καθυστέρηση συναρτήσει του ρυθμού γεννήσεων πακέτων ($D = \infty$) | 135 |
| Διάγραμμα 27: Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει του ρυθμού γεννήσεων πακέτων..... | 136 |
| Διάγραμμα 28: Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της κίνησης στο δίκτυο..... | 142 |
| Διάγραμμα 29: Μέση καθυστέρηση συναρτήσει της κίνησης στο δίκτυο | 144 |
| Διάγραμμα 30: Μέση καθυστέρηση και κατανάλωσης ενέργειας συναρτήσει της πιθανότητας συνάντησης | 147 |
| Διάγραμμα 31: Μέση καθυστέρηση συναρτήσει της κίνησης για τους αλγορίθμους EEF και HEEF .. | 149 |
| Διάγραμμα 32: Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της κίνησης για τους αλγορίθμους EEF και HEEF | 149 |

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|------------|
| <i>Πίνακας 1: Διαδικασία HELLO κατασκευής δέντρου συλλογής.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Πίνακας 2: Μέση καθυστέρηση & κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης</i> | <i>90</i> |
| <i>Πίνακας 3: Λειτουργία του αλγορίθμου ΑΕΜ.....</i> | <i>118</i> |
| <i>Πίνακας 4: Πρωτόκολλο Συγχρονισμού Δέντρου.....</i> | <i>131</i> |
| <i>Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά προσομοίωσης</i> | <i>133</i> |
| <i>Πίνακας 6: Αλγόριθμος υπολογισμού χρόνου συνάθροισης.....</i> | <i>140</i> |
| <i>Πίνακας 7: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης μεθόδου EEF.....</i> | <i>146</i> |
| <i>Πίνακας 8: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης για τις μεθόδους EEF και HEFF.....</i> | <i>150</i> |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής και ερευνητικής κοινότητας. Τα δίκτυα των αισθητήρων αποτελούνται συνήθως από συσκευές μικρού κόστους και μεγέθους, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ τους και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη συλλογή δεδομένων από το φυσικό περιβάλλον. Τα δεδομένα αυτά ποικίλουν ως προς τη φύση τους - για παράδειγμα μπορεί να είναι ηχητικά, σεισμικά, περιβαλλοντικά, ιατρικά κ.α, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια πληθώρα εφαρμογών όπως στρατιωτικές, περιβαλλοντολογικές, ιατρικές κ.λ.π. [1].

Ένα κατακεκομμένο δίκτυο αισθητήρων είναι συνήθως ένα αυτο-οργανούμενο σύστημα που αποτελείται από μεγάλο αριθμό αισθητήρων. Οι αισθητήρες – κόμβοι του δικτύου συνεργάζονται μεταξύ τους για να παρατηρήσουν και να μετρήσουν διάφορες παραμέτρους και στοιχεία του φυσικού περιβάλλοντος, τα οποία μπορεί να διαφέρουν χωρικά και χρονικά. Οι αισθητήρες φέρονται σε πλακέτες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και έχουν περιορισμένες υπολογιστικές, αποθηκευτικές και ενεργειακές δυνατότητες. Για το λόγο αυτό τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται από τους αισθητήρες που απαρτίζουν το ασύρματο δίκτυο αποστέλλονται σε ένα κέντρο συλλογής (collection center) το οποίο δεν παρουσιάζει τους παραπάνω περιορισμούς. Στα κέντρα συλλογής πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση των στοιχείων με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα και να αποφασιστούν ενέργειες.

Η αποστολή των δεδομένων στο κέντρο συλλογής πραγματοποιείται συνήθως μέσω επικοινωνίας πολλαπλών βημάτων [2] (multi-hop communication), καθώς, λόγω του περιορισμού στην ακτίνα μετάδοσης τους, οι περισσότεροι κόμβοι δεν έχουν τη δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας με τον κόμβο – συλλέκτη. Κάθε κόμβος στέλνει τα πακέτα δεδομένων του στους γείτονές τους και οι κόμβοι αυτοί με την σειρά τους τα προωθούν στους γείτονες τους, μέχρι τελικά να φτάσουν στον τελικό προορισμό. Έτσι κάθε κόμβος προωθεί τα πακέτα των γειτόνων του, εκτός από τα δικά του, λειτουργώντας κατά κάποιο τρόπο σαν ενδιάμεσος δρομολογητής. Ο τρόπος αυτός επικοινωνίας είναι ενεργειακά πιο αποδοτικός και επιπλέον δίνεται η δυνατότητα κλιμάκωσης του δικτύου αισθητήρων [3]. Όπως ήδη έχει αναφερθεί οι αισθητήρες έχουν ενεργειακούς περιορισμούς καθώς λειτουργούν με μπαταρίες και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει δυνατότητα επαναφόρτισης ή αντικατάστασης αυτών. Για να αυξήσουμε την διάρκεια ζωής ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων πρέπει να

περιορίσουμε την κατανάλωση ενέργειας σε κάθε κόμβο του δικτύου. Η λειτουργία η οποία δαπανά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των κόμβων είναι η ασύρματη επικοινωνία αυτών, δηλαδή η αποστολή και λήψη δεδομένων. Επιπλέον, αντίστοιχης τάξης κατανάλωση ενέργειας, δαπανάται όταν οι αισθητήρες βρίσκονται σε κατάσταση αδρανείας (idle mode), δηλαδή βρίσκονται σε αναμονή είτε να λάβουν είτε να στείλουν δεδομένα. Επομένως για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο πρέπει να στραφούμε στην εύρεση και ανάπτυξη τεχνικών για την μείωση της ενέργειας που δαπανάται τόσο λόγω της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων όσο και της παραμονής τους σε κατάσταση αδρανείας.

Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες κατευθύνσεις όσον αφορά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η πλειοψηφία των οποίων επικεντρώνεται είτε στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας που δαπανάται κατά την επικοινωνία των κόμβων, είτε στην εύρεση τεχνικών στο επίπεδο πρόσβαση μέσου (Media Access Control – MAC) για τον περιορισμό της άσκοπης χρήσης του πομποδέκτη.

Μια ιδιαίτερα προσφιλή προσέγγιση είναι η χρήση τεχνικών συνάθροισης (data aggregation) με σκοπό τη μείωση του αριθμού των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην ενδό-δικτυακή επεξεργασία. Η προσέγγιση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι τα δεδομένα τα οποία συλλέγουν γειτονικοί κόμβοι, λόγω της γειννιάσής τους, παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό συσχέτισης. Εκμεταλλευόμενοι λοιπόν αυτές τις συσχετίσεις μπορούμε να μειώσουμε το μέγεθος των δεδομένων που μεταδίδονται στο δίκτυο με συνέπεια τη μείωση του επικοινωνιακού ενεργειακού κόστους, το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο υπολογιστικό, καθώς σύμφωνα με την μελέτη των Pottie και Kaiser [4] έχει αποδειχτεί ότι η εκτέλεση 3000 εντολών έχει το ίδιο ενεργειακό κόστος με την μετάδοση ενός bit σε απόσταση 100 μέτρων.

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ & ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η χρήση των δικτύων αισθητήρων σε εφαρμογές παρακολούθησης του περιβάλλοντα χώρου απαιτεί την απρόσκοπτη λειτουργία τους για μεγάλο χρονικό διάστημα, δίχως πολλές φορές την ανθρώπινη παρέμβαση, και ως εκ τούτου η αύξηση της διάρκειας λειτουργίας τους αποτελεί ένας από τους κυρίαρχους σχεδιαστικούς παράγοντες πρωτοκόλλων λειτουργίας. Κατά συνέπεια, η παρούσα διδακτορική διατριβή συμβάλλει στο υπάρχον ερευνητικό πεδίο καθώς κινείται σε αυτήν την κατεύθυνση. Σκοπός της είναι η ανάπτυξη και μελέτη μεθοδολογιών και αλγορίθμων ασύρματης επικοινωνίας αισθητήρων με απώτερο στόχο την ενεργειακά αποδοτική συλλογή δεδομένων και την ταυτόχρονη εξασφάλιση συγκεκριμένων

μετρικών ποιότητας υπηρεσίας. Επιπλέον, στόχος μας είναι η χρήση των προτεινόμενων πρωτοκόλλων σε πληθώρα εφαρμογών οι οποίες δύναται να έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας, όπως είναι η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, όπου η έγκαιρη συλλογή της πληροφορίας στο κέντρο επεξεργασίας μπορεί να είναι εξίσου σημαντική και τίθεται ως χρονικός περιορισμός. Πράγματι, σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν χρονική ακρίβεια στις μετρήσεις, δεδομένα τα οποία λαμβάνονται με χρονική καθυστέρηση δεν μπορούν να αποδώσουν το παρατηρούμενο γεγονός με την επιθυμητή ακρίβεια και αμεσότητα και ως εκ τούτου οι μετρήσεις θεωρούνται παρωχημένες και δε χρησιμοποιούνται.

Η ενεργειακά αποδοτική συλλογή των δεδομένων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων θα επιτευχθεί μέσω δύο διαφορετικών στρατηγικών και προσεγγίσεων. Αρχικά την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας στο επίπεδο εφαρμογής που θα πραγματοποιεί συνάθροιση δεδομένων (data aggregation). Επιθυμούμε να προδιαγράψουμε και να αξιολογήσουμε ένα πρωτόκολλο συνάθροισης δεδομένων - ανεξάρτητο της δρομολόγησης - το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε εφαρμογή η οποία κάνει χρήση ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα, η συνάθροιση των δεδομένων αποφασίζεται σε κάθε κόμβο με κατανομημένο και πιθανοτικό τρόπο και χρήση μόνο τοπικής πληροφορίας. Η κατανομημένη φύση του πρωτοκόλλου καθώς και η ανεξαρτησία του από τη δρομολόγηση το καθιστά μια ιδιαίτερη ελκυστική και αποδοτική λύση για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπου οι κεντροποιημένες λύσεις επιφέρουν πολυπλοκότητα στην εφαρμογή και λειτουργία καθώς και αύξηση του επικοινωνιακού κόστους. Επιπρόσθετα, το πρωτόκολλο αυτό θα μπορεί να ικανοποιεί διάφορους περιορισμούς ποιότητας υπηρεσίας οι οποίοι τίθενται από τις εφαρμογές.

Στη συνέχεια το πρόβλημα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας μετασχηματίζεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης και αναπτύσσεται αλγόριθμος επίλυσης αυτού, ο οποίος εφαρμόζει τεχνικές συνάθροισης στους κόμβους του δικτύου για βέλτιστο υπολογιζόμενο χρονικό διάστημα. Η αύξηση της διάρκειας ζωής ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων έχει οριστεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης και επιλυθεί με διάφορους αλγορίθμους στην βιβλιογραφία. Παρ' όλα αυτά ελάχιστες ερευνητικές εργασίες έχουν συμπεριλάβει τη διαδικασία της συνάθροισης των δεδομένων στη μοντελοποίηση του συστήματος και στον ορισμό του προβλήματος, μη λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τη χρονική καθυστέρηση που επιφέρει. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει να υπολογίσει τα βέλτιστα σημεία συνάθροισης σε συνδυασμό με τη βέλτιστη περίοδο ώστε το σύστημα να ελαχιστοποιήσει την

συνολική κατανάλωση ενέργειας ενώ παράλληλα να ικανοποιεί δεδομένο χρονικό περιορισμό.

Η δεύτερη στρατηγική, επικεντρώνεται στο στρώμα πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control) και εστιάζει στην δημιουργία ενεργειακά αποδοτικού πρωτοκόλλου πρόσβασης σε αυτό. Καθώς ο ανταγωνισμός για κατάληψη του καναλιού, οι συγκρούσεις πακέτων και οι επαναμεταδόσεις αποτελούν από τις μεγαλύτερες πηγές κατανάλωσης ενέργειας για τις ασύρματες συσκευές, κρίνεται αναγκαία η εύρεση ενεργειακά αποτελεσματικών πρωτοκόλλων στο επίπεδο αυτό. Σκοπός μας λοιπόν είναι, η ανάπτυξη ενός τέτοιου πρωτοκόλλου το οποίο θα επεκτείνει την διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρων. Οδηγούμενοι από την παρατήρηση ότι ένας κόμβος ο οποίος βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής δαπανά αντίστοιχη ποσότητα ενέργεια με αυτήν για αποστολή / λήψη δεδομένων, επιθυμούμε να μειώσουμε τον χρόνο αυτό με την περιοδική απενεργοποίηση των ασύρματων κόμβων. Διάφορα πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου έχουν προταθεί τα οποία κάνουν χρήση προγραμμάτων λειτουργίας, εισάγοντας όμως καθυστέρηση στη συλλογή των δεδομένων. Επιθυμώντας να εφαρμόσουμε τον χρονικό περιορισμό, κατά αναλογία με τα παραπάνω, προτείνουμε ένα αλγόριθμο ο οποίος συγχρονίζει τους γειτονικούς κόμβους του δικτύου σε υπο-δέντρα συλλογής δεδομένων, μειώνοντας τη συνολική μέση καθυστέρηση που συναντά ένα πακέτο στο δίκτυο. Επίσης, εξετάζεται και πραγματοποιείται ο συνδυασμός των δύο διαφορετικών αυτών μεθόδων (συνάθροισης και περιοδικής λειτουργίας) καθώς κάθε μία αντιστοιχεί σε διαφορετικό επίπεδο και μπορούν να δράσουν συμπληρωματικά με αποτέλεσμα να είναι εφικτός ο συνδυασμός των επιμέρους ενεργειακών πλεονεκτημάτων.

1.2 ΔΙΑΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται ως εξής.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική αναφορά επιστημονικών ερευνών ο οποίες μελετούν τη συλλογή δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με γνώμονα τον περιορισμό στην κατανάλωση της ενέργειας. Οι προτεινόμενες μέθοδοι κατηγοριοποιούνται με βάση τους δύο άξονες στους οποίους κινείται η διδακτορική διατριβή και αξιολογούνται με διάφορα κριτήρια. Επιπλέον παρουσιάζονται ενδεικτικά, γνωστές εφαρμογές και υλοποιήσεις δικτύων αισθητήρων σε πραγματικό περιβάλλον εργασίας, οι οποίες έχουν συνεισφέρει στην πρόοδο και ανάπτυξη του συγκεκριμένου ερευνητικού τομέα.

Στο κεφάλαιο 2 μοντελοποιείται η διαδικασία της συνάθροισης, παρουσιάζεται το μοντέλο του συστήματος και αναπτύσσεται το πρωτόκολλο συλλογής δεδομένων που προτείνεται. Με χρήση εκτενών προσομοιώσεων μελετώνται και αναλύονται τα οφέλη της προτεινόμενης μεθόδου. Στη συνέχεια, το προτεινόμενο πλαίσιο συνάθροισης εφαρμόζεται σε περιβάλλοντα τα οποία θέτουν επιπλέον περιορισμούς στη ταχύτητα διάδοσης και στο ρυθμό μετάδοσης, όπως είναι για παράδειγμα τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων, και αξιολογείται η αποδοτικότητα του.

Στο κεφάλαιο 3, η ενεργειακά αποδοτική συλλογή δεδομένων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ανάγεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στόχος μας είναι η μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας με εφαρμογή συνάθροισης δεδομένων ικανοποιώντας ταυτόχρονα συγκεκριμένους χρονικούς περιορισμούς. Το πρόβλημα επιλύεται με χρήση της αποσύνθεσης πρωτεύοντος-δευτικού προβλήματος, και παρουσιάζονται προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της μεθόδου.

Στο κεφάλαιο 5, το πρόβλημα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας αντιμετωπίζεται στο επίπεδο πρόσβασης μέσου. Προτείνεται και παρουσιάζεται ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο το οποίο κάνει χρήση τεχνικών προγραμματισμού της λειτουργίας των κόμβων. Το πρωτόκολλο αυτό συνδυάζεται με τον αλγόριθμο ο οποίος παρουσιάστηκε και αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2.

Το Κεφάλαιο 6, συνοψίζει το σύνολο της διατριβής, επιχειρηματολογώντας για τη σπουδαιότητα των εξεταζόμενων ερευνητικών προβλημάτων και των σχεδιαστικών μεθόδων που επιλέχτηκαν για την επίλυση τους, ενώ παράλληλα παραθέτει συγκεντρωμένα τα κύρια συμπεράσματα που ανέκυψαν. Τέλος προτείνονται ανοιχτά ερευνητικά θέματα για μελλοντική εργασία που είτε θα μπορούσαν να αποτελούν την συνέχεια αυτής της ερευνητικής προσπάθειας, είτε μπορούν να εκμεταλλευτούν την αποκτημένη γνώση προκειμένου να την εφαρμόσουν σε νέους τομείς και δραστηριότητες.

2 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία η οποία όμως έχει την δυνατότητα να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε το περιβάλλον και τον κόσμο. Αρχικά, αντιμετωπίστηκαν ως μια ειδική κατηγορία των αυτο-οργανούμενων (ad hoc) δικτύων και ως εκ τούτου, οι πρώτοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν όσον αφορά στη δρομολόγηση, τον καθορισμό θέσης και άλλες παραμέτρους και λειτουργίες προέρχονταν από αυτό το πεδίο. Όπως, έχει διαπιστωθεί, όμως, αποτελούν δύο διακριτού τύπου ασύρματα δίκτυα, και ως εκ τούτου παρουσιάζουν αρκετές διαφορές. (Akylidiz et al. [5]), τόσο όσον αφορά στο σχεδιασμό, όσο και στην ενδεχόμενη λειτουργία τους. Η διαπίστωση αυτή ορίζει την ανάγκη εύρεσης νέων πρωτοκόλλων για την επίλυση των αντίστοιχων αλλά και νέων προβλημάτων – προκλήσεων, στο πεδίο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι διαφορές τους έγκεινται τόσο στην τοπολογία και κινητικότητα, όσο και στις περιορισμένες δυνατότητες των αισθητήρων και τις εφαρμογές που δύναται και στοχεύουν να υποστηρίξουν.

Συγκεκριμένα, η συλλογή δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα δεδομένων διαφέρει από αυτή των αυτο-οργανούμενων δικτύων, καθώς η από άκρη σε άκρη επικοινωνία δεν πραγματοποιείται ανάμεσα σε διαφορετικά ζευγάρια κόμβων αλλά οι αισθητήρες δρουν συνεργατικά, με απώτερο σκοπό την συλλογή και μεταφορά των δεδομένων στο κέντρο συλλογής. Οι συσκευές αίσθησης στους κόμβους του ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων παράγουν δεδομένα τα οποία ενθυλακώνουν σε πακέτα και τα αποστέλλουν στο κέντρο συλλογής. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται συλλογή δεδομένων (data gathering) και συναντάται με αρκετές παραλλαγές. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η συλλογή των δεδομένων και η σταδιακή προώθηση τους στο κέντρο συλλογής, επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο αλλά και άλλους μετρήσιμους δείκτες όπως την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση, το ρυθμό απόδοσης και την ακρίβεια στις μετρήσεις. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ενέργεια του κάθε κόμβου εξαρτάται από τα αποθέματα της μπαταρίας του και άρα είναι περιορισμένη. Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως η ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής όλου του δικτύου. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητη η ανάπτυξη πρωτοκόλλων επικοινωνίας και τεχνικών συλλογής που απαιτούν την μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας με την ταυτόχρονη ικανοποίηση των απαιτήσεων της εφαρμογής.

Επιπλέον διαφορές μεταξύ των παραδοσιακών αυτο-οργανούμενων δικτύων και των ασύρματων δικτύων αισθητήρων αφορούν στο πλήθος των συσκευών, καθώς τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από μεγάλο αριθμό κόμβων με πυκνή διάταξη, καθώς επίσης και στην τοπολογία, η οποία δύναται να αλλάζει συνεχώς όχι μόνο λόγω κινητικότητας (στις περισσότερες εφαρμογές οι αισθητήρες είναι κυρίως στατικοί) αλλά λόγω της αποτυχίας στην λειτουργία ορισμένων κόμβων.

2.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Η ανάπτυξη των μικρο-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (Micro-electro-mechanical system - MEMS) και των ασυρμάτων επικοινωνιών έχουν οδηγήσει την έρευνα στην πραγματοποίηση και εγκατάσταση ευρείας κλίμακας, μικρού κόστους και χαμηλής ενέργειας ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Η εγκατάσταση σε τέτοια κλίμακα διασφαλίζει την λειτουργία του δικτύου και την ανεκτικότητα του σε σφάλματα. Επιπλέον, η αυτο-οργανούμενη φύση των δικτύων αυτών βρίσκει ιδιαίτερη χρήση σε διάφορες εφαρμογές, όπως στρατιωτικές, ιατρικές εφαρμογές μελέτης και παρακολούθησης του φυσικού περιβάλλοντος, κ.α..

Για να είναι εφικτό το όραμα των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, έχουν κατασκευαστεί πληθώρα πρότυπων πλατφόρμων αισθητήρων, οι οποίοι συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους και του μικρού μεγέθους. Οι πιο δημοφιλείς ερευνητικές ενέργειες οδήγησαν στην δημιουργία των UCB Mica mote [6] του πανεπιστημίου Berkeley, των uAMPS του πανεπιστημίου MIT [7], των PC104 [8] του Ινστιτούτου ISI του πανεπιστημίου Νότιας Καλιφόρνιας USC, των GNOMES [9] και των Crossbow motes [10].

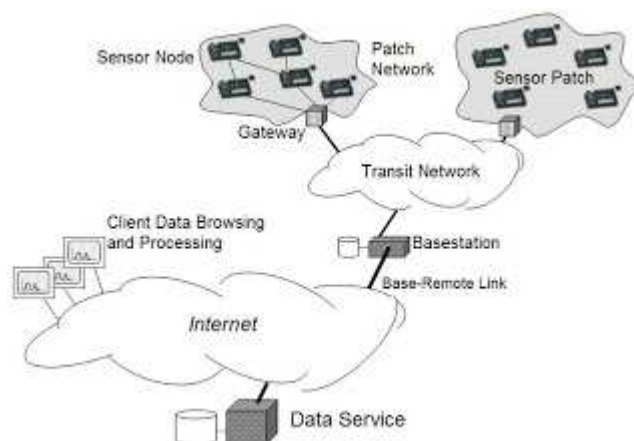
2.1.1 ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης των αισθητήρων, τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε στρατιωτικές εφαρμογές ενώ παράλληλα υπήρξε έντονη ανάπτυξη ερευνητικών δραστηριοτήτων για την υποστήριξη αυτών. Το Ινστιτούτο ανάπτυξης ερευνητικών προγραμμάτων άμυνας (Defense Advanced Research Projects Agency) DARPA χρηματοδότησε δύο πολύ σημαντικά προγράμματα: Το Distributed Sensor Networks (DSN) και το Sensor Information Technology (SensIT), με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων δικτύωσης και συλλογής δεδομένων για χρήση σε εφαρμογές ανίχνευσης και εντοπισμού στόχων και στην παρακολούθηση χώρων [11] - [13].

2.1.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Οι εφαρμογές οι οποίες σχετίζονται με το περιβάλλον αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία ανάπτυξης και λειτουργίας, σε πραγματικές συνθήκες, ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Με την χρήση μικροσκοπικών συσκευών εφοδιασμένων με διάφορους αισθητήρες (όπως πίεσης, υγρασίας, θερμοκρασίας κ.α.) δόθηκε η δυνατότητα μελέτης του οικοσυστήματος (ονομάζεται επίσης και *habitat monitoring*) σε τέτοιο βαθμό, στον οποίο οι επιστήμονες δεν είχαν πρότερη πρόσβαση. Χαρακτηριστικά προγράμματα, στην διάρκεια των οποίων αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν ολοκληρωμένες πλακέτες αισθητήρων καθώς και διάφοροι αλγόριθμοι, όπως δρομολόγησης, αυτο-οργάνωσης κ.α., περιλαμβάνουν το Great Duck Island [14] και το James Reserve [15].

Στο Great Duck Island, ένα νησί 237 στρεμμάτων το οποίο βρίσκεται στον κόλπο Maine των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, μελετήθηκε η χλωρίδα του νησιού αλλά και ειδικότερα οι συνήθειες του πουλιού πετρίλος (*storm petrel*).



ΕΙΚΟΝΑ 1: Αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου αισθητήρων στο Great Duck Island

Το πρόγραμμα James Reserve, το οποίο εφαρμόστηκε στον ομώνυμο δρυμό 29 στρεμμάτων στο Idyllwild της Καλιφόρνια, αποτελούσε ως το 2012 κομμάτι ενός μεγαλύτερου ερευνητικού προγράμματος υπό την επίβλεψη του CENS (Center for Embedded Networked Sensing). Κατά την συνολική του διάρκεια δεκάδες διαφορετικοί αισθητήρες, πρωτόκολλα και διαδικασίες δοκιμάστηκαν σε πραγματικές συνθήκες.



ΕΙΚΟΝΑ 2: Αισθητήρες στο δάσος για την υλοποίηση του James Reserve προγράμματος

Ένα παρόμοιο πρόγραμμα παρακολούθησης του φυσικού περιβάλλοντος αναπτύχθηκε στο εθνικό πάρκο της Χαβάη, Hawaii Volcanoes National Park, και ονομάζεται PODS [16]. Το πανεπιστήμιο της Χαβάη, επιθυμώντας να μελετήσει το λόγο για τον οποίο φυτά τα οποία είναι προς εξαφάνιση, ευδοκιμούν και αναπτύσσονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή και όχι σε μία άλλη, τοποθέτησαν καμουφλαρισμένους αισθητήρες, οι οποίοι ονομάστηκαν Pods, και οι οποίοι συλλέγουν μετεωρολογικά δεδομένα καθώς και εικόνες.

Επιπρόσθετα, μια μεγάλη κατηγορία εφαρμογών σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι τα συστήματα παρατήρησης του περιβάλλοντος και μετεωρολογικών προβλέψεων, EOfS – Environment Observation and Forecasting Systems [17]. Τα συστήματα αυτά εκτείνονται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και παρακολουθούν, μοντελοποιούν και προβλέπουν φυσικά φαινόμενα, όπως πλημμύρες, περιβαλλοντολογική ρύπανση κ.α. Αποτελούνται, συνήθως, από τρία δομικά στοιχεία: αισθητήρες, δίκτυο συλλογής δεδομένων και σταθμούς επεξεργασίας.

Μια πρότυπη εφαρμογή τέτοιου τύπου, αποτελεί το πρόγραμμα CORIE [18], όπου 13 στατικοί κόμβοι με αισθητήρες έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος του ποταμού Columbia. Οι κόμβοι συλλέγουν δεδομένα, τα αποστέλλουν στο κέντρο συλλογής το οποίο βρίσκεται στην ακτή, και εν συνεχεία προωθούνται σε ένα κεντρικό σύστημα για περαιτέρω επεξεργασία. Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την καθοδήγηση πλεούμενων καθώς και για καιρικές προβλέψεις. Ένα παρόμοιο πρόγραμμα, ίσως το πρώτο τέτοιου τύπου το οποίο εφαρμόστηκε σε πραγματικές συνθήκες, είναι το ALERT – Automated Local Evaluation in Real Time [19]. Αναπτύχθηκε από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία για την πρόβλεψη πλημμυρών ύστερα

από έντονες βροχοπτώσεις. Οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα ανέμου, στάθμης των υδάτων και θερμοκρασία και στέλνονται στο κέντρο συλλογής μέσω ασύρματων ζεύξεων, όπου επεξεργάζονται σύμφωνα με ένα Μοντέλο Πρόβλεψης Πλημμυρών και παρέχουν αυτόματες ειδοποιήσεις. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται σε πληθώρα περιοχών της δυτικής ακτής των ΗΠΑ.

2.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΓΕΙΑΣ

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν εφαρμογές στις οποίες οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να συλλέγουν στοιχεία και να παρακολουθούνται ασθενείς μέσα στα νοσοκομεία¹ αλλά και σε άλλους χώρους. Γενικότερα, οι εφαρμογές υγείας διαχωρίζονται σε εφαρμογές για α) παρακολούθηση καταστροφών πολλαπλών θυμάτων, β) παρακολούθηση ζωτικών ενδείξεων ασθενών εντός νοσηλευτικών εγκαταστάσεων, γ) παρακολούθηση και βοήθεια ασθενών και ανθρώπων της τρίτης ηλικίας στο σπίτι, δ) βελτίωση του επιπέδου διαβίωσης ανθρώπων με προβλήματα κινητικότητας και αισθήσεων, και τέλος ε) παρακολούθηση μεγάλου δείγματος ασθενών για στατιστική μελέτη και εξαγωγή συμπερασμάτων. Γενικά οι αισθητήρες οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές υγείας διαφέρουν τόσο ως προς τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν όσο και από τα δεδομένα τα οποία συλλέγουν. Πιο συγκεκριμένα, έχουν την ιδιαιτερότητα ότι εφαρμόζονται/βρίσκονται μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό και παρέχουν ειδικού τύπου δεδομένα, όπως μετρήσεις σακχάρου και άλλες ζωτικές μετρήσεις.



ΕΙΚΟΝΑ 3: Αισθητήρας SHIMMER

¹ Αν και αρχικά όλες οι εφαρμογές υγείας περιορίζονταν μέσα σε νοσηλευτικούς χώρους για άμεση παρακολούθηση, τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια για την ευρύτερη χρήση τέτοιου τύπου εφαρμογών, όπως παρακολούθηση ασθενών στο σπίτι

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν προγράμματα όπως το CodeBlue [20], το MEDiSN [21] και Washington University's Vital Monitoring System. Όσο αφορά στη βελτίωση των αισθητήριων προβλημάτων που μπορεί να αντιμετωπίζουν ασθενείς, έχει προταθεί το SSIM – Smart Sensors and Integrated Microsystems [22], στο οποίο ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο περιέχει 100 μικρο-αισθητήρες εμφυτεύτηκε στο ανθρώπινο μάτι (στον αμφιβληστροειδή) δίνοντας με αυτό τον τρόπο την δυνατότητα σε ασθενείς με περιορισμένη ή μηδενική όραση να δουν. Τέλος, διάφορα προγράμματα έχουν αναπτυχθεί για να παρέχουν βοήθεια σε ασθενείς και ανθρώπους τρίτης ηλικίας στο σπίτι.

Τέλος, οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή ερευνών στον τομέα της φυσιολογίας και της συμπεριφοράς. Το πρόγραμμα του τομέα της βιολογίας GEI – Genes and Environment Initiative υπό το Εθνικό Ινστιτούτο Υγείας των ΗΠΑ, αναπτύσσει αισθητήρες οι οποίοι μετρούν την έκθεση σε διάφορους περιβαλλοντολογικούς παράγοντες καθώς και τις καθημερινές συνήθειες των συμμετεχόντων. Πρότυπο εφαρμογής αποτελεί το AutoSense [23], το οποίο είναι ένα σύστημα αισθητήρων οι οποίοι εφαρμόζεται στο ανθρώπινο σώμα και μετρούν την επαφή ενός ατόμου με διάφορες εξαρτησιογόνες ουσίες (όπως το αλκοόλ) καθώς και το ψυχοσωματικό άγχος το οποίο βιώνει ο συμμετέχων στο φυσικό του περιβάλλον.

2.1.4 ΆΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Άλλες εφαρμογές χρήσης ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνουν συστήματα παρακολούθησης αλλά και συστήματα έξυπνων κατοικιών (smart homes). Η ιδέα για την κατασκευή έξυπνων κατοικιών από αντικείμενο ταινιών οι οποίες τοποθετούν τους ήρωες στο μέλλον, αποτελεί πλέον αντικείμενο έρευνας και ανάπτυξης πρότυπων εφαρμογών. Η χρήση αισθητήρων για αυτόματη προσαρμογή της θερμοκρασίας, του φωτισμού αλλά και την πραγματοποίηση ενεργειών, όπως το άνοιγμα ηλεκτρικών συσκευών με φωνητικές ή δεικτικές εντολές αποτελεί πλέον πραγματικότητα (Smart Environment: Residential Laboratory [24]).

Τέλος, εφαρμογές οι οποίες μπορούν να επωφεληθούν από την χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι συστήματα παρακολούθησης της βιωσιμότητας οικοδομημάτων (Structure Health Monitoring Systems). Οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση και τον εντοπισμό ζημιών καθώς επίσης η επεξεργασία των συλλεγόμενων δεδομένων από ειδικούς αλγορίθμους δύναται να προβλέψει μελλοντικές ζημιές και τον χρόνο ζωής οικοδομημάτων [25].

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η απλούστερη δυνατή στρατηγική για την αποστολή των δεδομένων από τους κόμβους-αισθητήρες σε κάποιο κέντρο συλλογής αποκαλείται απλή συλλογή δεδομένων (raw data gathering) και συμπεριλαμβάνει την απευθείας εκπομπή πληροφοριών από όλους τους κόμβους προς το κέντρο συλλογής [26]. Εάν το κέντρο βρίσκεται πολύ μακριά από τους αισθητήρες, η παραπάνω διαδικασία απαιτεί την κατανάλωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας για μετάδοση, γεγονός το οποίο οδηγεί στη γρήγορη εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων κάθε κόμβου και συνεπώς στη μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Μολονότι, η τεχνική της απλής συλλογής δεδομένων θα μπορούσε να παρέχει μία ικανοποιητική λύση σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στην περίπτωση την οποία το κέντρο συλλογής βρίσκεται κοντά στους κόμβους, στις περισσότερες περιπτώσεις, ακόμα και για δίκτυα αισθητήρων μεσαίου μεγέθους, η προσέγγιση αυτή θεωρείται μη αποδοτική από την άποψη της καταναλισκόμενης ενέργειας, οπότε και επιλέγεται η συλλογή δεδομένων μέσω διαδρομών πολλαπλών βημάτων. Υπό το πρίσμα αυτό, η μέθοδος της «πλημμύρας» (flooding) αποτελεί μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους διασποράς και συλλογής των πακέτων δεδομένων. Η λειτουργία της είναι απλή; όποτε ένας αισθητήρας έχει δεδομένα να αποστείλει στο κέντρο συλλογής, μεταδίδει το πακέτο αυτό σε όλους τους γείτονες του. Ομοίως ο κάθε κόμβος-δέκτης του πακέτου το αποστέλλει σε όλους τους γείτονες του εκτός σε αυτόν από τον οποίο το έλαβε. Με τον τρόπο αυτό, όμως, δημιουργείται συμφόρηση στο δίκτυο καθιστώντας την μέθοδο αυτή εξαιρετικά ενεργοβόρα και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται σε ελάχιστες ειδικές περιπτώσεις. Βελτίωση της μεθόδου αυτής πρότεινε ο Heinzelman [27], η οποία ονομάζεται «κουτσομπολίστικη» συλλογή (gossiping), και στην οποία κάθε κόμβος δεν αποστέλλει τα δεδομένα του, ή/και τα δεδομένα που έλαβε, σε όλους τους γείτονες του αλλά τυχαία επιλέγει μόνο έναν για την αποστολή. Έτσι επιτυγχάνεται μικρότερη κυκλοφορία και συμφόρηση στο δίκτυο των αισθητήρων και κατά επέκταση οι κόμβοι καταναλώνουν μικρότερη ποσότητα ενέργειας. Πάραυτα, η μέθοδος αυτή δεν αποτελεί αποτελεσματική λύση καθώς δεν λαμβάνει υπόψη της χαρακτηριστικά και παραμέτρους του δικτύου αισθητήρων, όπως η θέση και η ενέργεια των κόμβων.

Καθότι, λοιπόν, η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί μείζον παράγοντα σχεδίασης και λειτουργίας για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, έχουν προταθεί πολλές τεχνικές στην βιβλιογραφία οι οποίες παρουσιάζουν αλγορίθμους συλλογής δεδομένων με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Η συνάθροιση δεδομένων (data aggregation) προτάθηκε ως ένα τέτοιο γενικό παράδειγμα σε συνδυασμό με τη δρομολόγηση και συλλογή των δεδομένων. Εξαιτίας της συνήθους συσχέτισης σε μεγάλο βαθμό [28] των παρατηρουμένων αντικειμένων στο

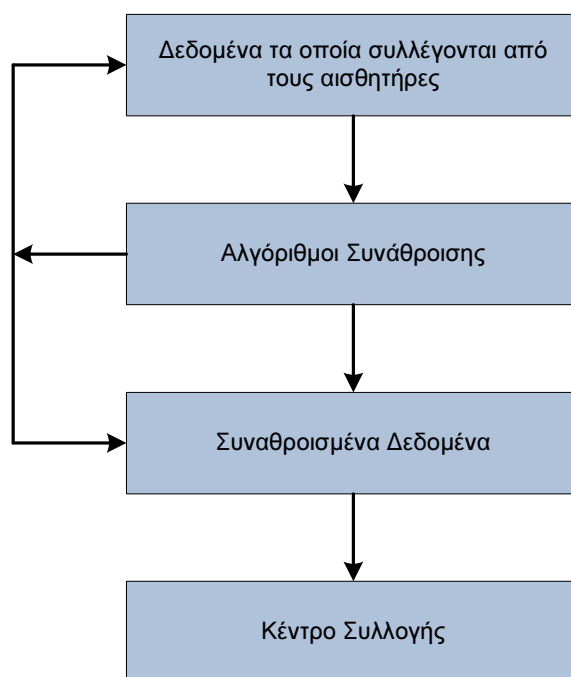
φυσικό κόσμο, αναμένεται οι αισθητήρες που τοποθετούνται κοντά ο ένας στον άλλο, να συλλέγουν παρόμοιες πληροφορίες για το περιβάλλον τους, και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές συνάθροισης δεδομένων για να βελτιώσουν τη συνολική διαδικασία συλλογής δεδομένων. Η λογική αυτή είναι διαφορετική από την παραδοσιακή διευθυνσιοκεντρική προσέγγιση - address centric/user centric - (εύρεση διαδρομών μεταξύ ζευγαριών κόμβων), και ακολουθεί την δεδομενοκεντρική λογική - data centric - (εύρεση διαδρομής από πολλαπλούς κόμβους σε ένα τελικό προορισμό) επιτρέποντας κατά αυτόν τον τρόπο την ενδο-επεξεργασία των δεδομένων στους ενδιάμεσους κόμβους [29][30].

Η ιδέα της συνάθροισης - συγχώνευσης πακέτων δεν αποτελεί καινούργια τεχνική στα ασύρματα δίκτυα υπολογιστών καθώς έχει ήδη προταθεί και χρησιμοποιηθεί στα αυτο-οργανούμενα ασύρματα δίκτυα. Το πακετάρισμα - racking - και η συγχώνευση - concatenation - πακέτων πραγματοποιείται για να συνενώσει πακέτα που έχουν τον ίδιο προορισμό, έχοντας ως κέρδος την αποστολή ενός μόνο πλαισίου με κοινή επικεφαλίδα [31][32], επιτυγχάνοντας οφέλη κυρίως όσον αφορά στην πρόσβαση στο μέσο. Η διαφορά τους με την συνάθροιση είναι ότι η τελευταία πραγματοποιείται στο επίπεδο εφαρμογής και όχι στα κάτω επίπεδα του δικτύου, και συνήθως εφαρμόζεται κάποια συνάρτηση συνάθροισης η οποία, όχι μόνο δημιουργεί ένα μόνο πακέτο με κοινή επικεφαλίδα, αλλά παράλληλα πραγματοποιεί και συμπύεση των δεδομένων μέσω κατάλληλης επεξεργασίας. Η συνάρτηση συνάθροισης η οποία θα εφαρμοστεί στα δεδομένα εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Η πιο απλή τεχνική συνάθροισης είναι η απόρριψη πακέτων ίδιων τιμών, δηλαδή εάν δυο αισθητήρες έχουν την ίδια μέτρηση τότε μόνο η μία τιμή θα μεταδοθεί. Εναλλακτικά, και ανάλογα με την εφαρμογή, μπορεί να εφαρμοστεί συνάρτηση εύρεσης του μέσου όρου, άθροισμα τιμών κ.α.

Ο κύριος στόχος των αλγορίθμων συνάθροισης είναι η συλλογή και συνάθροιση των δεδομένων με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο, ώστε να επιτευχθεί η αύξηση του χρόνου ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Με την συνάθροιση πραγματοποιείται επεξεργασία των δεδομένων μέσα στο κόμβο και μειώνεται ο αριθμός των πακέτων που κυκλοφορούν στο δίκτυο και άρα το πλήθος των αποστολών και λήψεων πακέτων. Έχει αποδειχθεί [4] ότι η εκτέλεση 3000 εντολών έχει το ίδιο ενεργειακό κόστος με την μετάδοση ενός bit σε απόσταση 100 μέτρων, οπότε και η συνάθροιση, η οποία επεξεργάζεται τα δεδομένα μειώνοντας το μέγεθος αλλά και το πλήθος των πακέτων, αποτελεί ενεργειακά αποδοτική επιλογή. Επιπλέον, υπό την οπτική του κέντρου συλλογής η διαδικασία της συνάθροισης έχει σαν αποτέλεσμα να μην κατακλύζεται το κέντρο συλλογής από δεδομένα καθώς προηγείται ένα φιλτράρισμα

αυτών ώστε η διαδικασία της περαιτέρω ανάλυσης και εξαγωγής αποτελεσμάτων να απαιτεί λιγότερο χρόνο και μικρότερη επεξεργαστική ισχύ.

Μια γενικευμένη μορφή της διαδικασίας της συνάθροισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.



ΕΙΚΟΝΑ 4: Διαδικασία Συνάθροισης

Λαμβάνοντας υπόψη το χρονισμό στην διαδικασία της συνάθροισης, μπορούμε να την κατηγοριοποιήσουμε με βάση τον χρόνο τον οποίο περιμένουν οι κόμβοι για να συναθροίσουν δεδομένα, σε α) απλή περιοδική συνάθροιση, β) περιοδική ανά βήμα (periodic per hop) και γ) προσαρμοσμένη περιοδική ανά βήμα. Οι κατηγορίες αυτές αφορούν σε δίκτυα αισθητήρων οι κόμβοι των οποίων παράγουν δεδομένα με περιοδικό τρόπο.

Πιο συγκεκριμένα, στην απλή περιοδική συνάθροιση όλοι οι κόμβοι αναμένουν έναν προκαθορισμένο χρόνο για να συναθροίσουν τα δεδομένα τους και μετά την λήξη του χρόνου αυτού στέλνουν ένα συναθροισμένο πακέτο. Ο αλγόριθμος Directed Diffusion [33] ο οποίος παρουσιάζεται στην ενότητα 2.2.2 ακολουθεί αυτήν την φιλοσοφία. Στην κατηγορία της περιοδικής ανά βήμα συνάθροισης, οι κόμβοι περιμένουν τα δεδομένα από τους γείτονες τους και έπειτα στέλνουν ένα συναθροισμένο πακέτο στον κόμβο γείτονα, ο οποίος

αναλαμβάνει να το προωθήσει προς το κέντρο συλλογής². Τέλος, η προσαρμοσμένη περιοδική ανά βήμα μέθοδο συνάθροισης ακολουθεί παρόμοια φιλοσοφία με την περιοδική ανά βήμα, αλλά κάθε κόμβος επιλέγει το χρόνο κατά τον οποίο θα περιμένει για να συναθροίσει δεδομένα με βάση την θέση του στο δίκτυο. Οι Solis και Obraczka [34], προτείνουν μια μέθοδο με αλληλουχία στην λήξη της περιόδου συνάθροισης, η οποία ανήκει σε αυτήν την κατηγορία.

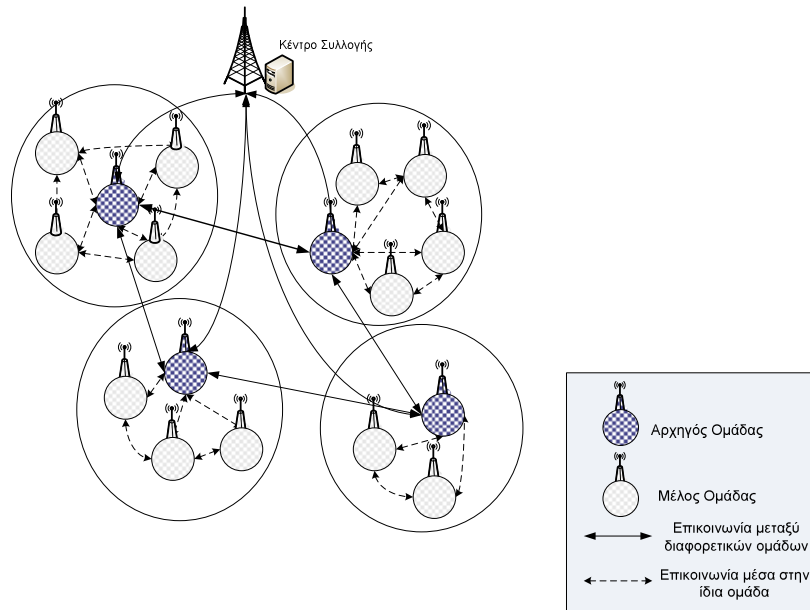
Επιπλέον, οι τεχνικές συλλογής δεδομένων με ταυτόχρονη συνάθροιση των δεδομένων κατά την μεταφορά τους στο κέντρο συλλογής μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα κριτήρια και τα χαρακτηριστικά τα οποία εξετάζονται. Παρακάτω παραθέτουμε προτεινόμενες από την βιβλιογραφία μεθόδους και αλγόριθμους συλλογής και συνάθροισης, εφαρμόζοντας μια κατηγοριοποίηση με βάση την δομή του δικτύου, αλλά και τον μηχανισμό της συνάθροισης. Σύμφωνα με το κριτήριο της δομής, οι αλγόριθμοι συλλογής και συνάθροισης δεδομένων διαχωρίζονται σε ιεραρχικές και μη ιεραρχικές προσεγγίσεις, και εν συνεχεία, οι ιεραρχικές προσεγγίσεις διαχωρίζονται σε αυτές που δημιουργούν ομάδες αισθητήρων (cluster based), σε αυτές που δημιουργούν αλυσίδες αισθητήρων (chain based) και σε εκείνες που δημιουργούν δέντρα αισθητήρων (tree based).

2.2.1 ΙΕΡΑΡΧΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

2.2.1.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΜΑΔΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Οι τεχνικές συλλογής που ανήκουν στην κατηγορία αυτή, διαμερίζουν το δίκτυο σε υποσύνολα αισθητήρων. Κάθε σύνολο – ομάδα αισθητήρων έχει συνήθως έναν αισθητήρα ο οποίος αναλαμβάνει τον ρόλο του «αρχηγού». Κάθε φορά που οι αισθητήρες έχουν δεδομένα να στείλουν ή τους ζητούνται δεδομένα από το κέντρο συλλογής, τα μεταδίδουν στον αισθητήρα – αρχηγό ο οποίος συγκεντρώνει όλες τις μετρήσεις των αισθητήρων που ανήκουν στην ίδια ομάδα. Συνήθως, ο αισθητήρας αυτός χρησιμοποιεί και τεχνικές συνάθροισης ώστε να μειώσει την συνολική ποσότητα των δεδομένων και στη συνέχεια τα αποστέλλει στο κέντρο συλλογής. Έχουν προταθεί επίσης και μέθοδοι συλλογής όπου σχηματίζουν διάφορα επίπεδα ομάδων αισθητήρων, όπου ο αρχηγός κάθε ομάδας μεταδίδει την συνολική πληροφορία στο επόμενο επίπεδο ιεραρχίας μέχρι να μεταδοθούν στον τελικό προορισμό τους. Η Εικόνα 5 παρουσιάζει το πως διαμερίζεται το δίκτυο σε ομάδες και πως πραγματοποιείται η αποστολή των δεδομένων στο κέντρο συλλογής.

² Η επιλογή των γειτονικών κόμβων από τους οποίους ένας κόμβος λαμβάνει και προωθεί πακέτα δεδομένων ορίζεται από τον αλγόριθμο δρομολόγησης ο οποίος χρησιμοποιείται.



ΕΙΚΟΝΑ 5: Δημιουργία Ομάδων Αισθητήρων

Η δημιουργία ομάδων αισθητήρων είναι μια τεχνική ιδιαίτερα προσφιλή στα ασύρματα δίκτυα και έχει βρει πολλές εφαρμογές και στα δίκτυα αισθητήρων.

Η πιο αντιπροσωπευτική έρευνα στον τομέα αυτόν είναι ο αλγόριθμος LEACH (Low-Energy-Adaptive-Clustering Hierarchy) των Heinzelman, Chandrakasan και Balakrishnan [35]. Το δίκτυο αισθητήρων διαμερίζεται σε σύνολα αισθητήρων όπου σε κάθε γύρο συλλογής δεδομένων ένας διαφορετικός αισθητήρας αναλαμβάνει τον ρόλο του αρχηγού στην ομάδα. Ο αισθητήρας αυτός είναι υπεύθυνος για την συλλογή των δεδομένων από τους αισθητήρες που ανήκουν στην ίδια ομάδα με αυτόν, πραγματοποιεί συνάθροιση των δεδομένων και τα αποστέλλει στο κέντρο συλλογής. Η κατανάλωση της ενέργειας στον κόμβο αυτό είναι μεγαλύτερη από ότι στους άλλους κόμβους αισθητήρες. Για τον λόγο αυτό, σε κάθε γύρο συλλογής δεδομένων, οι ομάδες των αισθητήρων αναδιοργανώνονται και εκλέγεται ένας διαφορετικός αρχηγός με τυχαίο τρόπο. Σε μία διαφορετική εκδοχή του αλγορίθμου LEACH, τον LEACH – C (Heinzelman [27]), ο υπολογισμός των ομάδων των αισθητήρων πραγματοποιείται με συγκεντρωτικό τρόπο από το κέντρο συλλογής στην αρχή κάθε γύρου συλλογής.

Μία βελτίωση του παραπάνω αλγορίθμου προτάθηκε από τους Pham, Kim και Moh [36] και ονομάζεται E-LEACH. Η υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις: α) διαφήμιση, β) δημιουργία των ομάδων, γ) δημιουργία χρονοδιαγράμματος και δ) μετάδοση δεδομένων. Οι πρώτες τρεις φάσεις είναι παρόμοιες με τον μηχανισμό που χρησιμοποιείται στην πρωτότυπη μορφή του LEACH, ενώ κατά την τελευταία, όπου πραγματοποιείται η

μετάδοση των δεδομένων, όλοι οι αισθητήρες-αρχηγοί των ομάδων, αφού λάβουν τα πακέτα δεδομένων από τους υπόλοιπους αισθητήρες, σχηματίζουν μια αλυσίδα από τον πιο μακρινό αισθητήρα – αρχηγό μέχρι το κέντρο συλλογής για την μετάδοση των πακέτων δεδομένων. Ο σχηματισμός της αλυσίδας πραγματοποιείται με εφαρμογή ενός άπληστου αλγορίθμου.

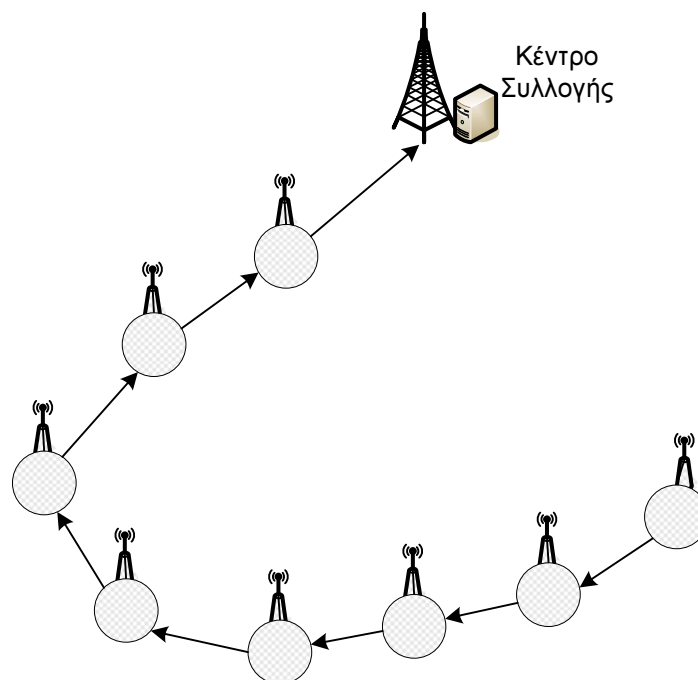
Επιπλέον, οι Choi, Shah και Das [37] πρότειναν μία προσέγγιση ομαδοποίησης δύο φάσεων με σκοπό να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Στην πρώτη φάση της υλοποίησης, το δίκτυο διαχωρίζεται σε ομάδες αισθητήρων με έναν αρχηγό σε κάθε ομάδα και κάθε αισθητήρας ενώνεται με τον αισθητήρα-αρχηγό που βρίσκεται πιο κοντά του, σχηματίζοντας έναν «άμεσο» σύνδεσμο με αυτόν. Κατά την δεύτερη φάση, οι αισθητήρες εντοπίζουν έναν αισθητήρα γείτονα τους μέσα στην ομάδα ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος πιο κοντά από τον αισθητήρα-αρχηγό και σχηματίζουν έναν «έμμεσο» σύνδεσμο με αυτόν. Κάθε φορά που ένας αισθητήρας έχει δεδομένα να μεταδώσει, χρησιμοποιεί είτε τον άμεσο είτε τον έμμεσο σύνδεσμο του, ανάλογα με το πόσο έγκαιρα πρέπει τα δεδομένα να ληφθούν από το κέντρο συλλογής. Ο αισθητήρας που λαμβάνει τα δεδομένα από τον γείτονα του, ως ενδιάμεσος σταθμός όπως ονομάζεται, πραγματοποιεί συνάθροιση των δεδομένων που λαμβάνει με τα δικά του και τα προωθεί είτε στον δικό του γείτονα «ενδιάμεσο σταθμό» είτε στον αισθητήρα-αρχηγό της ομάδας. Όταν ο κόμβος αρχηγός συγκεντρώσει όλα τα πακέτα δεδομένων από τους κόμβους που ανήκουν στην ομάδα του, τα προωθεί στο κέντρο συλλογής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται σημαντικά ενεργειακά οφέλη για το δίκτυο και επιπλέον ο φόρτος εργασίας μοιράζεται ομοιόμορφα ανάμεσα στους αισθητήρες-μέλη της ομάδας.

Τέλος, οι Dasgupta, Kalpakis και Namjoshi [38] πρότειναν μία εναλλακτική προσέγγιση στην δημιουργία ομάδων για την συλλογή των δεδομένων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Και σε αυτήν την περίπτωση το δίκτυο διαχωρίζεται σε ομάδες, που ονομάζονται υπερ-ομάδες, με χρήση ενός «άπληστου» αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος αυτός αρχικά διαλέγει τον πιο απομακρυσμένο κόμβο από τον κόμβο συλλογής και σχηματίζει μία υπερ-ομάδα που περιλαμβάνει τον αισθητήρα αυτόν και τους $c-1$ γείτονες του, όπου c μία σταθερά. Ο αλγόριθμος συνεχίζεται μέχρι όλοι οι αισθητήρες να γίνουν μέλη κάποιας υπερ-ομάδας. Για κάθε τέτοια ομάδα υπολογίζεται ένα χρονοδιάγραμμα μέγιστης διάρκειας ζωής συλλογής με χρήση ενός «άπληστου» ευρετικού αλγορίθμου, του CMLDA (Clustering-Based Maximum Lifetime Data Aggregation). Το χρονοδιάγραμμα συλλογής δεδομένων καθορίζει πώς συλλέγονται και μεταδίδονται τα δεδομένα από όλους τους αισθητήρες στο κέντρο συλλογής.

Βάσει των χρονοπρογραμμάτων υπολογίζονται καλύπτοντα δέντρα συνάθροισης για να μειωθεί ο αριθμός των δεδομένων που συλλέγονται στον τελικό κόμβο.

2.2.1.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΛΥΣΙΔΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Τα πρωτόκολλα που ανήκουν στην κατηγορία αυτή είναι ιεραρχικά πρωτόκολλα, τα οποία όμως, πραγματοποιούν την συλλογή των δεδομένων με διαφορετικό τρόπο από αυτόν της προηγούμενης ενότητας. Οι προσεγγίσεις αυτές, όπως δηλώνει και το όνομα τους, σχηματίζουν μια αλυσίδα από αισθητήρες για την μετάδοση των μετρήσεων στο κέντρο συλλογής, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη συνολική απόσταση μετάδοσης. Κάθε κόμβος-αισθητήρας προωθεί τα δεδομένα του στον γειτονικό του κόμβο στην αλυσίδα και αυτός με τη σειρά του, συνενώνοντας τα με τα δικά του ή όχι, τα μεταδίδει στον γειτονικό του κόμβο μέχρι να ληφθούν από τον τελικό κόμβο συλλογής. Σύμφωνα με την περιγραφείσα διαδικασία σε κάθε γύρο συλλογής υπάρχει μόνο ένας κόμβος που πραγματοποιεί την μετάδοση των συλλεγμένων δεδομένων στον κόμβο δέκτη. Η σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.



ΕΙΚΟΝΑ 6: Δημιουργία Αλυσίδας Αισθητήρων

Το πιο απλό σχήμα δημιουργίας αλυσίδας αισθητήρων είναι το γραμμικό, όπου κάθε κόμβος στέλνει το πακέτο δεδομένων του στον γείτονά του, αυτός συνενώνει με το δικό του πακέτο διατηρώντας την ίδια κοινή επικεφαλίδα μέχρι που ο τελευταίος κόμβος της αλυσίδας μεταδίδει το συνενωμένο πακέτο στο κέντρο συλλογής.

Το πιο αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας προτάθηκε από τους Lindsey, Raghavendra και Sivalingam [39] και ονομάζεται PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems). Κάθε κόμβος ενώνεται με τον πιο γειννικό του (κοντινό) σχηματίζοντας μία αλυσίδα είτε με την χρήση ενός «άπληστου» αλγορίθμου είτε με κεντροκοποιημένο τρόπο από το κέντρο συλλογής. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, κάθε κόμβος στέλνει τα δεδομένα του στο γείτονα του στην αλυσίδα, αυτός πραγματοποιεί συνάθροιση με τα δικά του σχηματίζοντας ένα πακέτο ίδιου μεγέθους και το μεταδίδει στο δικό του γείτονα. Σε κάθε γύρο ένας διαφορετικός αισθητήρας αναλαμβάνει να αποστείλει το τελικό πακέτο των δεδομένων στο κέντρο, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την διάρκεια ζωής του δικτύου. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής όμως είναι η μεγάλη χρονική καθυστέρηση που παρατηρείται κατά την συλλογή των δεδομένων, καθιστώντας το μη εφαρμόσιμο σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η έγκαιρη μετάδοση δεδομένων.

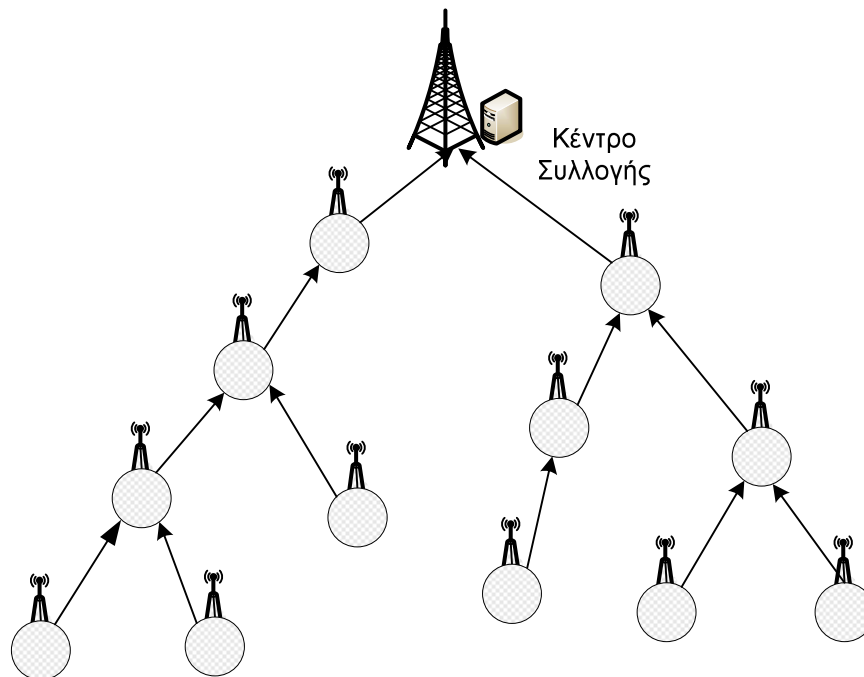
Για τον λόγο αυτό, οι ίδιοι συγγραφείς πρότειναν ένα βελτιωμένο πρωτόκολλο δημιουργίας αλυσίδας αισθητήρων, το οποίο κάνει χρήση τεχνικών CDMA (Code Division Multiple Access) για πρόσβαση στο μέσο ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη επικοινωνία ζευγών αισθητήρων χωρίς να υπάρχει μεταξύ τους παρεμβολή. Τα δεδομένα συνδυάζονται ανά ζεύγη αισθητήρων σε κάθε επίπεδο δημιουργώντας κατά αυτόν τον τρόπο μια ιεραρχία $\lceil \log N \rceil$ επιπέδων, όπου N ο συνολικός αριθμός των αισθητήρων στο δίκτυο. Οι κόμβοι οι οποίοι έλαβαν δεδομένα από τον γειτονικό τους σε κάποιο επίπεδο πραγματοποιούν συνάθροιση των δεδομένων αυτών με τα δικά τους και παραμένουν ενεργοί και στο επόμενο επίπεδο. Στο τελευταίο επίπεδο της ιεραρχίας έχει απομείνει μόνο ένας ενεργός κόμβος ο οποίος μεταδίδει το συνολικό πακέτο των μετρήσεων στο κέντρο συλλογής.

Τέλος, οι Du, Wu και Zhou [40] δημοσίευσαν μία παρόμοια μέθοδο η οποία έχει αποδειχθεί ενεργειακά αποδοτική, ιδιαίτερα στην περίπτωση δικτύων με μικρή πυκνότητα κόμβων. Το δίκτυο διαχωρίζεται σε περιοχές με βάση έναν κεντρικό κόμβο και σε κάθε περιοχή, μια γραμμική αλυσίδα από αισθητήρες σχηματίζεται για να μεταδώσει τα πακέτα στον κεντρικό κόμβο. Ο κόμβος αυτός είτε συνδυάζει τα πακέτα τα οποία λαμβάνει είτε απλώς τα προωθεί στο κέντρο συλλογής.

2.2.1.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΕΝΤΡΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Η τελευταία κατηγορία ιεραρχικών πρωτοκόλλων που αναλύεται στην παρούσα ενότητα περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα τα οποία δημιουργούν δέντρα αισθητήρων για την συλλογή των δεδομένων στο δίκτυο. Συνήθως το κέντρο συλλογής αρχικοποιεί τον αλγόριθμο σχηματισμού

του δέντρου δρομολόγησης, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο για την αποστολή των αιτημάτων του κέντρου συλλογής όσο και για την μετάδοση των μετρήσεων των αισθητήρων. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν όλοι οι κόμβοι γίνουν μέλη του δέντρου, είτε ως εσωτερικοί κόμβοι είτε ως φύλλα. Η συλλογή των πακέτων δεδομένων πραγματοποιείται παράλληλα με την δρομολόγηση τους ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις λαμβάνει χώρα και συνάθροιση αυτών στους ενδιάμεσους κόμβους. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η διαδικασία αυτή.



ΕΙΚΟΝΑ 7: Δημιουργία Δέντρου Αισθητήρων

Αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο της κατηγορίας αυτής αποτελεί το πρωτόκολλο EDGE (Efficient Data Gathering) το οποίο προτάθηκε από τους Theravilojanapong, Tobe και Sezaki [41]. Η ρίζα του δέντρου, η οποία είναι το κέντρο συλλογής, ξεκινά τον αλγόριθμο κατασκευής του δέντρου, εκπέμποντας ένα μήνυμα «αναζήτησης παιδιού», το οποίο στη συνέχεια εκπέμπεται από κάθε αισθητήρα που είναι μέλος του δέντρου. Κάθε αισθητήρας, ο οποίος δεν ανήκει ακόμα στο δέντρο συλλέγει τα πακέτα αυτά και τα αποθηκεύει σε μία λίστα με υποψήφιους πατέρες και έπειτα επιλέγει έναν κόμβο ως πατέρα του ανάλογα με κάποια κριτήρια, όπως είναι η μεταξύ τους απόσταση. Τότε αποστέλλει ένα μήνυμα «απόκρισης παιδιού» στον επιλεγμένο πατέρα και εκείνος απαντά με ένα νέο μήνυμα «αποδοχής παιδιού». Σε περίπτωση που κάποιος κόμβος του δέντρου σταματήσει την λειτουργία του, το δέντρο επαναδομείται. Επιπλέον, προβλέπονται ειδικές διαδικασίες για προσάρτηση νέων κόμβων στο δέντρο. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται με χρήση του δέντρου που έχει σχηματιστεί. Κάθε κόμβος προωθεί τα δεδομένα του στον πατέρα του, αυτός τα

συνενώνει με τα δικά του και τα προωθεί στο επόμενο επίπεδο μέχρι να φτάσουν στην ρίζα του δέντρου.

Σε μια παρόμοια μελέτη, οι Tan και Körpeo [42] υλοποίησαν το PEDAP (Power Efficient Data gathering and Aggregation Protocol) πρωτόκολλο, το οποίο κατασκευάζει και αυτό δέντρο δρομολόγησης για την συλλογή των δεδομένων. Υπολογίζεται το ελάχιστο επικαλυπτόμενο δέντρο (minimum spanning tree) όπου τα κόστη στις πλευρές αντιστοιχούν στο κόστος μετάδοσης. Για την εύρεση του ελάχιστου επικαλυπτόμενου δέντρου χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Prim [43] κάθε k γύρους, όπου k μία σταθερά, για να συμπεριληφθούν στο δέντρο οποιεσδήποτε αλλαγές στο δίκτυο των αισθητήρων. Η μετάδοση των δεδομένων από κάθε αισθητήρα πραγματοποιείται με τρόπο παρόμοιο με το πρωτόκολλο EDGE.

2.2.2 ΜΗ ΙΕΡΑΡΧΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται μέθοδοι και πρωτόκολλα τα οποία αντιμετωπίζουν την διαδικασία της συλλογής των δεδομένων με καταναμημένο τρόπο και μη εφαρμόζοντας επίπεδα ιεραρχίας κατά την εκτέλεση της διαδικασίας. Μια δημοφιλής, μη ιεραρχική, μέθοδος συλλογής δεδομένων προτάθηκε από τους Intanagonwiwat, Govindan και Estrin, Directed Diffusion [33], η οποία αποδίδει μια τιμή στα δεδομένα τα οποία παράγονται στους κόμβους. Το κέντρο συλλογής αιτείται δεδομένα με βάση τις τιμές αυτές και οι κόμβοι που έχουν τα δεδομένα αυτά τα αποστέλλουν στο κέντρο σχηματίζοντας μονοπάτια πληροφορίας. Το κέντρο συλλογής αναγνωρίζει ποια από αυτά τα μονοπάτια παρέχουν μεγαλύτερη και καλύτερης ποιότητας πληροφορία και αποφασίζει να τα ενδυναμώσει. Τα δεδομένα που διασχίζουν το δίκτυο συναθροίζονται στους ενδιάμεσους κόμβους για να επιτευχθεί μείωση στην κατανάλωση ενέργειας.

Οι He, Blum, Stankovich και Abdelzaher το 2004 [44] πρότειναν μία μέθοδο η οποία πραγματοποιεί με πιθανοτικό τρόπο συνάθροιση, η οποία είναι ανεξάρτητη της δρομολόγησης. Η διαδικασία της συνάθροισης πραγματοποιείται σε ένα ξεχωριστό επίπεδο, πάνω από το επίπεδο προσπέλασης μέσου, το οποίο ονομάζεται επίπεδο συνάθροισης δεδομένων. Τα πακέτα προς μετάδοση πηγαίνουν αρχικά στο επίπεδο αυτό, όπου συναθροίζονται με τα ήδη υπάρχοντα πακέτα σχηματίζοντας ένα συνενωμένο πακέτο. Στη συνέχεια το πακέτο αυτό μεταφέρεται στο επίπεδο προσπέλασης μέσου για να πραγματοποιηθεί η μετάδοση του. Το πλήθος των πακέτων που θα συνενωθούν καθορίζεται από μια μονάδα ελέγχου και εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο. Έτσι αν

η συμφόρηση στο δίκτυο είναι μεγάλη, συνενώνεται μεγάλος αριθμός πακέτων ενώ αν είναι μικρή, ο αριθμός αυτός είναι μικρός και τα πακέτα δεν καθυστερούν για μεγάλο χρονικό διάστημα στο ενδιάμεσο επίπεδο. Για να προστατευτούν οι εφαρμογές από τις μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις η μέθοδος προβλέπει ένα ανώτατο όριο στον αριθμό των πακέτων που συνενώνονται. Όταν το συνενωμένο πακέτο φτάσει στον κόμβο προορισμού, ή στον επόμενο κόμβο, ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία. Το πακέτο πηγαίνει στο επίπεδο συνάθροισης και αποδομείται στα συστατικά του μέρη, δηλαδή στα αρχικά πακέτα. Τα πακέτα που προορίζονταν για τον κόμβο αυτό συνεχίζουν στο επίπεδο δικτύου και τα υπόλοιπα επαναδρομολογούνται.

2.2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Βασιζόμενοι στην αρχή ότι για τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων απαιτείται η μείωση του αριθμού των bits που μεταδίδονται σε κάθε γύρο συλλογής δεδομένων, προτείνονται διάφοροι μέθοδοι οι οποίοι πραγματοποιούν συμπίεση των δεδομένων. Οι προηγούμενες μελέτες επιτύγχαναν την ελάττωση της μεταδιδόμενης πληροφορίας συναθροίζοντας τα συσχετιζόμενα δεδομένα ενώ οι προσεγγίσεις που περιγράφονται στην ενότητα αυτή χρησιμοποιούν τεχνικές βασισμένες στην κωδικοποίηση πηγής, όπως στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Στις τεχνικές αυτές κάθε αισθητήρας χρησιμοποιεί μια ειδική συνάρτηση συνάθροισης για να κωδικοποιήσει τα δεδομένα πριν τα στείλει στον προορισμό. Οι τεχνικές αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στην κατηγορία πολλαπλών εισόδων (multi input) και στην κατηγορία μονής εισόδου (single input). Στην πρώτη περίπτωση η συνάθροιση των δεδομένων πραγματοποιείται μόνο αν όλη η εισερχόμενη πληροφορία από τους διάφορους κόμβους είναι διαθέσιμη με σκοπό να εξερευνηθεί η συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η κωδικοποίηση της πληροφορίας κάποιου κόμβου εξαρτάται μόνο από την πληροφορία ενός άλλου κόμβου (Rickenbach and Wattenhofer [45]). Επιπλέον οι τεχνικές μονής εισόδου κατηγοριοποιούνται επιπλέον, σε αυτο-κωδικοποιούμενες (self-coding) και ετερο-κωδικοποιούμενες (foreign coding). Στην πρώτη περίπτωση, τα δεδομένα επιτρέπεται να κωδικοποιηθούν μόνο στον κόμβο όπου παράγονται και εφόσον υπάρχει τουλάχιστον πληροφορία από έναν άλλο κόμβο. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση, ένας κόμβος μπορεί να κωδικοποιήσει δεδομένα που προέρχονται από κάποιον προηγούμενο κόμβο και που κατευθύνονται σε κάποιον άλλο κόμβο προορισμό.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για να επιλύσουν το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της καταναλωμένης ενέργειας ήταν ο MEGA (Minimum Energy Gathering Algorithm) για την περίπτωση των ετερο-κωδικοποιούμενων τεχνικών και ο LEGA (Low Energy Gathering Algorithm) για την περίπτωση των αυτο-κωδικοποιούμενων. Ο MEGA αλγόριθμος υπολογίζει ένα ελάχιστο μονοπάτι από την πηγή στον προορισμό με χρήση για παράδειγμα του αλγόριθμου Dijkstra. Έτσι για κάθε κόμβο i βρίσκει ένα κόμβο j ο οποίος κωδικοποιεί το πακέτο του πρώτου κόμβου με τα δεδομένα του δεύτερου και με αυτή τη διαδικασία δημιουργείται ένα δέντρο κωδικοποίησης. Για τον υπολογισμό αυτού του δένδρου κωδικοποίησης χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος που επιλύει το πρόβλημα του κατευθυνόμενου ελάχιστου συνεκτικού δένδρου. Στα ίδια πλαίσια με τον MEGA, αλλά περισσότερο προσεγγιστικός είναι ο αλγόριθμος LEGA, που χρησιμοποιείται στις αυτο-κωδικοποιούμενες τεχνικές για την επίλυση του προβλήματος της εύρεσης του δένδρου συλλογής δεδομένων ελάχιστης ενέργειας, ενός προβλήματος που έχει αποδειχθεί NP (nondeterministic polynomial time) πλήρες.

Οι Chou, Petrovic και Ramchandran [46] προχωρούν στην αφαίρεση της εγγενούς συσχέτισης στους αισθητήρες μέσω ενός κατανεμημένου αλγόριθμου συμπίεσης. Σε αυτόν, εφαρμόζονται κωδικοποιητές σε κάθε αισθητήρα ενώ στον τελικό κόμβο συλλογής δεδομένων υπάρχει ένας πιο πολύπλοκος αποκωδικοποιητής. Οι κόμβοι δεν απαιτείται να γνωρίζουν τη δομή συσχέτισης για να κωδικοποιήσουν τα δεδομένα τους, πληροφορία την οποία κατέχει μόνο το κέντρο συλλογής. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να συνδυαστεί και με άλλες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, όπως είναι η συνάθροιση δεδομένων, ώστε να αποφέρει μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη.

Τέλος, οι Tang, Raghavendra και Prasanna [47] πρότειναν ένα ενεργειακά αποδοτικό κατανεμημένο σύστημα κωδικοποίησης το οποίο ονομάζεται EEADSC (Energy Efficient Distributed Source Coding). Το σύστημα αυτό εκμεταλλεύεται τη χωρική συσχέτιση των δεδομένων που συλλέγονται από τους κόμβους που ανήκουν σε μία κοινή ομάδα, βασιζόμενο στη χρησιμοποίηση μιας Lagrangian συνάρτησης κόστους.

2.2.4 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤ' ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΣΥΛΛΟΓΗΣ

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων οι κόμβοι - αισθητήρες του δικτύου μετρούν συνεχώς το περιβάλλον και συλλέγουν δεδομένα από αυτό, όπως θερμοκρασίας, υγρασίας κ.α. Τις μετρήσεις αυτές τις στέλνουν στο κέντρο συλλογής για περαιτέρω επεξεργασία τη λήψη

αποφάσεων, είτε με περιοδικό τρόπο είτε όταν η μετρούμενη τιμή ξεπεράσει την τιμή ενός κατωφλίου. Οι προσεγγίσεις που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες υπέθεταν τέτοιου είδους μεταδόσεις. Ωστόσο, υπάρχουν εφαρμογές οι οποίες αιτούνται την συλλογή των μετρήσεων και το κέντρο συλλογής αναλαμβάνει να μεταδώσει στους αισθητήρες του δικτύου τις αιτήσεις αυτές. Οι προσεγγίσεις αυτές θεωρούν την μνήμη / αποθηκευτικό χώρο των αισθητήρων ως μια βάση δεδομένων όπου φυλάσσονται οι μετρήσεις των αισθητήρων και χρησιμοποιούν τεχνικές προσπέλασης και ανάκτησης αυτών επηρεασμένες από το πεδίο των βάσεων δεδομένων. Μέχρι σήμερα, πολλά πρωτόκολλα έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία τα οποία πραγματοποιούν τη συλλογή των δεδομένων ως απάντηση στις αιτήσεις του κέντρου με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο.

Η μέθοδος Cougar που προτάθηκε από τους Yao και Gehrke [48] θεωρεί το δίκτυο ως μια κατανομημένη βάση δεδομένων όπου κάθε αισθητήρας κατέχει μέρος της πληροφορίας. Οι συγγραφείς βασίστηκαν στην υπάρχουσα έρευνα [49] για να μοντελοποιήσουν την πληροφορία την οποία κατέχουν οι αισθητήρες καθώς και προσδιορισμό ερωτήσεων με βάση μια άλγεβρα τελεστών. Η βάση δεδομένων των αισθητήρων ονομάζεται COUGAR και υλοποιήθηκε ως μέρος του Cornell Cougar Προγράμματος, χρηματοδοτούμενο από το DARPA (DARPA SensIT Program [11]). Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική κάθε κόμβος έχει ένα ξεχωριστό επίπεδο αντιπροσώπου ερωτήσεων (query proxy layer) το οποίο αλληλεπιδρά τόσο με το επίπεδο δρομολόγησης όσο και με αυτό της εφαρμογής. Επιπλέον έχει αναπτυχθεί και μία εφαρμογή βελτιστοποίησης ερωτήσεων όπου δέχεται τις ερωτήσεις από το κέντρο συλλογής και παράγει έναν ενεργειακά αποδοτικό σχέδιο απάντησης της ερώτησης. Επίσης επιλέγει έναν κόμβο ο οποίος δρα ως αρχηγός που αναλαμβάνει την συνάθροιση των δεδομένων ή εναλλακτικά μπορεί να πραγματοποιηθεί μερική συνάθροιση σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των κόμβων καθώς κάθε αισθητήρας πρέπει να περιμένει τις μετρήσεις του γείτονα του για να πραγματοποιήσει την συνάθροιση.

Το TinyDB Πρόγραμμα του πανεπιστημίου του Berkeley [50] μελέτησε την υλοποίηση ερωτήσεων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, και προχώρησε σε υλοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου, Tiny AGgregation (TAG) [51], σε Berkeley motes. Η εφαρμογή ή ο χρήστης θέτει τις αιτήσεις του στο δίκτυο μέσω του κέντρου συλλογής και από εκεί προωθούνται σε όλους τους εσωτερικούς κόμβους. Οι αισθητήρες οι οποίοι έχουν μετρήσεις οι οποίες ανταποκρίνονται στην αίτηση, τις στέλνουν πίσω στο κέντρο συλλογής μέσω ενός δέντρου δρομολόγησης που έχει ρίζα το κέντρο. Καθώς τα δεδομένα δρομολογούνται προς τη

ρίζα συναθροίζονται στους ενδιάμεσους κόμβους με βάση μια συνάρτηση συνάθροισης όπως ο υπολογισμός της μέσης τιμής, του αθροίσματος, της μέγιστης τιμής κ.α. Γενικότερα, η προσέγγιση αυτή διαχωρίζεται σε δύο φάσεις: την φάση της διανομής, όπου οι ερωτήσεις διανέμονται από το κέντρο συλλογής στους αισθητήρες του δικτύου, και την φάση συλλογής, όπου οι απαντήσεις συγκεντρώνονται στο κέντρο συλλογής. Κατά την συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται συνάθροιση αυτών με υπολογισμό μερικών συναθροίσεων και απόρριψη μη σχετικών τιμών μετρήσεων. Στη μέθοδο αυτή, όπως και στην προηγούμενη, απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των κόμβων για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της συνάθροισης.

Οι προσεγγίσεις που συζητήθηκαν αποτέλεσαν την βάση για την ανάπτυξη παρόμοιων μελετών. Το πρωτόκολλο TiNA (Temporal coherency-aware in-Network Aggregation), από τους Sharaf, Beaver, Labrinidis και Chrysanthis [52], επεκτείνει τα προαναφερθέντα πρωτόκολλα ώστε να είναι ενεργειακά πιο αποδοτικά. Αρχικά, σχηματίζεται ένα δέντρο με ρίζα το κέντρο συλλογής το οποίο χρησιμοποιείται τόσο για την διάδοση των ερωτήσεων όσο και για την δρομολόγηση των απαντήσεων. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι η ύπαρξη μια σταθεράς ανοχής στην αίτηση (tolerance clause - tct), η οποία αντιπροσωπεύει τη μέγιστη αλλαγή που μπορεί να υποστεί μια μετρούμενη τιμή και η οποία καθορίζεται κάθε φορά από την εφαρμογή. Για παράδειγμα μια τιμή της σταθεράς ανοχής στο 5% σημαίνει ότι οι αισθητήρες των οποίων οι μετρήσεις έχουν υποστεί αλλαγή μικρότερη του 5% στην τιμή τους, σε σχέση με την προηγούμενη μεταδιδόμενη τιμή, δεν θα μεταδώσουν σε αυτόν τον γύρο συλλογής των απαντήσεων. Αν και έχει αποδειχθεί ότι με την μέθοδο αυτή οι αισθητήρες καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια, καθώς μεταδίδουν με μικρότερη συχνότητα, παρατηρείται απώλεια στην ακρίβεια των δεδομένων. Οπότε ανάλογα με το επίπεδο ακρίβειας στα δεδομένα που απαιτούνται από κάθε εφαρμογή μπορούν να επιτευχθούν διαφορετικά ποσοστά κατανάλωσης ενέργειας.

Επιπλέον, οι συγγραφείς στο [53] παρουσιάζουν την EEIA μέθοδο η οποία παρέχει έναν καταναμεμημένο αλγόριθμο για την πραγματοποίηση ερωτήσεων στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, ο οποίος επιτυγχάνει ενεργειακά οφέλη. Η μέθοδος έχει δανειστεί στοιχεία από την TinyDB και την TAG καθώς κάνει χρήση ενός ACQP επεξεργαστή ερωτήσεων ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε κάθε κόμβο του δικτύου. Ο EEIA αλγόριθμος δημιουργεί ένα δέντρο συλλογής και κάθε κόμβος αποθηκεύει τις μετρήσεις όλων των παιδιών του, τις επεξεργάζεται με τις δικές του και στέλνει ένα συναθροισμένο πακέτο στον πατέρα του, επιτυγχάνοντας την μείωση στο μέγεθος του πακέτου. Επιπλέον, δημιουργεί ένα ευρετήριο (index) του δέντρου συλλογής, παρόμοιο με το Σημασιολογικό Δέντρο Δρομολόγησης (Semantic Routing Tree -

SRT³) που χρησιμοποιείται στην μέθοδο TinyDB ώστε να είναι μειώσει τον αριθμό των ανταλλασσόμενων πακέτων για τις ερωτήσεις στο δίκτυο. Η δημιουργία του υπο-δέντρου ευρετηρίου (index tree - IST), το οποίο χρησιμοποιείται για την δρομολόγηση, επιφέρει, όμως, επιπλέον κόστος στην συντήρηση της λειτουργίας του αλγορίθμου. Επιπλέον, οι συγγραφείς έχουν δημιουργήσει μια μέθοδο για βελτιστοποίηση των ερωτήσεων, με το να διατηρείται αρχείο προηγούμενων ερωτήσεων, και να στέλνονται οι ερωτήσεις μόνο στους κόμβους οι οποίοι έχουν και την μεγαλύτερη απόκλιση τιμής από την προηγούμενη ερώτηση, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο την εξοικονόμηση της ενέργειας.

Τέλος, οι Manjeshwar, Zeng και Agrawal [54] παρουσίασαν το 2002 το πρωτόκολλο APTEEN (Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network) για την συλλογή των δεδομένων από τους αισθητήρες στις αιτήσεις των εφαρμογών. Η τεχνική αυτή κατηγοριοποιεί τα δεδομένα που ζητούν οι χρήστες σε τρεις κατηγορίες: ιστορικές, στιγμιαίες και επίμονες. Οι ιστορικές ερωτήσεις απευθύνονται κυρίως στον κεντρικό σταθμό συλλογής και χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των αποθηκευμένων δεδομένων σε αυτόν. Συνήθως είναι της μορφής «Ποια ήταν η θερμοκρασία στο ανατολικό τμήμα του δικτύου πριν δύο ώρες;» Οι στιγμιαίες έχουν ως στόχο να αποτυπώσουν την κατάσταση του δικτύου την χρονική στιγμή που θέτονται. Παράδειγμα τέτοιου τύπου ερώτησης είναι: «Ποια είναι η θερμοκρασία στο βορινό τμήμα του δικτύου». Τέλος, οι επίμονες ερωτήσεις χρησιμοποιούνται για να παρακολουθήσουν την κατάσταση του δικτύου σε μια χρονική περίοδο: «Ανάφερε την θερμοκρασία στο δυτικό τμήμα του δικτύου για τις επόμενες δύο ώρες». Για την συλλογή των μετρήσεων αρχικά το δίκτυο διαχωρίζεται σε ομάδες από αισθητήρες εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο LEACH του Heinzelman [35] που περιγράφηκε νωρίτερα. Επιπλέον, γειτονικοί κόμβοι οι οποίοι λαμβάνουν παρόμοιες μετρήσεις, σχηματίζουν ζεύγη και σε κάθε γύρο συλλογής μόνο ένα μέλος του ζεύγους αποστέλλει τα δεδομένα του ενώ το άλλο τίθεται σε κατάσταση αδρανοποίησης (sleeping mode).

2.2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ

Η διαδικασία της συνάθροισης, όπως συζητήθηκε παραπάνω, κατά την εφαρμογή της αποφέρει μεγάλα ενεργειακά οφέλη σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, καθώς συντελεί

³ Ένα Σημασιολογικό Δέντρο Δρομολόγησης είναι ένα ευρετήριο με βάση ένα σταθερό γνώρισμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση κόμβων που περιέχουν δεδομένα συναφή με την ερώτηση.

στην μείωση του μεγέθους των πακέτων και στην ελάττωση της κίνησης στο δίκτυο, με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της ζωής / λειτουργίας του δικτύου. Παράλληλα, όμως, σε κάποιες περιπτώσεις επιφέρει πιθανώς και αρνητικές επιπτώσεις, η παρουσίαση και η ανάλυση των οποίων αποτελεί θέμα αυτής της ενότητας.

Μια μείζονος σημασίας επίπτωση αποτελεί η καθυστέρηση των πακέτων δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, και για το λόγο αυτό έχει απασχολήσει διάφορες ερευνητικές εργασίες. Με τον όρο καθυστέρηση εννοούμε τον χρόνο από την στιγμή δημιουργίας ενός πακέτου μέτρησης μέχρι τη στιγμή την οποία θα φτάσει στο κέντρο συλλογής. Κατά την διαδικασία της συνάθροισης τα πακέτα δεδομένων καθυστερούν στους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου, όπου και συναθροίζονται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική τους καθυστέρηση. Ενώ σε εφαρμογές όπως παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος, η καθυστέρηση αυτή είναι αποδεκτή, σε εφαρμογές όπως παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, μεγάλες καθυστερήσεις επιδρούν στην ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας.

Γενικά σε ένα δίκτυο η τυπική καθυστέρηση για ένα πακέτο δίνεται από:

$$T_{total} = T_{propagation} + T_{transmission} + T_{queuing}$$

Πιο αναλυτικά, ο χρόνος για ένα πακέτο να φτάσει από τον κόμβο γέννησης του στο κέντρο συλλογής είναι το άθροισμα του χρόνου διάδοσης ($T_{propagation}$), του χρόνου μετάδοσης ($T_{transmission}$), και του χρόνου αναμονής στην ουρά ($T_{queuing}$).

Όταν πραγματοποιείται συνάθροιση ο συνολικός χρόνος αυξάνεται κατά τον χρόνο τον οποίο γίνεται η συνάθροιση ($T_{aggregation}$), όπως δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$T_{total} = T_{propagation} + T_{transmission} + T_{queuing} + T_{aggregation}$$

Στο [34] οι συγγραφείς χρησιμοποιούν τον δείκτη της φρεσκιάδας των μετρήσεων (data freshness) για να αξιολογήσουν διάφορες μεθόδους συνάθροισης. Η μετρική αυτή αναπαριστά κατ' ουσία την καθυστέρηση ενός πακέτου και χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει πόσο «φρέσκα» ή έγκαιρα είναι τα δεδομένα στο κέντρο συλλογής. Στο [39] χρησιμοποιείται ο δείκτης *ενέργεια × καθυστέρηση* (*energy x delay*) για να αξιολογήσει τους αλγόριθμους LEACH-C και PEGASIS, η οποία αναδεικνύει την αντίθεση (tradeoff) μεταξύ της ενέργειας που καταναλώνεται και της καθυστέρησης των πακέτων σε ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων.

Επιπλέον, η ακρίβεια στα δεδομένων τα οποία λαμβάνονται από το κέντρο συλλογής, επηρεάζονται από την διαδικασία της συνάθροισης. Πράγματι, ανάλογα με την συνάρτηση η οποία εφαρμόζεται (min, max, avg, sum, etc.) τα αρχικά δεδομένα των μετρήσεων των αισθητήρων μεταβάλλονται, γεγονός το οποίο δεν είναι αποδεκτό από εφαρμογές οι οποίες απαιτούν ακρίβεια στις μετρήσεις. Στο [55] οι Boulis, Ganeriwal και Srivastava, θεώρησαν το πρόβλημα της περιοδικής συνάθροισης πακέτων και παρουσίασαν έναν κατανεμημένο προσεγγιστικό αλγόριθμο ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ευρεία κλάση προβλημάτων συνάθροισης, όπως υπολογισμό μέγιστης τιμής ή μέσου όρου ανάλογα με την συνάρτηση συνάθροισης η οποία εφαρμόζεται. Στην μέθοδο τους ορίζουν όρια – κατώφλια στην ακρίβεια των μετρήσεων και ανάλογα εφαρμόζουν συνάθροιση σε μικρό ή μεγάλο βαθμό. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι τα ενεργειακά οφέλη τα οποία αποκομίζονται είναι εξαρτώμενα από την ακρίβεια των μετρήσεων που απαιτούνται από την εφαρμογή.

Τέλος, στο [36] οι συγγραφείς εισάγουν μια τον δείκτη *Ποιότητα Συνάθροισης* (Data Aggregation Quality – DAG), και την εφαρμόζουν στα πρωτόκολλα E-LEACH και C-PEGASIS. Στο άρθρο αυτό ορίζεται ένα μοντέλο πληροφορίας για τις μετρήσεις των αισθητήρων και υπολογίζεται η εντροπία των δεδομένων προς συνάθροιση. Ο δείκτης αυτός υπολογίζει σε κάθε σημείο συνάθροισης το λόγο του μεγέθους των δεδομένων που συναθροίζονται προς την εντροπία αυτών.

2.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ

Όπως έχει αναφερθεί οι κόμβοι αισθητήρες έχουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα και τα δίκτυα αυτών αναμένεται να λειτουργούν σε συνθήκες όπου η αντικατάσταση των μπαταριών τους ή των ιδίων, σε περίπτωση βλάβης, είναι γενικά δύσκολη ή/και μη επιθυμητή διαδικασία. Η αύξηση του χρόνου λειτουργίας του δικτύου αποτελεί ένα από τους κύριους σχεδιαστικούς του παράγοντες. Υπό αυτό το πρίσμα έχουν προταθεί διάφορα πρωτόκολλα πρόσβασης στο μέσο τα οποία προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν έναν ή περισσότερους παράγοντες οι οποίοι ευθύνονται για την κατανάλωση ενέργειας στο επίπεδο πρόσβασης μέσου. Οι κύριοι παράγοντες κατανάλωσης ενέργειας είναι:

1. **Συγκρούσεις στο μέσο (Collision):** Όταν ένας κόμβος λαμβάνει περισσότερα του ενός πακέτα ταυτόχρονα τότε τα πακέτα αυτά συγκρούονται και απαιτείται η επαναμεταδοσή τους.

2. **Ωτοακουστία (Overhearing):** Γειτονικοί κόμβοι είναι δυνατόν να ακούσουν μεταδόσεις πακέτων τα οποία δεν προορίζονται για αυτούς.
3. **Πακέτα ελέγχου (Control packet overhead):** Τα περισσότερα πρωτόκολλα πρόσβασης στο μέσο χρησιμοποιούν πακέτα ελέγχου για την διατήρηση της λειτουργίας τους. Το πλήθος των πακέτων αυτών επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας.
4. **Κατάσταση αδρανείας (idle listening):** Οι κόμβοι ακόμα και όταν δεν λαμβάνουν ή στέλνουν πακέτα καταναλώνουν ενέργεια καθώς «αφουγκράζονται» το κανάλι για πιθανή κίνηση
5. **Εκπομπή εκτός χρόνου (overmitting):** Όταν ένας κόμβος στέλνει ένα πακέτο σε προορισμό ο οποίος δεν είναι έτοιμος να τον λάβει.

Ένα πρωτόκολλο σχεδιασμένο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικό προσπαθώντας να μειώσει την ενέργεια η οποία καταναλώνεται στο δίκτυο. Επιπλέον, θα πρέπει να είναι επεκτάσιμο και προσαρμόσιμο στις αλλαγές, όπως είναι οι αλλαγές στο πλήθος, την πυκνότητα των αισθητήρων και την τοπολογία, οι οποίες προκαλούνται από την αποτυχία των κόμβων αλλά και την κινητικότητα τους. Παράγοντες και μετρήσιμοι δείκτες όπως είναι η ρυθμαπόδοση, η καθυστέρηση και η χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης έχουν δευτερεύοντα ρόλο στην σχεδίαση. Επιπλέον, σε σχέση με τα παραδοσιακά ασύρματα αυτο-οργανούμενα δίκτυα δεν υπάρχει η έννοια της δικαιοσύνης ανάμεσα στους κόμβους καθώς οι κόμβοι λειτουργούν συνεργατικά. Στα κλασσικά ασύρματα δίκτυα μετάδοσης φωνής και δεδομένων η δικαιοσύνη ανά βήμα στο επίπεδο πρόσβασης μέσου (per-hop MAC level fairness) είναι σημαντικό ζήτημα διότι ο κάθε χρήστης διεκδικεί το μέσο με ίση πιθανότητα και για ίσο χρόνο. Καθώς, όμως, στα δίκτυα αισθητήρων όλοι οι κόμβοι συνεργάζονται για την εκπλήρωση μιας κοινής εργασίας, μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ένας κόμβος μπορεί να έχει περισσότερα δεδομένα προς αποστολή σε σχέση με τους υπόλοιπους. Σε μια τέτοια περίπτωση - εφόσον η απόδοση στο στρώμα εφαρμογής διατηρείται - η δικαιοσύνη δεν είναι τόσο σημαντική.

Με βάση τον μηχανισμό για πρόβλεψη και αποφυγή των συγκρούσεων στο μέσο καθώς και με την οργάνωση του δικτύου, τα πρωτόκολλα τα οποία έχουν σχεδιαστεί για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα [56]:

1. Τυχαίας πρόσβασης: Στην κατηγορία αυτή οι κόμβοι λειτουργούν ανεξάρτητα και ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο κανάλι, το οποίο επιφέρει συγκρούσεις και περιόδους αδράνειας.
2. Προγραμματισμένης πρόσβασης: Η πιο συνηθισμένη μέθοδος προγραμματισμένης πρόσβασης είναι αυτή της χρήσης χρονοσχισμών (TDMA) όπου ο χρόνος χωρίζεται σε τμήματα / χρονοσχισμές και κάθε κόμβος μεταδίδει σε ορισμένες χρονοσχισμές βάσει προκαθορισμένου προγράμματος.
3. Υβριδικά πρωτόκολλα: Τα πρωτόκολλα αυτά συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν πρωτόκολλα τα οποία εναλλάσσουν την λειτουργία μεταξύ προγραμματισμένης και τυχαίας πρόσβασης ανάλογα με το φορτίο στο δίκτυο. Το μειονέκτημα τους είναι πως αυξάνουν την πολυπλοκότητα στη διατήρηση της λειτουργίας τους.

Πολλά από τα πρωτόκολλα τα οποία έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες χρησιμοποιούν κοινές μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας. Μια από τις πιο συνηθισμένες είναι η διακοπή της λειτουργίας της κεραίας επικοινωνίας τους (πομποδέκτη), όπου και οι κόμβοι τίθενται σε κατάσταση «ύπνου». Οι αισθητήρες για το διάστημα αυτό δεν μπορούν ούτε να λάβουν ούτε να στείλουν δεδομένα, αλλά μπορούν να πραγματοποιούν μετρήσεις. Η ενέργεια η οποία καταναλώνεται κατά το διάστημα του ύπνου είναι πολύ μικρή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση τη διάρκειας ζωής του δικτύου αισθητήρων. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά η μείωση του χρόνου αδράνειας, του χρόνου δηλαδή κατά τον οποίο οι κόμβοι «ακούν» το κανάλι χωρίς να πραγματοποιούν κάποια άλλη ενέργεια. Η επιλογή του χρονικού διαστήματος του ύπνου καθώς και του αριθμού των αισθητήρων οι οποίοι θα βρίσκονται στην κατάσταση αυτή κάθε δεδομένη χρονική στιγμή, εξαρτάται τόσο από τα πρωτόκολλα τα οποία έχουν προταθεί, όσο και από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

2.3.1 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΤΥΧΑΙΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΣΟ

Ίσως το πιο γνωστό πρωτόκολλο τυχαίας πρόσβασης είναι το CSMA το οποίο είναι τόσο δημοφιλές εξαιτίας της απλότητας, της προσαρμοστικότητας και της ευρωστίας του. Δεν απαιτεί καμία υποδομή και οργάνωση στο δίκτυο ούτε και τον χρονικό συγχρονισμό μεταξύ των συμμετεχόντων κόμβων. Παρ' όλα αυτά έχει πολλά μειονεκτήματα, διότι προκαλούνται

πολλές συγκρούσεις στην μετάδοση των πακέτων. Αν και με την μέθοδο της «αφούγκρασης» του μέσου (carrier sensing) οι συγκρούσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων μπορούν να αποφευχθούν, συγκρούσεις μπορούν να συμβούν μεταξύ κόμβων που απέχουν δύο βήματα. Το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού, όπως ονομάζεται, μπορεί να επιλυθεί με την χρήση πακέτων ελέγχου RTS – Request To Send, CTS – Clear To Send, τα οποία ανταλλάσσουν δύο κόμβοι όταν θέλουν να ανταλλάξουν μεταξύ τους δεδομένα; με τον αποστολέα να στέλνει πακέτο RTS στον παραλήπτη και αυτός να του απαντάει με CTS ενημερώνοντας του ότι είναι έτοιμος να δεχτεί το πακέτο. Με την ανταλλαγή των πακέτων αυτών οι γειτονικοί κόμβοι λαμβάνουν γνώση της επικείμενης μετάδοσης και δεν προχωρούν σε δικές τους μεταδόσεις. Αν και η μέθοδος αυτή επιλύει το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού, αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό, αλλά και για τα άλλα μειονεκτήματα τα οποία εμφανίζει το CSMA, σπάνια χρησιμοποιείται και έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρωτόκολλα τα οποία προσπαθούν να εξαλείψουν ή να μετριάσουν κάποια από τα μειονεκτήματα του.

Το πρωτόκολλο PAMAS (Power Multi Access with Signaling [57]) αντιμετωπίζει το πρόβλημα της αδρανούς ακρόασης με το να ορίζει τους κόμβους σε κατάσταση ύπνου όταν δεν στέλνουν ή δεν λαμβάνουν πακέτα. Επιπλέον χρησιμοποιεί δύο διαφορετικούς πομποδέκτες; έναν για τα μηνύματα δεδομένων και έναν για τα πακέτα ελέγχου. Για την αντιμετώπιση των συγκρούσεων, το πρωτόκολλο κάνει χρήση των πακέτων ελέγχου RTS – CTS και επιπλέον ο παραλήπτης εκπέμπει ένα τόνο από το κανάλι ελέγχου για να δηλώσει πως το κανάλι είναι κατειλημμένο. Ο τόνος αυτός είναι διπλάσιος σε διάρκεια του μεγέθους των RTS – CTS πακέτων. Η ανάγκη όμως για δύο πομποδέκτες καθιστά το πρωτόκολλο PAMAS ενεργοβόρο και πολύπλοκο στην υλοποίηση και συντήρηση του.

Το πρωτόκολλο SHIFT [58] προτάθηκε για τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων τα οποία αποστέλλουν τις μετρήσεις τους στο κέντρο συλλογής όταν τις λάβουν (event-driven). Το πρωτόκολλο θεωρεί πως κάθε φορά που οι αισθητήρες ανιχνεύουν ένα γεγονός και παράγουν μια μέτρηση, οι πρώτες R από τις N επικείμενες μετρήσεις έχουν την πιο σημαντική πληροφορία και πρέπει να φτάσουν με μικρή καθυστέρηση στο κέντρο συλλογής. Οι συγγραφείς επιλέγουν την χρονική στιγμή την οποία θα μεταδώσουν στο παράθυρο ανταγωνισμού με βάση μια μη ομοιόμορφα κατανεμημένη συνάρτηση πιθανότητας. Εάν κανένας κόμβος δεν μεταδώσει την πρώτη χρονοσχισμή του παραθύρου ανταγωνισμού, τότε αυξάνεται εκθετικά η πιθανότητα μετάδοσης του για την επόμενη χρονοσχισμή, εφόσον ο αριθμός των κόμβων που ανταγωνίζονται για μετάδοση είναι μικρός. Το πρωτόκολλο SHIFT

επιτυγχάνει μικρή καθυστέρηση όταν υπάρχουν πολλοί αισθητήρες οι οποίοι παράγουν κίνηση, γεγονός το οποίο επιβεβαιώθηκε από συγκριτικές προσομοιώσεις με το IEEE 802.11, αλλά το κύριο πλεονέκτημα του είναι η αύξηση του χρόνου αδρανούς ακρόασης. Επιπλέον, καθώς το SHIFT κάνει χρήση χρονοσχισμών στο κανάλι ανταγωνισμού, προτάθηκε να συνυπάρχει με άλλα πρωτόκολλα πρόσβασης το μέσο όπως είναι το SMAC [61].

Το πρωτόκολλο TrawMAC [59] είναι ένα πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο το οποίο λαμβάνει υπόψη την κίνηση στο δίκτυο. Κάνει χρήση πακέτων προοιμίου (preambles) τα οποία τα διαιρεί σε μικρά πλαίσια που μεταφέρουν πληροφορίες για τον κόμβο παραλήπτη καθώς και για τον χρόνο της μετάδοσης. Επιπλέον, σύμφωνα με το TrawMAC οι αισθητήρες έχουν ένα πρόγραμμα ύπνου το οποίο μεταφέρεται μέσω των προοιμίων σε όλους τους κόμβους γείτονες του. Για μεταδόσεις μονοεκπομπής (unicast) ο κόμβος αποστολέας στέλνει αρχικά το πρώτο πλαίσιο του προοιμίου και αναμένει για την αποστολή επιβεβαίωσης λήψης (ACK) από τον παραλήπτη για να στείλει το πακέτο δεδομένων. Αν δεν την λάβει συνεχίζει να στέλνει τα υπόλοιπα πλαίσια. Για την αντιμετώπιση της αυξημένης κίνησης, το πρωτόκολλο TrawMAC μεταδίδει πολλαπλά πακέτα δεδομένων με μία μόνο κράτηση στο κανάλι, το οποίο επιφέρει ενεργειακά οφέλη.

Τέλος, το πρωτόκολλο SyncWUF [60] συνδυάζει τον μηχανισμό της απλής σηματοδότησης με ένα πλαίσιο αφύπνισης (wake-up frame – WUF). Κάθε αποστολέας έχει γνώση του προγράμματος λειτουργίας του αποστολέα του και το ελέγχει κάθε φορά που θέλει να του στείλει ένα πακέτο. Εάν το πρόγραμμα είναι ενημερωμένο, στέλνεται ένα μικρό πακέτο WUF, όπως στο WiseMAC [68], ενώ εάν δεν είναι, στέλνεται ένα μεγάλο WUF. Ένα πακέτο WUF αποτελείται από πολλαπλά μικρά πακέτα αφύπνισης SWUF τα οποία περιλαμβάνουν πληροφορίες για τον παραλήπτη καθώς και την θέση του πλαισίου SWUF μέσα στο πλαίσιο WUF. Με τον τρόπο αυτό ο παραλήπτης έχει τη δυνατότητα να αποφασίσει πότε θα ξυπνήσει ώστε να λάβει δεδομένα, μειώνοντας έτσι τον χρόνο αδρανούς ακρόασης. Εάν, όμως, ένας αποστολέας χάσει την χρονική περίοδο που ο παραλήπτης είναι ενεργός, θα πρέπει να περιμένει μέχρι την επόμενη περίοδο, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τον συνολικό χρόνο καθυστέρησης των πακέτων.

2.3.2 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΕΝΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΣΟ

Τα πρωτόκολλα της κατηγορίας αυτής επιτυγχάνουν τη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας με την εφαρμογή προγράμματος λειτουργίας ενεργής ακρόασης / ύπνου σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Ο χρόνος διαιρείται σε πλαίσια και κάθε πλαίσιο σε καθορισμένο αριθμό χρονοσχισμών. Οι κόμβοι οι οποίοι έχουν δεδομένα να στείλουν ξυπνάνε στην αρχή κάθε πλαισίου και ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο μέσο. Καθώς η προσπάθεια κατάκτησης του καναλιού πραγματοποιείται κάθε ενεργή περίοδο, τα πρωτόκολλα αυτά χρησιμοποιούν τεχνικές αποφυγής συγκρούσεων, παρόμοιες με αυτής των πακέτων ελέγχου RTS – CTS.

Το πρωτόκολλο SMAC [61] είναι από τα πρώτα τα οποία εισάγουν την τεχνική αυτή και προσπαθεί να περιορίσει την σπατάλη ενέργειας στο δίκτυο, θυσιάζοντας την δικαιοσύνη σε κάθε βήμα (per hop fairness), επιφέροντας, όμως, καθυστέρηση στη συλλογή των δεδομένων στο δίκτυο. Στο SMAC τα μεγάλα μηνύματα κατακερματίζονται σε μικρά κομμάτια και αποστέλλονται σε μια ριπή (burst). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση του μέσου για περισσότερη ώρα από κόμβους που έχουν περισσότερα δεδομένα να στείλουν. Η τεχνική αυτή εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια διότι ελαττώνει την καθυστέρηση που υπεισέρχεται από την ανταλλαγή πακέτων ελέγχου. Το SMAC ενσωματώνει περιοδικές καταστάσεις ύπνου των κόμβων ανάμεσα στα διαστήματα αδρανούς ακρόασης. Στην κατάσταση ύπνου, ο κόμβος σβήνει τον πομποδέκτη του εξοικονομώντας την ενέργεια που θα σπαταλούσε σε κατάσταση αδρανείας, έχοντας ως αντίκτυπο την αύξηση της καθυστέρησης καθώς ο αποστολέας πρέπει να περιμένει τον παραλήπτη να ξυπνήσει για να του αποστείλει τα δεδομένα. Στο βασικό μοντέλο λειτουργίας, κάθε κόμβος κοιμάται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, έπειτα ξυπνάει και ακούει να δει εάν υπάρχει κάποιος γειτονικός κόμβος που θέλει να του μιλήσει. Εάν ακούσει την ανταλλαγή μηνυμάτων RTS – CTS από γειτονικούς κόμβους, τότε αντιλαμβάνεται την επικείμενη μετάδοση και ενημερώνει έναν μετρητή NAV με πληροφορία για το μέγεθος του πακέτου, ο οποίος μειώνεται με τον χρόνο. Για να μην καταναλώσει πόρους η λειτουργία του κόμβου σε κατάσταση ύπνου και ξυπνάει όταν ο μετρητής NAV γίνει μηδέν. Όταν ξυπνήσει μένει ενεργός και περιμένει ορισμένο χρονικό διάστημα για να διαπιστώσει αν θα είναι παραλήπτης κάποιου πακέτου. Με το πέρας του διαστήματος, αν δεν υπάρξει μετάδοση, κοιμάται και ξυπνάει στον επόμενο κύκλο. Η τεχνική αυτή ονομάζεται *προσαρμοσμένη ακρόαση* (adaptive listening) και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής καθυστέρησης στο δίκτυο. Όλοι οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να διαλέξουν το δικό

τους πρόγραμμα ακρόασης/ύπνου, αλλά προτιμάται οι γειτονικοί κόμβοι να συγχρονίζονται μεταξύ τους, δηλαδή να ακολουθούν το ίδιο πρόγραμμα. Οι κόμβοι ανταλλάσσουν τα προγράμματα τους με το να τα διαφημίζουν σε όλους τους άμεσους γείτονές τους. Αυτό εξασφαλίζει πως όλοι οι γείτονες κόμβοι μπορούν να μιλάνε μεταξύ τους ακόμα και αν ακολουθούν διαφορετικό πρόγραμμα. Το μοντέλο του SMAC, όμως, απαιτεί περιοδικό συγχρονισμό μεταξύ των γειτονικών κόμβων ώστε να διορθώνονται οι ατέλειες που προκύπτουν από τους διαφορετικούς ωρολογιακούς μηχανισμούς.

Εν συνεχεία, προτάθηκαν διάφορα πρωτόκολλα βασισμένα στο SMAC, τα οποία προσπαθούν να επιλύσουν το πρόβλημα της μεγάλης καθυστέρησης η οποία προκαλείται από τον περιοδικό ύπνο των αισθητήρων. Το DMAC [62] είναι ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με μικρή καθυστέρηση, σχεδιασμένο αποκλειστικά για δενδρικές αρχιτεκτονικές δικτύου. Επιχειρεί να λύσει το πρόβλημα της διακοπής στην ροή των δεδομένων μεταξύ πηγής και προορισμού με την απόδοση προγράμματος στους κόμβους τα οποία εξαρτώνται από το βάθος αυτών μέσα στο δέντρο. Ο κάθε κύκλος αποτελείται από περιόδους λήψης, αποστολής, και ύπνου και εφαρμόζεται στους γείτονες κόμβους με σταδιακή χρονική απόκλιση, ώστε αυτοί να ξυπνούν διαδοχικά όπως μια αλυσιδωτή αντίδραση. Τα πακέτα ελέγχου RTS/CTS δεν χρησιμοποιούνται, ενώ για την ανάκτηση των χαμένων πακέτων με αναμετάδοση χρησιμοποιούνται πακέτα ARQ (Automatic Repeat Request) και ACK.

Το T-MAC πρωτόκολλο [63] επιχειρεί να μειώσει τον χρόνο αδρανούς ακρόασης μέσω της προσαρμογής της ενεργής περιόδου των κόμβων. Τα πακέτα δεν μεταδίδονται κατά τη διάρκεια μιας προκαθορισμένης περιόδου όπως στο SMAC, αλλά μεταδίδονται με μια ριπή (burst) στην αρχή κάθε πλαισίου. Το πρωτόκολλο ορίζει τα *γεγονότα ενεργοποίησης*, όπως είναι η ανίχνευση κίνησης στο μέσο, ανταλλαγή ή λήψη δεδομένων, ή η γνώση για ανταλλαγή δεδομένων στην γειτονική περιοχή, γνώση η οποία αποκτάται μέσω πακέτων RTS- CTS. Όταν ένας κόμβος δεν ανιχνεύσει κανένα *γεγονός ενεργοποίησης* για κάποια χρονική περίοδο θέτει τον εαυτό του σε κατάσταση ύπνου μέχρι την επόμενη προγραμματισμένη περίοδο ακρόασης, εξοικονομώντας ενέργεια. Επιπλέον, το T-MAC για να μειώσει την συνολική καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο, κάνει χρήση του πακέτου ελέγχου *Μελλοντική αίτηση για αποστολή* (Future Request To Send – FRTS), ώστε ένας κόμβος να ειδοποιεί τους γείτονες του για μελλοντικές αποστολές, και αυτοί αντίστοιχα να προσαρμόζουν τον χρόνο ακρόασης τους.

Το πρωτόκολλο L-MAC (Lightweight MAC) [64] βασίζεται στο παράδειγμα της διαίρεσης του χρόνου σε χρονοσχισμές (TDMA). Σε αντίθεση, όμως, με τα παραδοσιακά TDMA συστήματα, η διαίρεση του χρόνου δεν πραγματοποιείται κεντρικοποιημένα αλλά με κατανεμημένο τρόπο. Σε κάθε χρονοσχισμή ένας κόμβος θα μεταδώσει πάντα ένα μήνυμα το οποίο αποτελείται από δύο μέρη; ένα μήνυμα ελέγχου, με σταθερό μήκος το οποίο, μεταξύ άλλων, δηλώνει τον παραλήπτη, και τα δεδομένα. Το μήνυμα ελέγχου χρησιμοποιείται και για το συγχρονισμό των προγραμμάτων των κόμβων. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα ελέγχου και διαπιστώσει ότι δεν ανήκει στους παραλήπτες του επερχόμενου πακέτου δεδομένων, απενεργοποιεί την κεραία του και «κοιμάται» μέχρι την επόμενη χρονοσχισμή. Αντίστοιχα, κόμβοι οι οποίοι εμπλέκονται σε ανταλλαγή δεδομένων, «κοιμούνται» μόλις ολοκληρωθεί η μετάδοση.

Το πρωτόκολλο NAMA (Node Activation Multiple Access) [65] διαιρεί τον χρόνο σε μπλοκ με S_b τμήματα. Κάθε τμήμα αποτελείται από P_s μέρη και αυτά με την σειρά τους διαιρούνται σε T_p χρονοσχισμές. Κάθε κόμβος επιλέγει συγκεκριμένο μέρος P_s και ανταγωνίζεται για πρόσβαση στις χρονοσχισμές με όποιους άλλους κόμβους έχουν επιλέξει το ίδιο μέρος. Επιπλέον, κάθε κόμβος υπολογίζει την προτεραιότητα του με βάση και τις προτεραιότητες των γειτόνων του, και ανάλογα του ανατίθεται χρονοσχισμή μέσα στο επιλεγμένο μέρος. Αν κάποιος κόμβος έχει την μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με όλους τους γείτονες μέχρι δύο βημάτων, τότε μπορεί να μεταδώσει στη ζητούμενη χρονοσχισμή. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του πρωτοκόλλου είναι η συνεχής ανάγκη για υπολογισμό των προτεραιοτήτων, το οποίο καταναλώνει σημαντικό μέρος της ενέργειας των κόμβων.

Τέλος, οι Arisha et al. [66] πρότειναν ένα MAC πρωτόκολλο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, βασιζόμενοι στην τεχνική TDMA, στο οποίο εφαρμόζεται δρομολόγηση άμεσα εξαρτώμενη από τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Το πρωτόκολλο αυτό επιβάλλει αρχιτεκτονική δικτύου αποτελούμενη από συστοιχίες κόμβων αισθητήρων και από συλλέκτες δεδομένων που ονομάζονται πύλες. Για κάθε συστοιχία υπάρχει μια πύλη καθώς και ένας κεντρικός κόμβος στο δίκτυο, όπου αποτελεί τον τελικό παραλήπτη των πακέτων. Οι συστοιχίες δημιουργούνται με τέτοιο τρόπο ώστε οι πύλες να βρίσκονται εντός της εμβέλειας επικοινωνίας όλων των κόμβων αισθητήρων που την συγκροτούν. Οι πύλες χρησιμοποιούν επικοινωνία μεγάλης απόστασης για να στείλουν τα συναθροισμένα δεδομένα σε άλλες πύλες και τελικά στον κεντρικό κόμβο. Η κίνηση των δεδομένων μεταξύ των αισθητήρων γίνεται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και ως

αποτέλεσμα περιορίζονται οι συγκρούσεις και εξοικονομείται ενέργεια αφού οι κόμβοι οι οποίοι δεν συμμετέχουν στην παραπάνω διαδικασία κλείνουν τον πομποδέκτη τους.

2.3.3 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ

Τα υβριδικά πρωτόκολλα έχουν προταθεί για να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα αλλά και να μετριάσουν τα μειονεκτήματα των πρωτοκόλλων προγραμματισμένης και τυχαίας πρόσβασης. Οι τρόποι τους οποίους χρησιμοποιούν για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ποικίλουν; άλλα υιοθετούν άλλοτε συμπεριφορά CSMA και άλλοτε TDMA ανάλογα με την συμφόρηση στο δίκτυο ενώ άλλα αντιμετωπίζουν διαφορετικά τα μηνύματα διαφορετικού μεγέθους. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των υβριδικών πρωτοκόλλων είναι η προσαρμοστικότητα τους στις συνθήκες του δικτύου, το οποίο οδηγεί σε σημαντικά ενεργειακά οφέλη.

Ο Hoiyidi πρότεινε ένα πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο, Spatial TDMA and CSMA with Preamble Sampling [67], το οποίο ορίζει δύο κανάλια επικοινωνίας για τους κόμβους αισθητήρες. Στο κανάλι για την αποστολή και λήψη των δεδομένων γίνεται χρήση πρωτοκόλλου χρονοσχισμών TDMA, ενώ στο κανάλι στο οποίο γίνεται ανταλλαγή πακέτων ελέγχου η πρόσβαση επιτυγχάνεται με CSMA. Το πρωτόκολλο WiseMAC [68] βασίζεται στο παραπάνω πρωτόκολλο αυτό αλλά το βελτιώνει χρησιμοποιώντας μόνο ένα κανάλι πρόσβασης. Το WiseMAC χρησιμοποιεί non persistent CSMA (np-CSMA) με χρήση δειγματοληψίας προοιμίου (preamble sampling) για να μειώσει τον χρόνο αδράνειας των κόμβων, ενώ οι κόμβοι ακολουθούν προγράμματα λειτουργίας Ακρόασης / Ύπνου. Πριν από την αποστολή ενός πακέτου στέλνεται ένα προοίμιο ώστε να ειδοποιηθεί ο παραλήπτης. Οι κόμβοι δειγματοληπτικά ακούν το κανάλι και αν αυτό είναι κατειλημμένο περιμένουν μέχρι να λάβουν το πακέτο ή μέχρι το κανάλι να γίνει ξανά αδρανές. Το μέγεθος του προοιμίου είναι ίσο με την περίοδο δειγματοληψίας, αν και αυτό δύναται να επιφέρει αύξηση στην κατανάλωση της ενέργειας λόγω του φαινομένου overmitting. Για το λόγο αυτό, το WiseMAC προσφέρει μια μέθοδο η οποία προσαρμόζει δυναμικά το μέγεθος του προοιμίου με βάση τα προγράμματα των γειτόνων τους. Ένα βασικό μειονέκτημα του WiseMAC είναι το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας λόγω συγκρούσεων.

Το πρωτόκολλο TRAMA [69] προτάθηκε για τη αύξηση της χρησιμοποίησης των κλασικών πρωτοκόλλων χρονοσχισμών με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Είναι παρόμοιο με

το πρωτόκολλο NAMA [65], στο οποίο για κάθε χρονοσχιμή ένας αλγόριθμος εκλογής χρησιμοποιείται για να επιλέξει τον κόμβο αποστολέα μεταξύ γειτόνων κόμβων δύο βημάτων, ώστε να εξαλείψει το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού. Καθώς όμως το πρωτόκολλο NAMA εμφανίζει το πρόβλημα της ωτακουστίας δεν είναι ενεργειακά αποδοτικό. Στο TRAMA πρωτόκολλο ο χρόνος χωρίζεται σε περιόδους τυχαίας πρόσβασης και προγραμματισμένης πρόσβασης. Η περίοδος τυχαίας πρόσβασης χρησιμοποιείται για να ανταλλάξουν οι κόμβοι τοπική πληροφορία, όπως είναι η γνώση όλων των κόμβων γειτόνων με απόσταση μέχρι και δύο βήματα, μέσω ανταγωνισμού στο κανάλι. Επιπλέον, κάθε κόμβος ανακοινώνει σε ποιές χρονοσχιμές θα αποστείλει πακέτα δεδομένων καθώς και τους αποδέκτες αυτών. Όταν κάποιος κόμβος δεν μεταδίδει ή δεν λαμβάνει πακέτα, τίθεται σε κατάσταση ύπνου. Αν και χρησιμοποιείται πρωτόκολλο χρονοσχιμών για την μετάδοση των δεδομένων, αναλυτικές μελέτες δείχνουν πως τόσο το TRAMA όσο και το NAMA πρωτόκολλο παρουσιάζουν μεγάλες καθυστερήσεις σε σχέση με πρωτόκολλο πρόσβασης με ανταγωνισμό.

Τέλος, το πρωτόκολλο Z-MAC [70] είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, το οποίο προσαρμόζεται στο φορτίο του δικτύου ως εξής: σε συνθήκες χαμηλού φορτίου συμπεριφέρεται σαν απλό CSMA πρωτόκολλα, ενώ σε συνθήκες υψηλού ανταγωνισμού ως TDMA πρωτόκολλο. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του Z-MAC είναι πως η απόδοσή του δεν επηρεάζεται εύκολα από σφάλματα συγχρονισμού, απόδοσης των χρονοσχιμών και χρονικές αλλαγές στις συνθήκες του καναλιού. Στην χειρότερη περίπτωση η λειτουργία του θα εκφυλιστεί σε αυτή ενός CSMA πρωτοκόλλου. Για να πετύχει υψηλές αποδόσεις, το πρωτόκολλο Z-MAC διατρέχει μια φάση αρχικοποίησης στους κόμβους αισθητήρες η οποία αποτελείται από τα εξής στάδια: ανακάλυψη γειτονικών κόμβων, απόδοση χρονοσχιμών, τοπική ανταλλαγή μηνυμάτων, και κεντρικό συγχρονισμό.

2.3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ

Τα παραπάνω πρωτόκολλα σχεδιάστηκαν με βάση την περιοδική λειτουργία των αισθητήρων με σκοπό τη μείωση του χρόνου αδρανούς ακρόασης και κατ' επέκταση της αύξησης της διάρκειας ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Η εισαγωγή χρονικής περιόδου ύπνου στην κανονική λειτουργία των αισθητήρων επιφέρει μεγάλες καθυστερήσεις στην αποστολή των πακέτων πληροφορίας στο κέντρο συλλογής. Πράγματι, όταν ένας κόμβος επιθυμεί να προωθήσει δεδομένα σε έναν γείτονα του πρέπει ο γείτονας του να είναι σε θέση

να τα λάβει. Αν βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου τότε ο αποστολέας κρατάει το πακέτο στην ουρά του και περιμένει να βρεθεί ο παραλήπτης σε ενεργή περίοδο. Με τον τρόπο αυτό παρατηρείται ότι πακέτα δεδομένων δύναται να καθυστερήσουν πολλούς κύκλους.

Σύμφωνα με την παράγραφο 2.2.5, σε ένα δίκτυο η τυπική καθυστέρηση για ένα πακέτο δίνεται από:

$$T_{total} = T_{propagation} + T_{transmission} + T_{queuing}$$

Όταν οι αισθητήρες λειτουργούν με προγράμματα περιοδικής ακρόασης ο χρόνος αυτός ορίζεται ως,

$$T_{total} = T_{propagation} + T_{transmission} + T_{queuing} + T_{sleep}$$

Όπου T_{sleep} ο χρόνος κατά τον οποίο οι κόμβοι «κοιμούνται» και εξαρτάται από τους πόσους κόμβους σε κατάσταση ύπνου θα συναντήσει ένα πακέτο κατά την μετάδοση του στο κέντρο συλλογής.

Αναγνωρίζοντας το πρόβλημα αυτό, παρουσιάστηκαν παραπάνω διάφορα πρωτόκολλα τα οποία επιχειρούν την μείωση της συνολικής καθυστέρησης, συνήθως με τρόπους όπου μειώνουν την περίοδο του ύπνου σε ορισμένους κόμβους. Οι μέθοδοι, αυτοί, αν και εμφανίζουν μικρότερη συνολική καθυστέρηση, αυξάνουν την συνολική κατανάλωση της ενέργειας, διότι αυξάνεται η ενεργή περίοδος ενός κόμβου και επιπλέον το κύκλωμα για τις συνεχείς ενεργοποιήσεις και απενεργοποιήσεις του πομποδέκτη καταναλώνει μη αμελητέο ποσό ενέργειας. Οδηγούμενοι από αυτές τις παρατηρήσεις προτείνουμε ένα πρωτόκολλο στο κεφάλαιο 5, το οποίο δημιουργεί συγχρονισμένα μονοπάτια πληροφορίας και ως εκ τούτου, μειώνεται η συνολική καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο.

3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ & ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος συλλογής δεδομένων ο οποίος πραγματοποιεί συνάθροιση στους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου με κατανεμημένο και πιθανοτικό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη του τους περιορισμούς ποιότητας που τίθενται από την εφαρμογή. Η μετρική ποιότητας υπηρεσίας την οποία χρησιμοποιούμε κατά την διάρκεια της διατριβής είναι η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση (end-to-end delay) D , η οποία ορίζει τον χρόνο μέσα στον οποίο πρέπει τα δεδομένα να φτάσουν στο κέντρο συλλογής. Ο λόγος ο οποίος μας οδηγεί στην επιλογή αυτού του χρονικού περιορισμού είναι ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1 αναμένονται ή ήδη χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως συστήματα παρακολούθησης, [12],[13], και άρα η έγκαιρη μετάδοση των δεδομένων τους στο κέντρο συλλογής είναι μείζονος σημασίας. Το προτεινόμενο πλαίσιο υλοποιείται στο στρώμα εφαρμογής (κατ' αναλογία με την στοίβα πρωτοκόλλων κατά ISO) και υποθέτει οποιοδήποτε υποκείμενο αλγόριθμο δρομολόγησης, ωστόσο μέσα στα πλαίσια της διατριβής προτείναμε και υλοποιήσαμε έναν αλγόριθμο κατασκευής δέντρου ο οποίος χρησιμοποιείται για την δρομολόγηση των πακέτων (παράγραφος 3.3). Μοντελοποιήσαμε την διαδικασία της συνάθροισης και προτείναμε ένα απλό μηχανισμό λήψης απόφασης συνάθροισης και εν συνεχεία αξιολογήσαμε την επίδοση του ως προς συγκεκριμένους δείκτες απόδοσης. Τέλος, ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε δίκτυα τα οποία λειτουργούν σε περιβάλλοντα με επιπλέον περιορισμούς όσο αφορά τον ρυθμό μετάδοσης και ταχύτητα διάδοσης στο μέσο. Ένα τέτοιο δίκτυο είναι ένα υποβρύχιο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο, όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 3.5, αποτελεί ένα νέο πεδίο ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων.

3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ

Θεωρούμε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων όπου οι αισθητήρες - κόμβοι συλλέγουν δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον και τα αποστέλλουν στο κέντρο συλλογής του δικτύου. Η επικοινωνία τους με το κέντρο αυτό πραγματοποιείται μέσω πολλαπλών βημάτων, όπου κάθε κόμβος μπορεί να λειτουργήσει ως ενδιάμεσος δρομολογητής, μεταδίδοντας όχι μόνο τα δικά του δεδομένα αλλά και των γειτόνων του. Κάθε αισθητήρας όταν δέχεται ένα πακέτο από κάποιον γειτονικό του αισθητήρα ή γεννά ο ίδιος ένα πακέτο μετρήσεων, έχει δύο επιλογές: είτε να μεταδώσει αμέσως το πακέτο είτε να το κρατήσει και να το συναθροίσει με άλλα

πακέτα. Κατά τη διαδικασία της συνάθροισης, ο κόμβος αισθητήρας περιμένει χρονικό διάστημα τ , το οποίο ορίζεται από την εφαρμογή και τις απαιτήσεις αυτής. Στο χρονικό διάστημα αυτό όποια δεδομένα φτάνουν στον κόμβο (είτε επειδή δρα ως ενδιάμεσος διακομιστής είτε επειδή γεννήθηκαν στον συγκεκριμένο κόμβο) συναθροίζονται και δημιουργείται ένα μόνο πακέτο το οποίο αποστέλλεται προς μετάδοση μετά το πέρας του χρονικού αυτού διαστήματος.

Επιπλέον θεωρούμε ότι η υπηρεσία συλλογής δεδομένων την οποία παρέχει το δίκτυο, έχει συγκεκριμένους περιορισμούς και απαιτήσεις ποιότητας. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε πως η εφαρμογή θέτει χρονικό περιορισμό στη συλλογή των μετρήσεων από τους κόμβους αισθητήρες, ορίζοντας πως μετρήσεις οι οποίες φτάνουν με μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση από κάποιο προκαθορισμένο κατώφλι στο κέντρο συλλογής θεωρούνται "παρωχημένες" και δεν γίνονται δεκτές λόγω μη χρησικότητας. Αν το τελικό (συναθροισμένο ή μη πακέτο) ληφθεί εντός του προκαθορισμένου χρονικού περιορισμού D , τότε θεωρείται επιτυχημένη μετάδοση. Στους ενδιάμεσους κόμβους ελέγχεται η ως εκείνη την στιγμή καθυστέρηση του πακέτου και αν είναι μεγαλύτερη από το D απορρίπτεται.

Κάθε ενδιάμεσος κόμβος αποφασίζει ανεξάρτητα αν θα πραγματοποιήσει συνάθροιση των δεδομένων που δέχεται από τους γείτονες του με τα δικά του δεδομένα. Η πιθανότητα με την οποία κάθε κόμβος αποφασίζει αν θα πραγματοποιήσει ή όχι συνάθροιση, υπολογίζεται με βάση τις απαιτήσεις που τίθενται από το δίκτυο για έγκαιρη μετάδοση των δεδομένων και με χρήση μόνο τοπική πληροφορίας. Το χρονικό διάστημα τ κατά το οποίο οι κόμβοι περιμένουν εισάγει μια μεταβλητή καθυστέρηση στον συνολικό χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου, αλλά όπως αναλύεται παρακάτω, το πρωτόκολλο διασφαλίζει την ελάττωση του φορτίου του δικτύου μέσω της μείωσης των πακέτων που μεταδίδονται. Η ελάττωση του φορτίου (αριθμού πακέτων που αποθηκεύονται και ζητούν πρόσβαση στο ασύρματο μέσο) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση τελικά του συνολικού χρόνου καθυστέρησης του πακέτου, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις συμφόρησης.

Για να αποφασίσει ένας κόμβος τη πραγματοποίηση ή μη συνάθροισης πρέπει να γνωρίζει τον χρόνο τον για την μετάδοση ενός πακέτου του στο κέντρο συλλογής, ο οποίος εξαρτάται από τη θέση του κόμβου στο δίκτυο και την απόσταση του από το κέντρο συλλογής, αλλά και από το κανάλι επικοινωνίας. Συνήθως, την πληροφορία για τη θέση και την απόσταση την παρέχει το υποκείμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Πιο αναλυτικά, όταν ένας κόμβος έχει δεδομένα να μεταδώσει ελέγχει την παρακάτω συνθήκη και αποφασίζει ένα από τα παρακάτω:

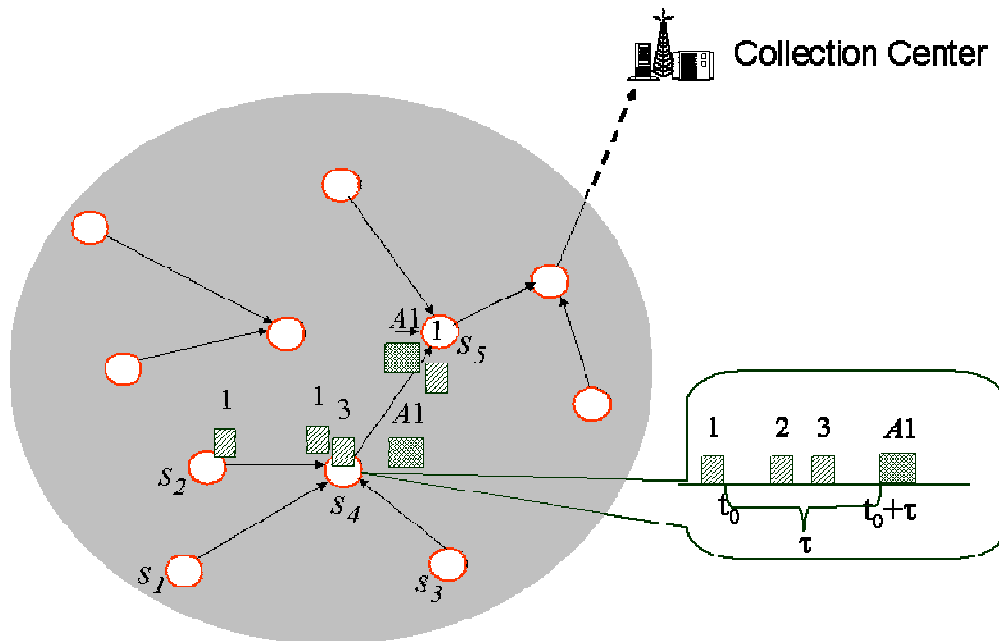
$$Hops * T_{transmit} + \tau + \epsilon \leq D$$

όπου $T_{transmit}$ ο χρόνος για μετάδοση ενός πακέτου από τον κόμβο i στον κόμβο j , $Hops$ η απόσταση σε βήματα του κόμβου i από το κέντρο συλλογής, τ η χρονική περίοδος της συναθροίσης και ϵ σταθερά η οποία αντιστοιχεί στο χρόνο για επαναμεταδόσεις.

α) Αν ο περιορισμός για έγκαιρη μετάδοση μπορεί να ικανοποιηθεί τότε ο κόμβος με πιθανότητα γ περιμένει χρονική διάρκεια τ και με πιθανότητα $1 - \gamma$ μεταδίδει απευθείας το πακέτο. Αν αποφασίσει να περιμένει τότε όλα τα πακέτα που λαμβάνει από τους γείτονες του κατά το χρονικό διάστημα τ τα συναθροίζει με το δικό του και αποστέλλει ένα μοναδικό πακέτο στην λήξη του χρονικού διαστήματος.

β) Αν ο περιορισμός για έγκαιρη μετάδοση μπορεί να ικανοποιηθεί μόνο αν ο κόμβος δεν περιμένει τότε μεταδίδει τα δεδομένα του στον γείτονα του αμέσως και χωρίς επιπλέον καθυστέρηση.

γ) Αν ο περιορισμός για έγκαιρη μετάδοση δεν μπορεί να ικανοποιηθεί τότε απορρίπτει το πακέτο, συμβάλλοντας κατά αυτόν τον τρόπο στην μείωση της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στην Εικόνα 8, όπου στον κόμβο s_4 συνενώνονται τρία πακέτα σε ένα (A1) κατά το χρονικό διάστημα το οποίο προωθείται στον κόμβο s_5 .



ΕΙΚΟΝΑ 8: Διαδικασία Συναθροίσης

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ

Με χρήση σωστών μηχανισμών δρομολόγησης θεωρούμε πως κάθε πακέτο περνάει από κάθε κόμβο αισθητήρα μόνο μια φορά, δηλαδή δεν υπάρχουν κύκλοι δρομολόγησης, και πως κάθε κόμβος δρομολογεί τα πακέτα σε γειτονικούς του κόμβους που βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο συλλογής. Θεωρούμε πως l κόμβοι βρίσκονται στο μονοπάτι από τον κόμβο – πηγή (ο οποίος γεννάει τα πακέτα) μέχρι το κέντρο συλλογής, και ορίζουμε το σύνολο αυτών των κόμβων $G_l = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$. Επιπλέον, θεωρούμε πως οι αποστάσεις d_i μεταξύ των κόμβων αισθητήρων και του κέντρου συλλογής διατάσσονται σε φθίνουσα σειρά, $d_1 > d_2 > \dots > d_l$, όπου d_i είναι η απόσταση ενός κόμβου s_i και του κέντρου συλλογής.

Επιπλέον, ορίζουμε ως $t_i^{(R)}$ τον χρόνο συνάθροισης στον κόμβο s_i , ο οποίος αντιστοιχεί στην χρονική περίοδο η οποία δαπανάται για συνάθροιση δεδομένων, ως $t_i^{(F)}$ τον χρόνο για μετάδοση στον κόμβο s_i η οποία περιλαμβάνει τον πιθανό χρόνο για επαναμετάδοση λόγω συνθηκών ανταγωνισμού στο μέσο (ο χρόνος αυτός σχετίζεται και με το μέγεθος του πακέτου προς μετάδοση, το εύρος ζώνης και την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης), και με $t_i^{(P)}$ τον χρόνο διάδοσης από τον κόμβο s_i στον επόμενο κόμβο s_{i+1} και εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των κόμβων. Οι χρονικές περίοδοι $t_i^{(R)}$, $t_i^{(F)}$ και $t_i^{(P)}$ είναι τυχαίες μεταβλητές (random variables) και οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας τους (pdf) ορίζονται ως $f_i^{(R)}(t)$, $f_i^{(F)}(t)$ και $f_i^{(P)}(t)$ αντίστοιχα. Ορίζουμε επιπλέον, ως t_i το χρονικό διάστημα από την στιγμή που ο κόμβος s_i λαμβάνει ένα πακέτο μέχρι το σημείο που το πακέτο αυτό λαμβάνεται από τον κόμβο. Εάν ένας κόμβος δεν πραγματοποιήσει συνάθροιση δεδομένων τότε το χρονικό διάστημα αυτό είναι ίσο με $t_i^{(R)} + t_i^{(F)}$, ενώ αν πραγματοποιήσει το t_i ορίζεται ως $t_i^{(R)} + t_i^{(F)} + t_i^{(P)}$, $i \geq 1$. Οπότε έχουμε:

$$t_i = \begin{cases} t_i^{(R)} + t_i^{(F)} + t_i^{(P)}, & \text{με συνάθροιση δεδομένων} \\ t_i^{(F)} + t_i^{(P)}, & \text{δίχως συνάθροιση δεδομένων} \end{cases} \quad (1)$$

Με βάση την υπόθεση πως ένας κόμβος πραγματοποιεί συνάθροιση δεδομένων με πιθανότητα γ , και λαμβάνοντας την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας έχουμε:

$$f_i(t) = f_i(t | \text{με συνάθροιση})\gamma + f_i(t | \text{δίχως συνάθροιση})(1 - \gamma) \quad (2)$$

Θεωρούμε πως οι παραπάνω χρονικές περιόδους είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και λαμβάνοντας τον μετασχηματισμό Laplace $F_i^{(R)}(t)$, $F_i^{(F)}(t)$ και $F_i^{(P)}(t)$ των $f_i^{(R)}(t)$, $f_i^{(F)}(t)$ και $f_i^{(P)}(t)$ αντίστοιχα έχουμε:

$$F_i(s) = E[e^{-st}] = \int_0^{\infty} f_i(t)e^{-st} dt = F_i^{(F)}(s)F_i^{(P)}(s)[\gamma F_i^{(R)}(s) + (1-\gamma)] \quad (3)$$

Στην παρακάτω ανάλυση θεωρούμε ότι δεν απορρίπτονται πακέτα λόγω του χρονικού περιορισμού και υπολογίζουμε την κατανομή της μέσης καθυστέρησης, ώστε να υπολογίσουμε την πιθανότητα επιτυχίας P_{succ} ενός πακέτου να φτάσει στο κέντρο συλλογής εντός του χρονικού περιορισμού D . Εν συνεχεία, η πιθανότητα ένα πακέτο να απορριφθεί λόγω μη έγκαιρης παράδοσης του στο κέντρο συλλογής μπορεί να υπολογιστεί από $(1 - P_{succ})$.

Η μέση καθυστέρηση ορίζεται ως $T_L = \sum_{i=1}^L t_i$ και η αντίστοιχη συνάρτηση πιθανότητας ως $f_{T_L}(t)$, όπου με την τυχαία μεταβλητή L ορίζονται τα βήματα από τον κόμβο πηγή μέχρι το κέντρο συλλογής. Ο μετασχηματισμός Laplace δίνεται από την:

$$F_{T_L} = E[e^{-s(t_1+t_2+\dots+t_L)}] = \sum_{l=1}^{\infty} e[e^{-sT_L} | L=l] \Pr(L=l) = \sum_{l=1}^{\infty} p_L(l) \prod_{i=1}^l F_i(s) \quad (4)$$

όπου $p_L(l)$ είναι η συνάρτηση μάζας πιθανότητας (probability mass function) του L . Η pdf του T_L μπορεί να ανακτηθεί εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace της F_{T_L} :

$$f_{T_L}(t) = L^{-1}\{F_{T_L}(s)\} = \sum_{l=1}^{\infty} p_L(l) L^{-1}\left\{\prod_{i=1}^l F_i(s)\right\}, \quad (5)$$

Γνωρίζοντας τώρα την $f_{T_L}(t)$, η πιθανότητα επιτυχημένης παράδοσης P_{succ} μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$P_{succ} = P[T_L \leq D] = \int_0^D f_{T_L}(t) dt \quad (6)$$

Η σχέση (6) μπορεί να υπολογιστεί όταν δίνονται οι κατανομές των $t_i^{(R)}$, $t_i^{(F)}$ και $t_i^{(P)}$. Καθώς όμως, πρακτικά είναι δύσκολο να υπολογιστεί αναλυτική έκφραση για το P_{succ} , καθώς η κατανομή του $t_i^{(F)}$ είναι άγνωστη, χρησιμοποιούμε ένα πιθανοτικό μοντέλο για να βρούμε ένα κάτω όριο στην πιθανότητα επιτυχίας P_{succ} .

3.2.1 ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΚΑΤΩ ΟΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΤΥΧΗΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

$$P_{succ}$$

Η από σε άκρο καθυστέρηση για ένα πακέτο το οποίο μετά από l βήματα φτάνει στο κέντρο συλλογής εντός του χρονικού περιορισμού, μπορεί να αναπαρασταθεί από την παρακάτω σχέση

$$T_l = \sum_{i=1}^l t_i^{(R)} + \sum_{i=1}^l t_i^{(F)} + \sum_{i=1}^l t_i^{(P)} \leq D \quad (7)$$

Εν συνεχεία, στο $t_i^{(F)}$ μπορεί να δοθεί ένα ανώτατο όριο με βάση το μεγαλύτερο σε μέγεθος πακέτο και του αντίστοιχου ρυθμού μετάδοσης στο δίκτυο αισθητήρων. Αντίστοιχα, για το $t_i^{(P)}$, μπορεί να φραχθεί από την ακτίνα του δικτύου και την μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ δύο κόμβων. Κατά συνέπεια, μπορούμε να ξαναγράψουμε τον χρονικό περιορισμό D ως εξής $D = D_r(l) + D_f(l) + D_p(l)$, όπου $D_r(l)$, $D_f(l)$ και $D_p(l)$ είναι τα άνω όρια για την καθυστέρηση στη συνάθροιση, τη μετάδοση και τη διάδοση στο μέσο των πακέτων, αντίστοιχα, για μήκος διαδρομής l βημάτων. Οπότε ο περιορισμός ο οποίος πρέπει να ικανοποιηθεί όσον αφορά στο χρόνο συνάθροισης εκφράζεται ως:

$$\sum_i^l t_i^{(R)} \leq D_r(l) \quad (8)$$

Η τυχαία μεταβλητή $t_i^{(P)}$ είναι συνάρτηση του τ και γ και η σχέση (8) δίνει το όριο στην χειρότερη περίπτωση υπό τον περιορισμό (7).

Κατά συνέπεια, το κάτω όριο για την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης p_{succ} ενός συναθροισμένου πακέτου, όταν η απόσταση από τον κόμβο στο κέντρο συλλογής είναι l βήματα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p_{succ} = P[T_L(t) \leq D | L = l] \geq P\left(\sum_{i=1}^l t_i^{(R)} \leq D_r(l)\right) \quad (9)$$

Η πιθανότητα επιτυχίας P_{succ} υπό τον περιορισμό (7) φράσσεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$P_{succ} = \sum_{l=1}^{L_{max}} p_L(l) p_{succ}(l) \geq \sum_{l=1}^{L_{max}} p_L(l) P\left(\sum_{i=1}^l t_i^{(R)} \leq D_r(l)\right) \quad (10)$$

όπου L_{max} είναι ο μέγιστος αριθμός βημάτων στο δίκτυο. Η παραπάνω σχέση δίνει το κάτω όριο της πιθανότητας επιτυχημένης μετάδοσης με αλλά και χωρίς την πραγματοποίηση συνάθροισης. Όταν $\gamma=0$, δηλαδή δεν πραγματοποιείται συνάθροιση σε κανέναν ενδιάμεσο κόμβο, τότε η πιθανότητα P_{succ} ανάγεται στην πιθανότητα ένα πακέτο να φτάσει στο κέντρο συλλογής εντός του χρονικού περιορισμού, με απλή προώθηση στους ενδιάμεσους κόμβους.

Σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο, όταν δεν πραγματοποιείται συνάθροιση δεδομένων στους ενδιάμεσους κόμβους έχουμε $t_i^{(R)} = 0$, ενώ αν πάντα πραγματοποιείται συνάθροιση, δηλαδή $\gamma=1$, έχουμε $t_i^{(R)} = \tau$. Αν l είναι τα βήματα που δηλώνουν την απόσταση από τον κόμβο στο κέντρο συλλογής τότε η μέγιστη καθυστέρηση ενός πακέτου λόγω συνάθροισης είναι $l*\tau$. Εάν ισχύει $l\tau \leq D_r(l)$ τότε ο χρονικός περιορισμός ικανοποιείται ακόμα και αν κάθε κόμβος πραγματοποιεί συνάθροιση και μπορούμε να έχουμε $p_{succ} = 1$. Αν, όμως, $l\tau \geq D_r(l)$, η από σε άκρο καθυστέρηση ενός πακέτου μπορεί να υπερβεί τον χρονικό περιορισμό. Ο μέγιστος αριθμός συναθροίσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν ώστε να ικανοποιείται ο χρονικός περιορισμός, δίνεται από την

$$C(l) = \left\lfloor \frac{D_r(l)}{\tau} \right\rfloor \quad (11)$$

Το παραπάνω μας δίνει ότι το κάτω όριο του P_{succ} είναι ίσο με την πιθανότητα ότι ένα πακέτο συναθροίζεται το πολύ $C(l)$ φορές κατά την μετάδοση του στο κέντρο συλλογής. Κατά συνέπεια το κάτω όριο για το $p_{succ}(l)$ δίνεται από:

$$p_{succ}(l) \geq p_{succ}^{(LB)}(l) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{C(l)} \gamma^k (1-\gamma)^{l-k}, & , C(l) < l \\ 1 & , C(l) \geq l \end{cases} \quad (12)$$

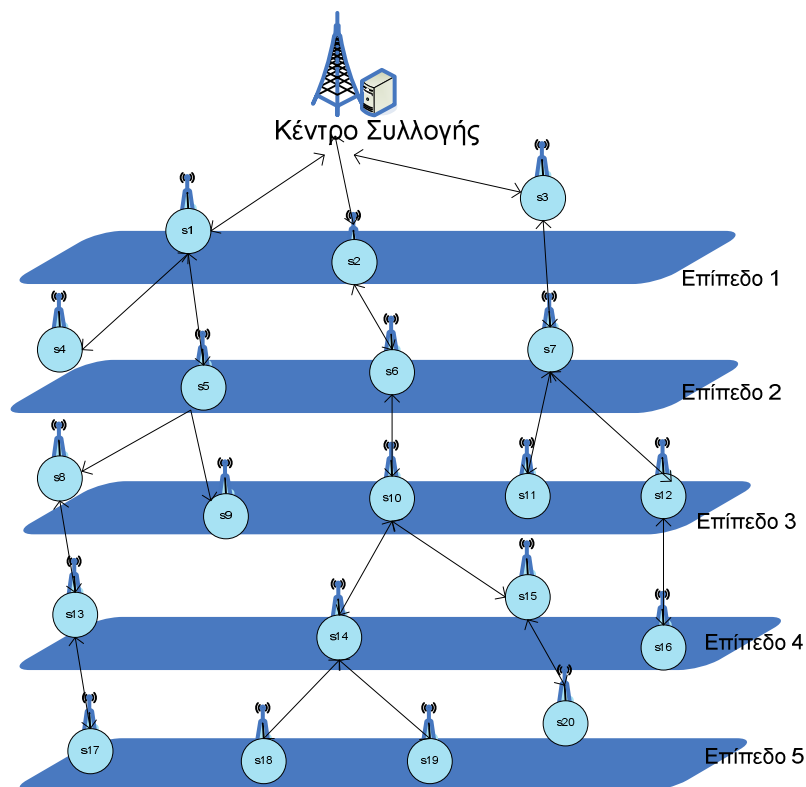
και αντίστοιχα η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης P_{succ} υπό τον χρονικό περιορισμό δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$P_{succ} \geq P_{succ}^{(LB)} = \sum_{l=1}^{L_{max}} p_L(l) p_{succ}^{(LB)}(l) \quad (13)$$

3.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΠΡΩΘΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Όπως έχει αναφερθεί, το πλαίσιο συνάθροισης το οποίο παρουσιάστηκε δύναται να εφαρμοστεί πάνω από οποιοδήποτε αλγόριθμο δρομολόγησης. Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος κατασκευής δέντρου ο οποίος χρησιμοποιείται για το υπόλοιπο της διατριβής ως το υποκείμενο πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για την συλλογή και προώθηση των μετρήσεων από τους κόμβους στο κέντρο συλλογής, δημιουργήσαμε ένα δέντρο συλλογής, όπου ο τελικός προορισμός αποτελεί και τη ρίζα του δέντρου ενώ όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι είναι τα παιδιά του. Με το δέντρο αυτό επιθυμούμε να οργανώσουμε λογικά τους αισθητήρες σε διαφορετικά επίπεδα τα οποία αντιπροσωπεύουν και την θέση τους στο δέντρο και κατά επέκταση τη σχετική απόσταση τους από το κέντρο συλλογής, όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα.



ΕΙΚΟΝΑ 9: Απεικόνιση των επιπέδων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων

Με τον τρόπο αυτό κάθε κόμβος μπορεί να εκτιμήσει τον απαιτούμενο χρόνο αποστολής ενός πακέτου στο κέντρο και άρα να υπολογίσει αν μπορεί να ικανοποιήσει τον χρονικό περιορισμό.

Η διαδικασία κατασκευής του δέντρου συλλογής εκκινείται από το κέντρο συλλογής το οποίο ευρυεκπέμπει (broadcast) ένα HELLO πακέτο. Ένα πακέτο – μήνυμα HELLO έχει τα εξής πεδία όπως περιγράφονται παρακάτω.

Το πεδίο **level** περιέχει το επίπεδο, αναφορικά με το δέντρο συλλογής, του κόμβου που στέλνει το μήνυμα. Επίσης, υπάρχει το πεδίο **isAck** το οποίο εκφράζει αν το μήνυμα είναι βασικό HELLO μήνυμα ή αν είναι μήνυμα αναγνώρισης / αποδοχής (ACK) το οποίο στέλνεται σαν απάντηση σε ένα βασικό HELLO μήνυμα. Τέλος, υπάρχει το πεδίο **helloCycleNum** το οποίο είναι ο αύξων αριθμός της εκάστοτε επανάληψης της HELLO διαδικασίας.

| | | |
|--------------|--------------|----------------------|
| Level | isACK | HelloCycleNum |
|--------------|--------------|----------------------|

ΕΙΚΟΝΑ 10: Δομή επικεφαλίδας HELLO

Όπως αναφέραμε, η διαδικασία κατασκευής του δέντρου συλλογής εκκινείται από το κέντρο συλλογής. Αυτό εκπέμπει ένα HELLO πακέτο το οποίο στο πεδίο **level** έχει την τιμή 0, που είναι το επίπεδο που βρίσκεται το κέντρο συλλογής. Οι κόμβοι που λαμβάνουν το πακέτο αυτό θεωρούν πως, από εδώ και πέρα, ο κόμβος αυτός είναι ο πατέρας τους στο δέντρο και προσδιορίζουν το δικό τους επίπεδο (επίπεδο του πατέρα + 1). Έτσι, στέλνουν ένα πακέτο ACK πίσω στο κέντρο συλλογής. Το κέντρο συλλογής για κάθε ένα πακέτο ACK που λαμβάνει, προσθέτει έναν νέο κόμβο-αισθητήρα στη λίστα που περιέχει τα παιδιά του. Στη συνέχεια οι κόμβοι που μόλις έστειλαν τα ACK πακέτα στην πηγή, εκπέμπουν με τη σειρά τους ένα HELLO μήνυμα με το επίπεδό τους, για να αναζητήσουν τα δικά τους παιδιά στο δέντρο. Οι κόμβοι που λαμβάνουν το μήνυμα αυτό και δεν έχουν ακόμα προσδιορίσει το επίπεδο τους (γιατί το πακέτο αυτό μπορεί να ληφθεί και από κόμβους που προσδιόρισαν τον πατέρα τους όταν το κέντρο συλλογής έστειλε το αρχικό HELLO μήνυμα) θεωρούν τον κόμβο αποστολής ως πατέρα τους. Στέλνουν συνεπώς ένα μήνυμα ACK στον κόμβο αυτό, και αυτός με τη σειρά του ενημερώνει τη λίστα με τα παιδιά του. Έπειτα, οι κόμβοι που μόλις προσδιόρισαν το επίπεδό τους προχωρούν στην εκπομπή ενός HELLO μηνύματος που περιέχει την πληροφορία αυτή. Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται έως ότου όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο προσδιορίσουν το επίπεδό τους, την ταυτότητα του πατέρα τους και τις ταυτότητες των παιδιών τους. Συνεπώς με αυτό τον τρόπο κατασκευάζεται ένα δέντρο που καλύπτει ολόκληρο το δίκτυο. Με βάση το δέντρο αυτό γίνεται η δρομολόγηση των δεδομένων, δηλαδή κάθε φορά που κάποιος κόμβος έχει δεδομένα προς αποστολή, τα στέλνει στον κόμβο-πατέρα του. Η παραπάνω περιγραφείσα αλγοριθμική διαδικασία απεικονίζεται στον Πίνακα Πίνακας 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ HELLO ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΕΝΤΡΟΥ ΣΥΛΛΟΓΗΣ

Algorithm Hello Process – Neighbour Discovery and Tree Construction

Each time the algorithm runs the value of HelloCycleNum increments by one

```
int myLevel(i), i=1,...N, # of sensor nodes
```

```
int myFather(i)
```

```
int CycleNum
```

```
int HelloCycleNum
```

```
myChildrenList = []
```

```
While node(i) received HELLO packet
```

```
    If (isAck == 1) && (CycleNum == HelloCycleNum),
```

```
    // received ACK in current cycle, ACKs from different cycles are discarded
```

```
        Add node to myChildrenList [node_ID, HelloCycleNum]
```

```
    else
```

```
        if (isACK != 1) && (CycleNum != HelloCycleNum) && (node(i) != sink)
```

```
        //received new Hello packet
```

```
            myLevel(i) = level + 1
```

```
            myFather = node_ID
```

```
            cycleNum = HelloCycleNum
```

```
            send HELLO_ACK to myFather
```

```
            broadcast HELLO message
```

Δεδομένου ότι είναι πολύ πιθανό κάποιος κόμβος να τεθεί εκτός λειτουργίας, είτε λόγω εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων του είτε για κάποιο άλλο λόγο, είναι απαραίτητο να εξασφαλίσουμε πως το δίκτυο θα εξακολουθήσει να επιτελεί το έργο που του έχει ανατεθεί, ακόμα και μετά την αποτυχία ενός κόμβου. Είναι προφανές πως όταν αποτύχει κάποιος κόμβος το δέντρο συλλογής που έχει δημιουργηθεί και συμπεριλαμβάνει τον κόμβο αυτό, δεν επιτρέπει την άφιξη δεδομένων από όλους τους κόμβους στο κέντρο συλλογής, εφόσον κάποια μονοπάτια στο δέντρο έχουν διακοπεί. Για να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου, η HELLO διαδικασία επαναλαμβάνεται περιοδικά, ώστε να ανακατασκευάζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα το δέντρο συλλογής και να προσαρμόζεται, έτσι, στις

μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου. Συνεπώς, το κέντρο συλλογής εκκινεί περιοδικά τη HELLO διαδικασία, και το πεδίο helloCycleNum των πακέτων HELLO προσδιορίζει μοναδικά την επανάληψη στα πλαίσια της οποίας έχει αποσταλεί το εκάστοτε πακέτο. Το πεδίο αυτό πρέπει να έχει έγκυρη τιμή τόσο για τα βασικά HELLO πακέτα, όσο και για τα πακέτα τύπου ACK. Το κέντρο συλλογής, είναι ο κόμβος που εισάγει στο δίκτυο την πληροφορία για τον αύξοντα αριθμό της επανάληψης, εφόσον κάθε φορά που εκκινεί τη διαδικασία μέσω ενός πακέτου HELLO, το πακέτο αυτό έχει στο πεδίο helloCycleNum τον αριθμό της νέας επανάληψης.

3.3.1 ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ HELLO

Η επιθυμία για χρήση ενός σχεδιαστικά και λειτουργικά απλού αλλά και με χαμηλή πολυπλοκότητα αλγορίθμου, μας οδήγησε στην δημιουργία του αλγορίθμου HELLO. Πράγματι, δοθέντος N κόμβων στο δίκτυο τα μηνύματα τα οποία ανταλλάσσονται είναι:

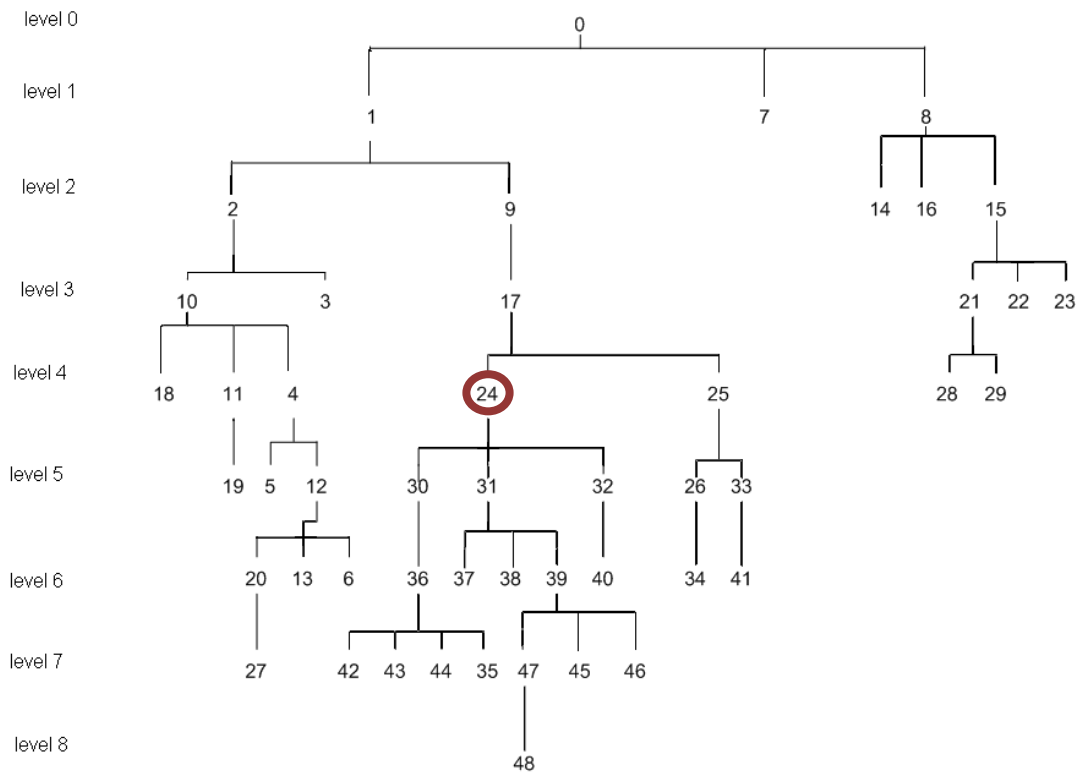
- N πακέτα ευρυεκπομπής HELLO. Κάθε κόμβος μόλις προσδιορίσει τον πατέρα του στο δίκτυο, εκπέμπει μήνυμα εύρεσης των παιδιών του
- $N - 1$ πακέτα αποδοχής – ACK. Κάθε κόμβος με την λήψη ενός πακέτου HELLO από έναν γείτονα του, αν δεν έχει προσδιορίσει το επίπεδο του, στέλνει ACK πακέτο με το οποίο αποδέχεται τον κόμβο αποστολέα ως πατέρα του στο δέντρο συλλογής. Οπότε θα αποσταλούν το πολύ $N - 1$ πακέτα ACK (η ρίζα του δέντρου δεν στέλνει ACK).

Τελικά, έχουμε για την χειρότερη περίπτωση $2N - 1$ πακέτα να ανταλλάσσονται στο δίκτυο κατά την φάση δημιουργίας του δέντρου συλλογής, οπότε και συνολική πολυπλοκότητα $O(N)$. Με μέγεθος πακέτου 6 Bytes, ακόμα και σε δίκτυα περιορισμού εύρους ζώνης όπως είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν επιβαρύνουν το δίκτυο καταναλώνοντας τους ήδη περιορισμένους πόρους του.

3.3.2 ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΔΕΝΤΡΟΥ ΣΥΛΛΟΓΗΣ

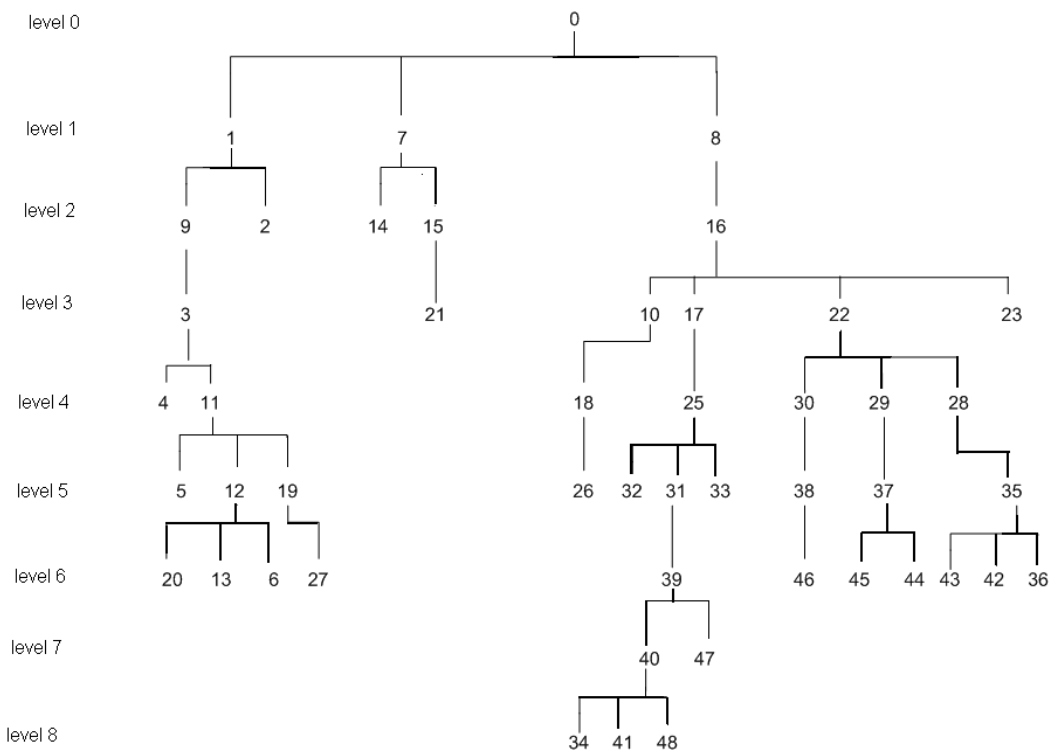
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ανακατασκευής του δέντρου συλλογής μετά από την πτώση κάποιου κόμβου (κόμβος 24) λόγω εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων του.

Μετά την πρώτη εκτέλεση της διαδικασίας HELLO το δέντρο που δημιουργείται είναι το παρακάτω:



ΕΙΚΟΝΑ 11: Δέντρο συλλογής πριν την πτώση του κόμβου 24

Στη συνέχεια μηδενίζεται η ενέργεια του κόμβου 24, και το νέο δέντρο που κατασκευάζεται όταν επαναληφθεί η διαδικασία HELLO είναι το παρακάτω.



ΕΙΚΟΝΑ 12: Δέντρο συλλογής μετά την πτώση του κόμβου 24

Παρατηρούμε πως το δίκτυο με επιτυχία δημιούργησε ένα νέο δέντρο συλλογής ώστε να συνεχιστεί απρόσκοπτα η λειτουργία του δικτύου, ωστόσο η δομή του δέντρου έχει αλλάξει (μετακινήσεις παιδιών σε νέα υπο-δέντρα με νέο πατέρα). Οι αλλαγές στη δομή του δέντρου οφείλονται διότι ταυτόχρονα με τη διαδικασία HELLO λαμβάνει χώρα και η μεταφορά μέσω του δικτύου πακέτων μετρήσεων με αποτέλεσμα η επιπλέον κίνηση στο δίκτυο να εισάγει τυχαίες καθυστερήσεις κατά την κυκλοφορία των πακέτων HELLO στο δίκτυο. Έτσι, μπορεί να σχηματίζονται διαφορετικά δέντρα στις διάφορες επαναλήψεις της HELLO διαδικασίας.

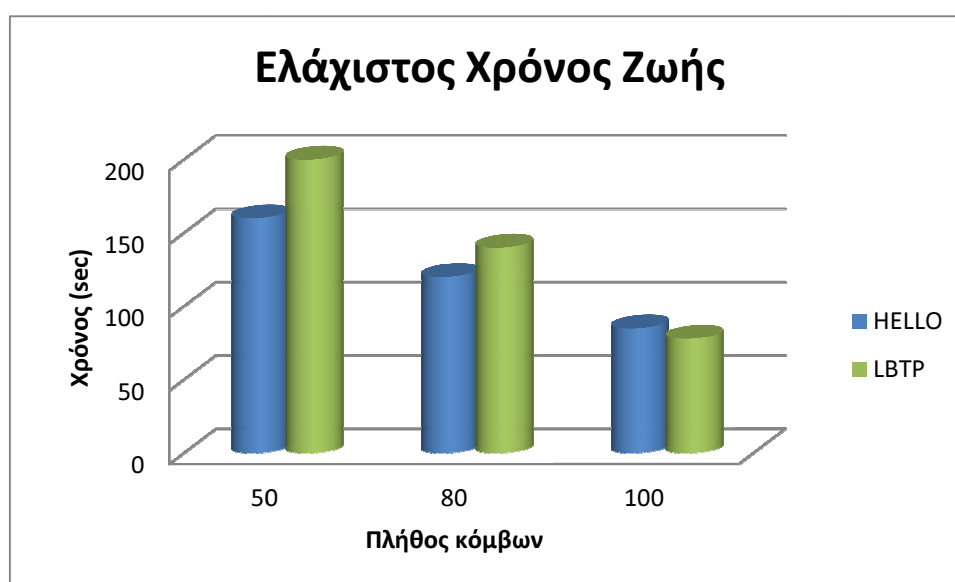
3.3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΔΕΝΤΡΟΥ

Το δέντρο συλλογής το οποίο σχηματίζεται με την εφαρμογή του αλγορίθμου HELLO εμφανίζει τυχαιότητα τόσο στο βάθος του όσο και στο πλήθος των παιδιών κάθε κόμβου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κόμβοι οι οποίοι έχουν περισσότερα παιδιά να καταναλώνουν τα αποθέματα ενέργειας τους γρηγορότερα από κόμβους – φύλλα και κόμβους με μικρό αριθμό παιδιών [71][72].

Για να βελτιώσουμε την ενεργειακή απόδοση του αλγορίθμου μας, υιοθετούμε τον αλγόριθμο LBTP (Load Balanced Tree Protocol) ο οποίος περιγράφεται στο [72] με σκοπό να κατασκευάσουμε ένα ισοσταθμισμένο δέντρο, δηλαδή ένα δέντρο του οποίου τα υπο-δέντρα

θα έχουν τον ίδιο αριθμό παιδιών και επιπλέον, όταν η ενέργεια ενός κόμβου πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, ο κόμβος αυτός μετατρέπεται σε κόμβο φύλλο στο δέντρο ώστε να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια. Η λειτουργία του αλγορίθμου όπως αυτή προδιαγράφεται στο [72] σχηματίζει ένα δέντρο συλλογής με τρόπο παρόμοιο με τον δικό μας. Στη συνέχεια, το δέντρο αυτό με μια σειρά ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των γειτονικών κόμβων μετασχηματίζεται σε ένα ισοσταθμισμένο δέντρο.

Για να συγκρίνουμε την επίδοση των δύο αλγορίθμων κατασκευής δέντρου, του HELLO και του LBTP πραγματοποιήσαμε σειρά μετρήσεων στο Network Simulator 2 (NS2 [73]) όπου οι δύο αλγόριθμοι αξιολογούνται όσον αφορά στο χρόνο ζωής του δικτύου (μέχρι ο πρώτος κόμβος να καταναλώσει όλη την ενέργεια του) και στο πλήθος των μηνυμάτων τα οποία ανταλλάσσονται συναρτήσει του πλήθους των κόμβων στο δίκτυο.

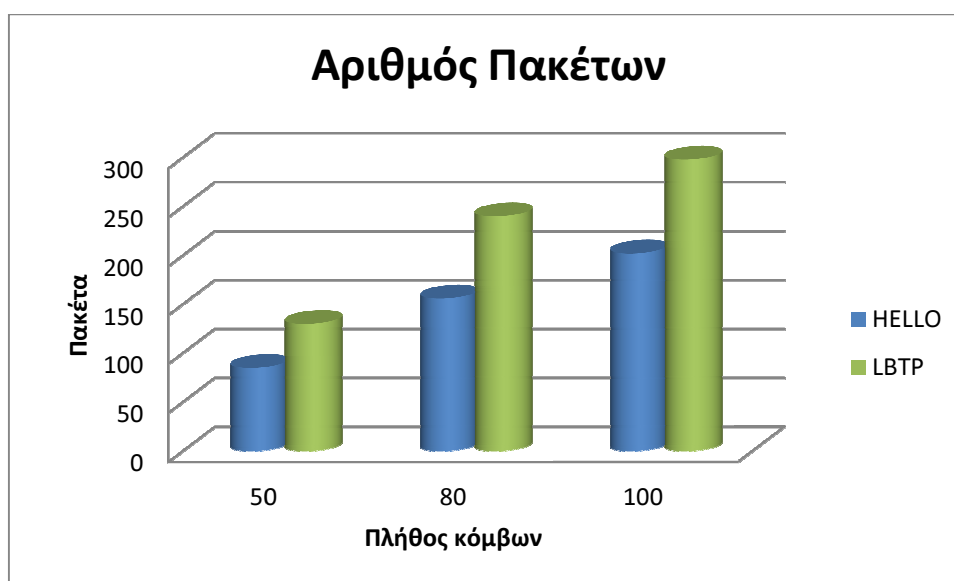


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: Ελάχιστος χρόνος ζωή του δικτύου για τις μεθόδους HELLO και LBTP

Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τις μεθόδους HELLO και LBTP όσο αφορά τον ελάχιστο χρόνο ζωής του δικτύου, δηλαδή πότε θα εξαντλήσει την ενέργεια του ο πρώτος κόμβος στο δίκτυο. Οι κόμβοι έχουν αρχική ενέργεια 5 Joules, τιμή πολύ μικρή σε σύγκριση με τις πραγματικές ενεργειακές δυνατότητες των μπαταριών που χρησιμοποιούνται ως πηγή ενέργειας στους ασύρματους κόμβους αισθητήρων [74], με σκοπό να επιταχύνουμε την εξάντληση τους. Επιπλέον, οι κόμβοι καταναλώνουν ενέργεια κάθε φορά που λαμβάνουν και μεταδίδουν ένα πακέτο, σύμφωνα με μοντέλο ενέργειας του Heinzelman et al. [26]. Παρατηρούμε ότι για μικρό αριθμό κόμβων στο δίκτυο η μέθοδος LBTP παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα καθώς επιτυγχάνει την αύξηση της διάρκειας ζωής του

δικτύου, ενώ καθώς το πλήθος των κόμβων αυξάνεται οι δύο μέθοδοι επιτυγχάνουν παρόμοια αποτελέσματα. Ειδικότερα για την περίπτωση των 100 κόμβων η μέθοδος LBTP εμφανίζει χειρότερη επίδοση από τον δικό μας αλγόριθμο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων στο δίκτυο περισσότερα μηνύματα ανταλλάσσονται για την κατασκευή και την συντήρηση του δέντρου υπό τη λειτουργία του LBTP, τα οποία προκαλούν συμφόρηση στο δίκτυο. Επιπλέον, τα πακέτα μηνυμάτων τα οποία ανταλλάσσονται κατά τον αλγόριθμο LBTP είναι μεγαλύτερου μεγέθους (20 Bytes σε σύγκριση με τα 6 Bytes της μεθόδου HELLO) τα οποία συνεισφέρουν στην μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους για την αποστολή και την λήψη τους⁴.

Συγκεκριμένα, στο ακόλουθο Διάγραμμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το πλήθος των πακέτων τα οποία ανταλλάσσονται στο δίκτυο για την κατασκευή του δέντρου συλλογής. Όπως αναμένεται, η μέθοδος LBTP παράγει και χρησιμοποιεί περίπου 30% περισσότερα πακέτα για την κατασκευή του δέντρου, γεγονός το οποίο επιβαρύνει την κίνηση του δικτύου καθώς και την ενεργειακή δαπάνη των κόμβων.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: Πλήθος πακέτων τα οποία ανταλλάσσονται για την κατασκευή του δέντρου για τις μεθόδους HELLO και LBTP

Συμπερασματικά, η μέθοδος LBTP καθώς και άλλες παρόμοιες μέθοδοι οι οποίες δημιουργούν ισοσταθμισμένα δέντρα, επιτυγχάνουν καλύτερα ενεργειακά αποτελέσματα με κόστος όμως την αύξηση της πολυπλοκότητας καθώς και την αύξηση στις επεξεργαστικές και

⁴ Η ενέργεια η οποία καταναλώνεται για την αποστολή και την λήψη ενός πακέτου εξαρτάται από το μέγεθος του πακέτου, σύμφωνα με το μοντέλο ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε.

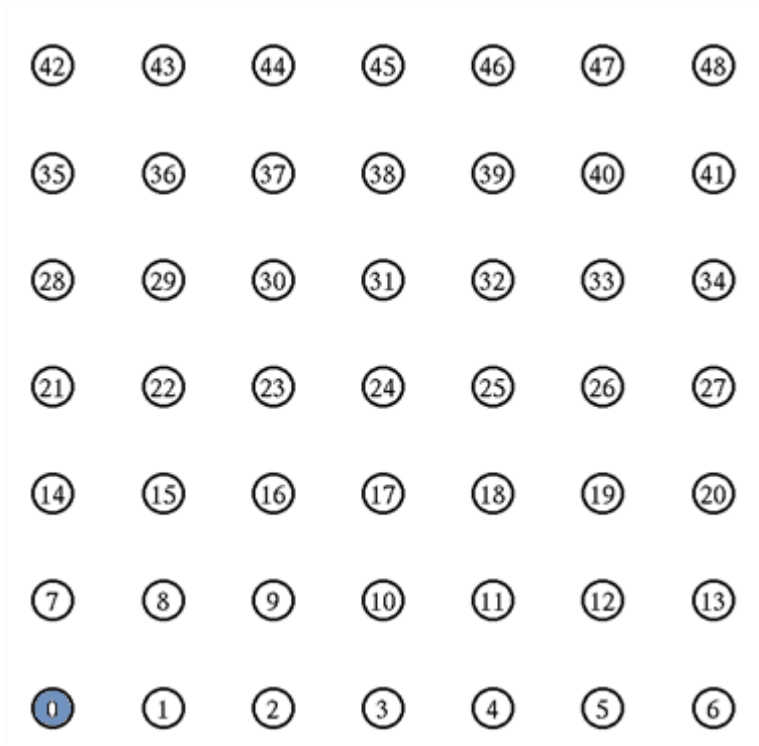
αποθηκευτικές δυνατότητες των κόμβων. Για την λειτουργία του ο αλγόριθμος LBTP απαιτεί την αποθήκευση μεγάλου όγκου πληροφορίας για κάθε κόμβο, όπως η λίστα των γειτόνων του, η λίστα των κόμβων πατέρων αλλά και υποψήφιων πατέρων των γειτόνων του, κ.α., η οποία την καθιστά σε ορισμένες περιπτώσεις μη αποδοτική. Για το λόγο αυτό, επιλέγουμε στη συνέχεια των μετρήσεων για την διδακτορική διατριβή την χρήση του αλγορίθμου HELLO για την κατασκευή του δέντρου συλλογής λόγω της χαμηλής πολυπλοκότητας και της απλής λειτουργίας του. Παρ' όλα αυτά, σημειώνεται ότι οποιοσδήποτε αλγόριθμος κατασκευής δέντρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθώς οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στη παρούσα διδακτορική διατριβή δρουν ανεξάρτητα από το υποκείμενο δίκτυο δρομολόγησης.

3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

3.4.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον του Network Simulator 2 (NS2) [73], υλοποιώντας πλήρως την στοίβα πρωτοκόλλων κατά το μοντέλο ISO. Κατά περίπτωση τα διάφορα αρχεία τροποποιήθηκαν και νέα αρχεία δημιουργήθηκαν για την μοντελοποίηση του συστήματος και την διεκπεραίωση των προσομοιώσεων.

Η τοπολογία του δικτύου αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει 49 κόμβους που είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα σε τετραγωνικό πλέγμα διαστάσεων $200 \times 200 \text{ m}^2$, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το κέντρο συλλογής είναι ο κόμβος με επιγραφή 0, και είναι τοποθετημένος στο κάτω αριστερό άκρο της τοπολογίας.



ΕΙΚΟΝΑ 13: Τοπολογία δικτύου αισθητήρων

Ως μοντέλο διάδοσης (propagation model) χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ελεύθερου χώρου (free space model) το οποίο αποτελεί ένα ρεαλιστικό μοντέλο για ασύρματα δίκτυα πολλαπλών βημάτων, κατά το οποίο η ισχύς μετάδοσης μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης. Το μοντέλο αυτό προβλέπει ότι η ισχύς λήψης σε απόσταση d από κόμβο που εκπέμπει με ισχύ P_t , θα είναι:

$$P = P_t \cdot \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda_w^2}{(4 \cdot \pi \cdot d)^2}$$

όπου G_t , G_r είναι τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα, και λ_w είναι το μήκος κύματος

Επίσης, θέσαμε το εύρος μετάδοσης ενός κόμβου (transmission range) ίσο με 48m. Δηλαδή, μόνο οι κόμβοι που βρίσκονται σε ακτίνα μικρότερη από 48m γύρω από ένα κόμβο, θα έχουν αποδεκτό σήμα λήψης από τον κόμβο αυτό και θα μπορούν να προχωρήσουν στην επεξεργασία του πακέτου που έλαβαν.

Επιπλέον θεωρούμε ότι:

- Όλοι οι κόμβοι διαθέτουν ουρές αναμονής άπειρης χωρητικότητας.

- Κατά την συνάθροιση των πακέτων εφαρμόζεται παράγοντας συνάθροισης (aggregation factor), οποίος εκφράζει το ποσοστό του μεγέθους του αθροίσματος των ωφέλιμων φορτίων, που θα αποτελέσει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του τελικού πακέτου ($\beta=0,8$.)

$$\beta = \frac{\text{μέγεθος συναθροισμένου πακέτου}}{\sum \text{μέγεθος πακέτου συνάθροισης}}$$

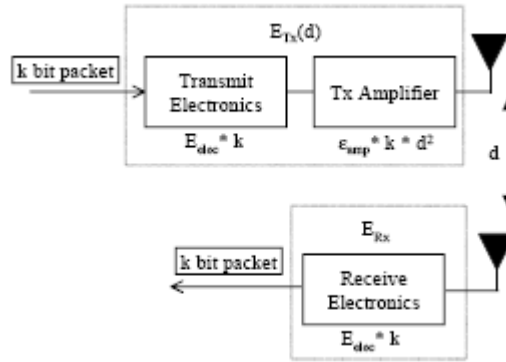
- Χρήση IEEE 802.11 ως πρωτόκολλο πρόσβασης στο MAC επίπεδο.
- Οι κόμβοι αισθητήρες γεννάνε πακέτα σύμφωνα με διαδικασία Poisson και ρυθμό λ pkts/sec.

Για κάθε μέτρηση πραγματοποιήθηκαν 10 εκτελέσεις (επαναλήψεις) του σεναρίου προσομοίωσης, αρχικοποιώντας με διαφορετικό τρόπο κάθε φορά τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Έτσι, η τιμή που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο οποιουδήποτε από τα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν, είναι η μέση τιμή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις 10 αυτές επαναλήψεις.

Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν τρεις μετρήσιμοι δείκτες απόδοσης; η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης, η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση και η συνολική κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων. Η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ορίζεται ως το ποσοστό των πακέτων τα οποία έφτασαν στο κέντρο συλλογής εντός του χρονικού περιορισμού D προς τα συνολικά πακέτα που γεννήθηκαν στους κόμβους, η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση ορίζεται ως ο μέσος χρόνος που δαπανούν τα πακέτα στο δίκτυο από τη στιγμή της γέννησης τους ως τη λήψη τους από το κέντρο συλλογής και συνολική κατανάλωση ενέργειας μετράται επί του συνόλου των κόμβων του δικτύου. Κάθε κόμβος έχει ορισμένη αρχική ενέργεια η οποία μειώνεται κάθε φορά που πραγματοποιεί μια μέτρηση, μια αποστολή ή λήψη πακέτου, όπως ορίζεται από το παρακάτω μοντέλο ενέργειας.

Μοντέλο Ενέργειας

Το μοντέλο ενέργειας το οποίο χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στο μοντέλο που προτάθηκε από τους Heinzelman et al. [26] σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα.



ΕΙΚΟΝΑ 14: Ενέργεια μετάδοσης και λήψης

Κατανάλωση της ενέργειας ενός κόμβου, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αυτού, θεωρήθηκε ότι συμβαίνει στις παρακάτω τρεις περιπτώσεις:

1. Κατά τη λήψη μετρήσεων (*sensing*): Η ενέργεια που καταναλώνει ένας κόμβος κατά τη λήψη μίας μέτρησης είναι μία σταθερά, που ορίζεται από το χρήστη που παραμετροποιεί την εφαρμογή.
2. Κατά την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων: Η ενέργεια που δαπανά ένας κόμβος για την αποστολή ενός πακέτου δίνεται από τη σχέση

$$E_{Tx}(k, d) = e_{elec} \cdot k + e_{amp} \cdot k \cdot d^2 \quad (14)$$

όπου

e_{elec} : Η ενέργεια που καταναλώνεται στο κύκλωμα εκπομπής ή λήψης (χρησιμοποιήθηκε η τιμή 50 nJ/bit).

e_{amp} : Η ενέργεια που καταναλώνεται στον ενισχυτή εκπομπής ώστε να επιτευχθεί αποδεκτός σηματοθορυβικός λόγος (χρησιμοποιήθηκε η τιμή 100 pJ/bit/m²).

k : το μέγεθος του πακέτου σε bits

d : η ακτίνα μετάδοσης του κόμβου σε m

3. Κατά τη λήψη ενός πακέτου δεδομένων: Για τον υπολογισμό της ενέργειας που καταναλώνει ένας κόμβος όταν λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος

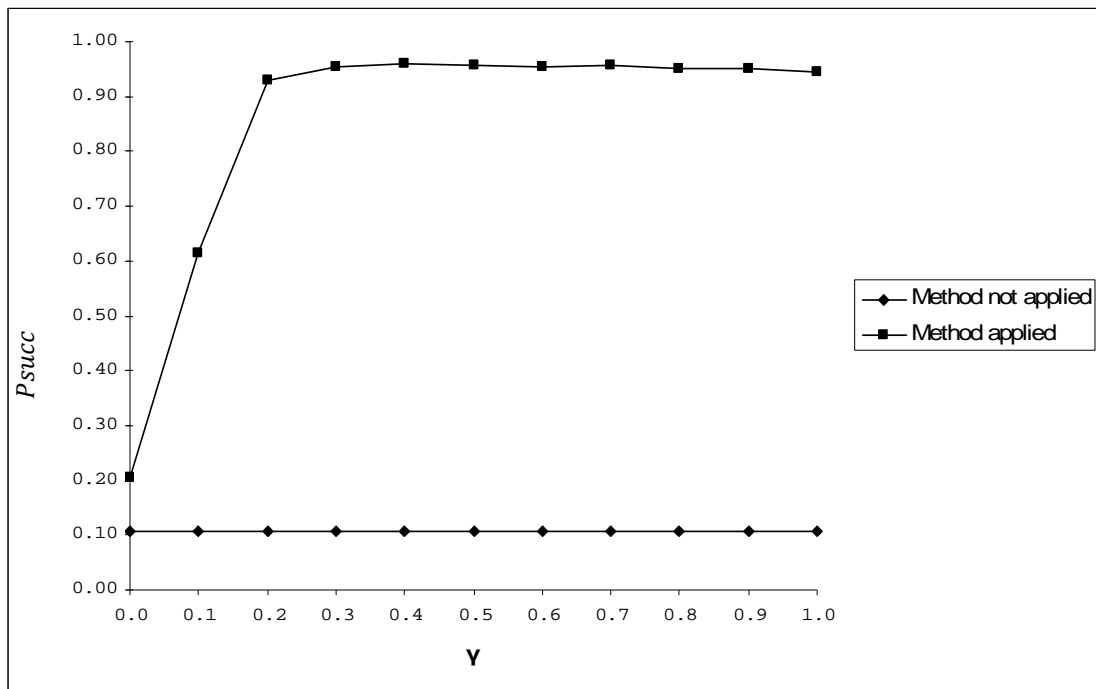
$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \cdot k \quad (15)$$

όπου τα μεγέθη E_{elec} και k ορίστηκαν παραπάνω.

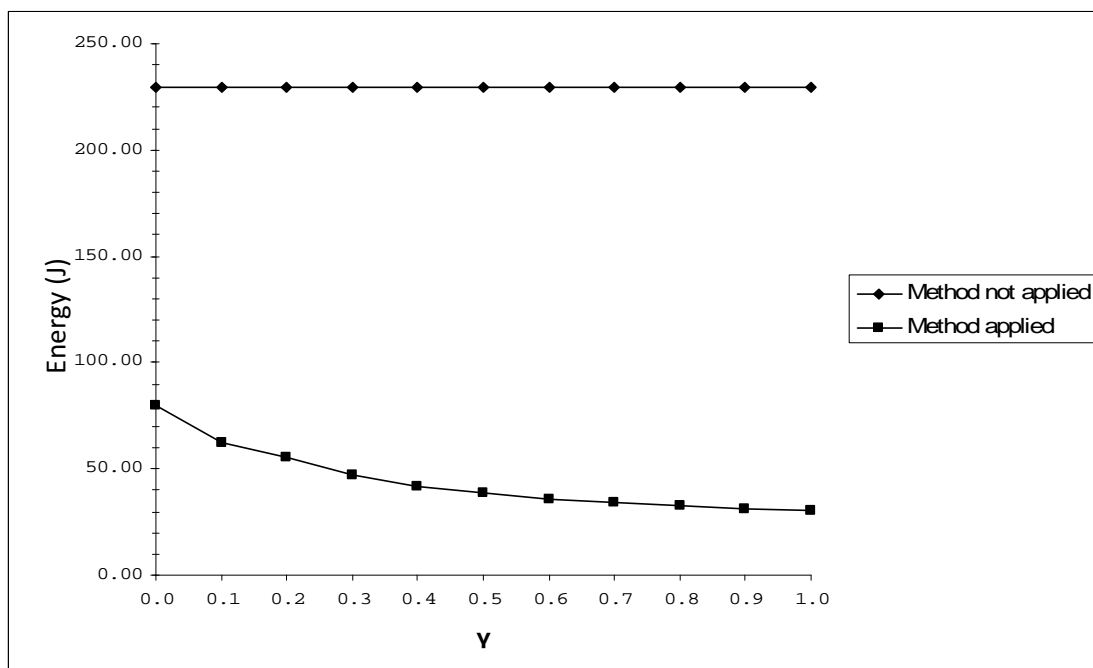
Όταν ξεκινήσει η προσομοίωση οι κόμβοι έχουν στη διάθεσή τους μία συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας. Κάθε φορά που εκτελούν μία από τις τρεις προαναφερθείσες λειτουργίες, η ενέργειά τους μειώνεται ώσπου να μηδενιστεί, οπότε και δεν μπορούν πλέον να λάβουν μετρήσεις ή να συμμετάσχουν στην αποστολή / λήψη πακέτων.

3.4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ γ ΣΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ & ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

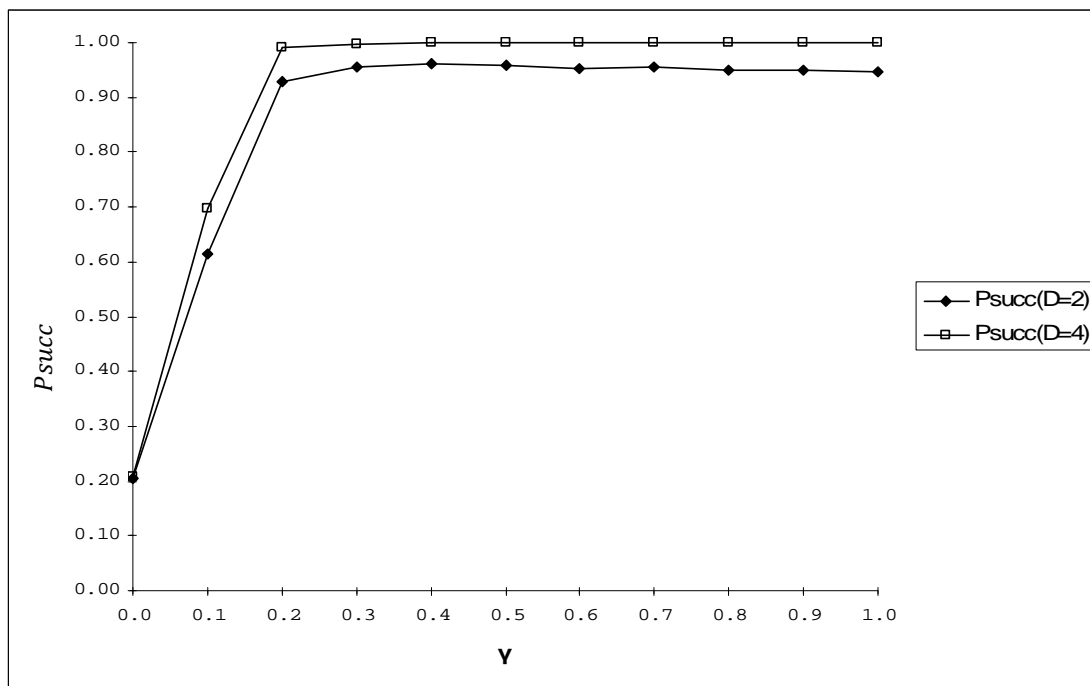
Στην παρούσα ενότητα μεταβάλλουμε την τιμή της πιθανότητας γ στο διάστημα $[0,1]$ με βήμα 0.1 και μετράμε την πιθανότητα επιτυχίας καθώς και την ποσότητα της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας από όλους τους κόμβους του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το χρονικό διάστημα συνάθροισης τ τέθηκε ίσο με 0.4 sec και η μέση τιμή της εκθετικής κατανομής του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων τέθηκε ίσο με 0.1 sec (θα το συμβολίζουμε ως $1/\lambda$ από εδώ και πέρα). Επίσης, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις και για την περίπτωση μη εφαρμογής της μεθόδου ώστε να αναδειχθούν τα πιθανά οφέλη από την εφαρμογή αυτής. Η περίπτωση για $\gamma = 0$ ορίζεται ως περίπτωση μη συνάθροισης αλλά υλοποίησης των υπολοίπων λειτουργιών της προτεινόμενης μεθοδολογίας (π.χ. έλεγχος για το αν μια μέτρηση ικανοποιεί τον χρονικό περιορισμό, και κατά συνέπεια απόρριψη του πακέτου στην αντίθετη περίπτωση). Ο λόγος που μελετάται αυτή η επιλογή είναι για να δείξουμε ότι ακόμα και χωρίς συνάθροιση πακέτων, ο έλεγχος και η απόρριψη "καθυστερημένων" πακέτων, επιφέρει ενεργειακά οφέλη διότι μειώνει το φορτίο στο δίκτυο. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για δύο τιμές του χρονικού περιορισμού : $D = 2 \text{ sec}$ και $D = 4 \text{ sec}$. Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.



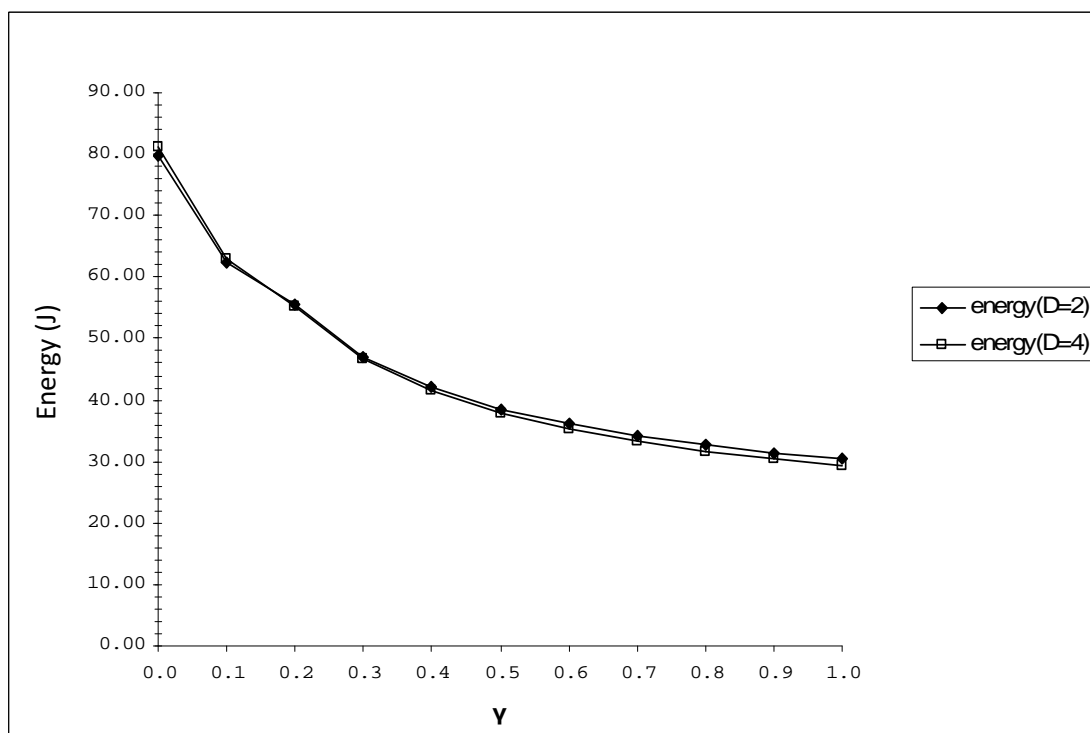
Διάγραμμα 3: Πιθανότητα επιτυχίας συναρτήσει του γ και πιθανότητα επιτυχίας για μη εφαρμογή της μεθόδου ($\tau = 0.4 \text{ sec}, D = 2 \text{ sec}, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του γ και για μη εφαρμογή της μεθόδου ($\tau = 0.4 \text{ sec}, D = 2 \text{ sec}, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: Πιθανότητα επιτυχίας συναρτήσει του γ για $D = 2 \text{ sec}$ και $D = 4 \text{ sec}$ ($\tau = 0.4 \text{ sec}, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του γ για $D = 2 \text{ sec}$ και $D = 4 \text{ sec}$ ($\tau = 0.4 \text{ sec}, 1/\lambda = 0.1 \text{ sec}$)

Παρατηρούμε (Διάγραμμα 3) ότι η πιθανότητα επιτυχίας αυξάνεται καθώς αυξάνεται το γ μέχρι κάποια τιμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μειώνεται ο χρόνος αναμονής ενός

πακέτου στην ουρά κατά την έξοδο του από τον κόμβο. Η μείωση του χρόνου αναμονής οφείλεται στο ότι ένα συναθροισμένο πακέτο περιέχει μία κοινή επικεφαλίδα για όλα τα συναθροισμένα πακέτα καθώς επιπλέον έχουμε χρησιμοποιήσει και κάποιο παράγοντα συνάθροισης, με αποτέλεσμα να μειώνεται και το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου ενός πακέτου. Επιπρόσθετα, για την μετάδοση ενός πακέτου από κάποιο κόμβο πρέπει πρώτα να καταληφθεί το μέσο από αυτόν. Αυτό απαιτεί κάποια διαδικασία που υπαγορεύεται από το πρωτόκολλο MAC επιπέδου και εισάγει κάποια επιπλέον χρονική καθυστέρηση. Συνεπώς, πραγματοποιώντας συνάθροιση των μετρήσεων μειώνεται το συνολικό πλήθος αλλά και μέγεθος των πακέτων που κυκλοφορούν στο δίκτυο με αποτέλεσμα να μειώνεται το συνολικό κόστος για την μετάδοση των πακέτων αυτών και έτσι να ελαττώνεται και ο συνολικός χρόνος αναμονής. Το γεγονός ότι η πιθανότητα επιτυχίας αυξάνεται μέχρι κάποια τιμή του γ οφείλεται στο ότι από κάποιο σημείο και μετά η κίνηση στο δίκτυο έχει μειωθεί αρκετά με αποτέλεσμα να μην επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση. Καθώς η πραγματοποίηση συνάθροισης δεν βασίζεται μόνο στην τιμή της πιθανότητας γ , αλλά και στο εάν προλαβαίνει ένα πακέτο να προστεθεί στο πακέτο συνάθροισης, αύξηση της πιθανότητας γ , δεν συνεπάγει περισσότερες συνάθροισης.

Η συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια στο δίκτυο μειώνεται καθώς αυξάνεται το γ (Διάγραμμα 4). Αυτό οφείλεται στο ότι καθώς αυξάνεται το γ οι κόμβοι λαμβάνουν και στέλνουν μικρότερο πλήθος bytes (μείωση συνολικών bytes επικεφαλίδων, χρήση παράγοντα συνάθροισης, μείωση συνολικού πλήθους πακέτων και άρα μείωση του πλήθους των πακέτων που ανταλλάσσονται για την κατάληψη του μέσου).

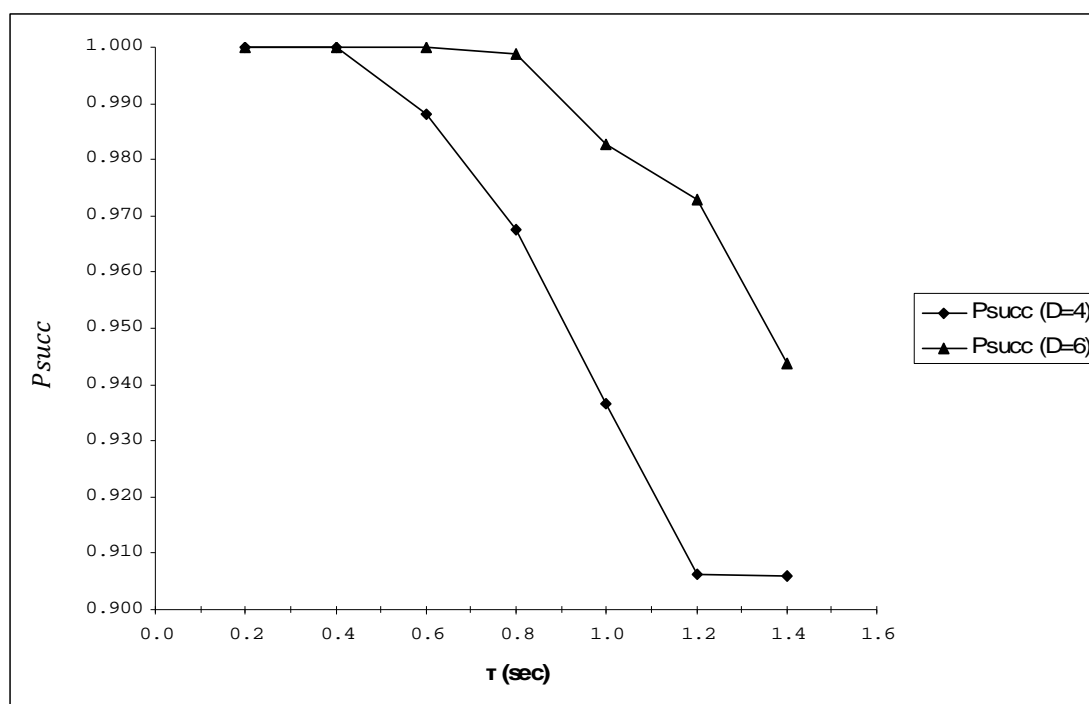
Η εφαρμογή της μεθόδου οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχίας και σε πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται η μέθοδος. Αυτό συμβαίνει ακόμα και στην περίπτωση που $\gamma = 0$ (δηλ. όταν πραγματοποιείται από ενδιάμεσους κόμβους απόρριψη των πακέτων που δεν θα προλάβουν να φτάσουν εγκαίρως στον προορισμό τους) και βελτιώνεται για μεγαλύτερες τιμές του γ , οπότε και πραγματοποιείται ουσιαστικά συνάθροιση.

Όπως ήταν αναμενόμενο, βλέπουμε πως για μεγαλύτερες τιμές του χρονικού περιορισμού D έχουμε μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχίας (Διάγραμμα 5). Η κατανάλωση ενέργειας είναι περίπου ίδια για τις περιπτώσεις που $D = 2sec$ και $D = 4sec$ (Διάγραμμα 6), ενώ παρατηρούμε πως έχουμε ελάχιστα μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την περίπτωση που $D=2sec$ και για μεγάλες τιμές της πιθανότητας γ . Αυτό οφείλεται στο ότι για

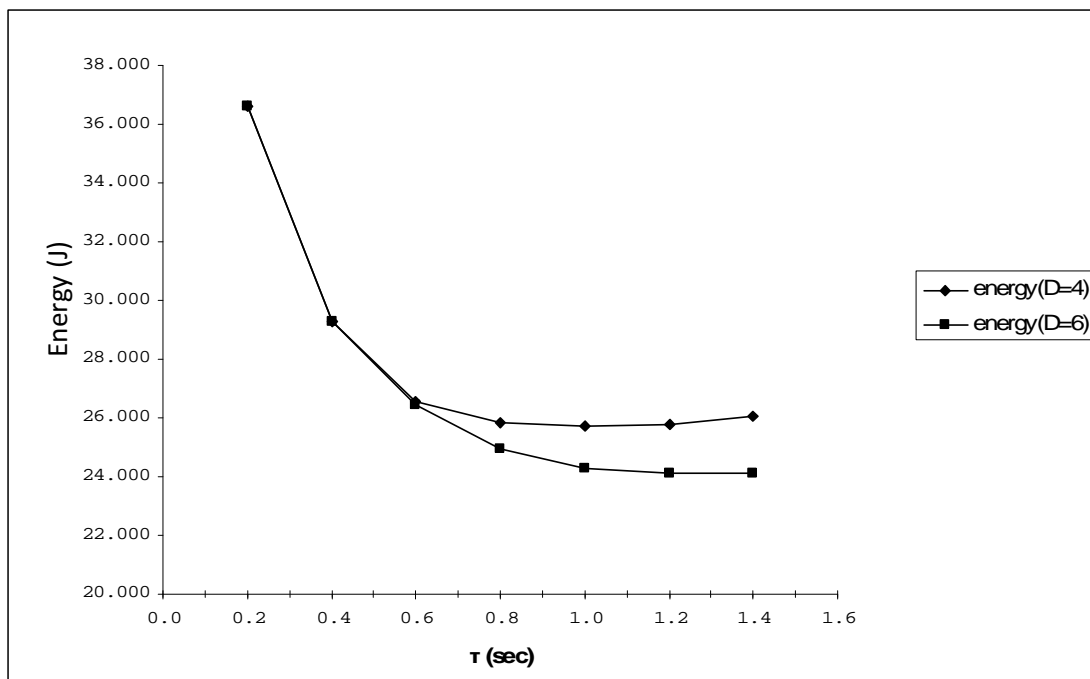
την περίπτωση που $D = 2\text{sec}$ θα αποφασίζεται λιγότερες φορές ότι υπάρχει χρόνος να πραγματοποιηθεί συνάθροιση, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

3.4.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ τ ΣΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ & ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην παρούσα ενότητα μεταβάλλουμε την τιμή του χρονικού διαστήματος τ στο διάστημα $[0.4, 1.2]$ με βήμα 0.2 sec και μετράμε την πιθανότητα επιτυχίας καθώς και την ποσότητα της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας από όλους τους κόμβους του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η πιθανότητα γ τέθηκε ίση με 1 και η μέση τιμή της εκθετικής κατανομής του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων τέθηκε ίσο με 0.1 sec . Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπου έχουν ληφθεί μετρήσεις για $D = 4\text{ sec}$ και $D = 6\text{ sec}$ (Διάγραμμα 7).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: Πιθανότητα επιτυχίας συναρτήσει του τ για $D = 4\text{sec}$ και $D = 6\text{sec}$ ($\gamma = 1,1/\lambda = 0.1\text{ sec}$)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του τ για $D = 4\text{sec}$ και $D = 6\text{sec}$ ($\gamma = 1,1/\lambda = 0.1\text{ sec}$)

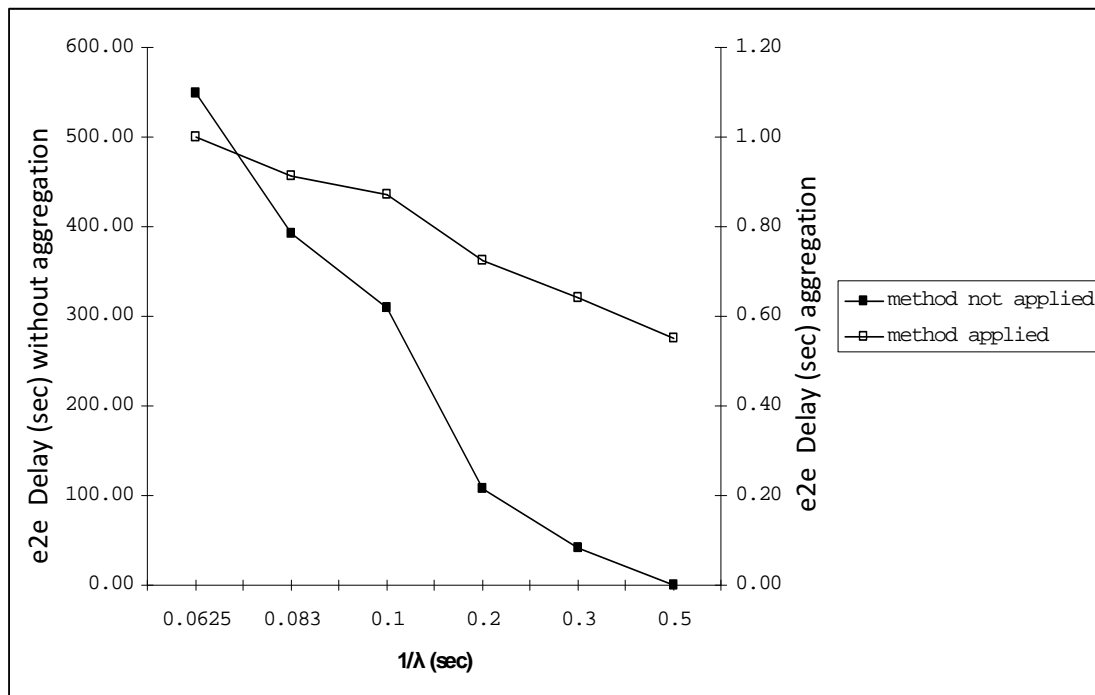
Για μεγαλύτερες τιμές του D έχουμε μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχίας όπως αναμενόταν, καθώς τα πακέτα έχουν μεγαλύτερο χρόνο στη διάθεσή τους μέχρι να φτάσουν στο κέντρο συλλογής. Η κατανάλωση ενέργειας για μικρότερη τιμή του D είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερες τιμές του τ (Διάγραμμα 8). Αυτό συμβαίνει γιατί για μικρότερο D πραγματοποιείται λιγότερες φορές συνάθροιση, λόγω του πιο μικρού χρονικού περιορισμού. Γενικά η πιθανότητα επιτυχίας παρουσιάζει τάση μείωσης καθώς αυξάνεται το τ , (αν και όπως παρατηρούμε έχει πολύ μικρό εύρος διακύμανσης). Αυτό οφείλεται στην αύξηση της χρονική διάρκειας της συνάθροισης στους κόμβους για μεγαλύτερες τιμές του τ . Έτσι, όταν ένα πακέτο φτάσει στο επίπεδο πριν το κέντρο συλλογής και εκτιμηθεί ότι προλαβαίνει να υποστεί συνάθροιση, έχει σημασία η τιμή του τ για το αν θα προλάβει να φτάσει τελικά εγκαίρως ή όχι, εφόσον το πακέτο θα πρέπει να περιμένει για κάποιο χρονικό διάστημα και στην ουρά του εξόδου του κόμβου.

Η καταναλισκόμενη ενέργεια μειώνεται καθώς αυξάνει το τ καθώς με αυτό τον τρόπο συναθροίζονται περισσότερα πακέτα σε ένα πακέτο συνάθροισης και έτσι γίνονται περισσότερο ορατά τα οφέλη της συνάθροισης από ενεργειακή άποψη. Επίσης, παρατηρούμε πως για $D = 4\text{sec}$ και για μεγαλύτερες τιμές του τ η καταναλισκόμενη ενέργεια αρχίζει να αυξάνεται. Αυτό προφανώς συμβαίνει, γιατί καθώς το τ παίρνει τιμές γύρω στο $1.2 - 1.4\text{sec}$

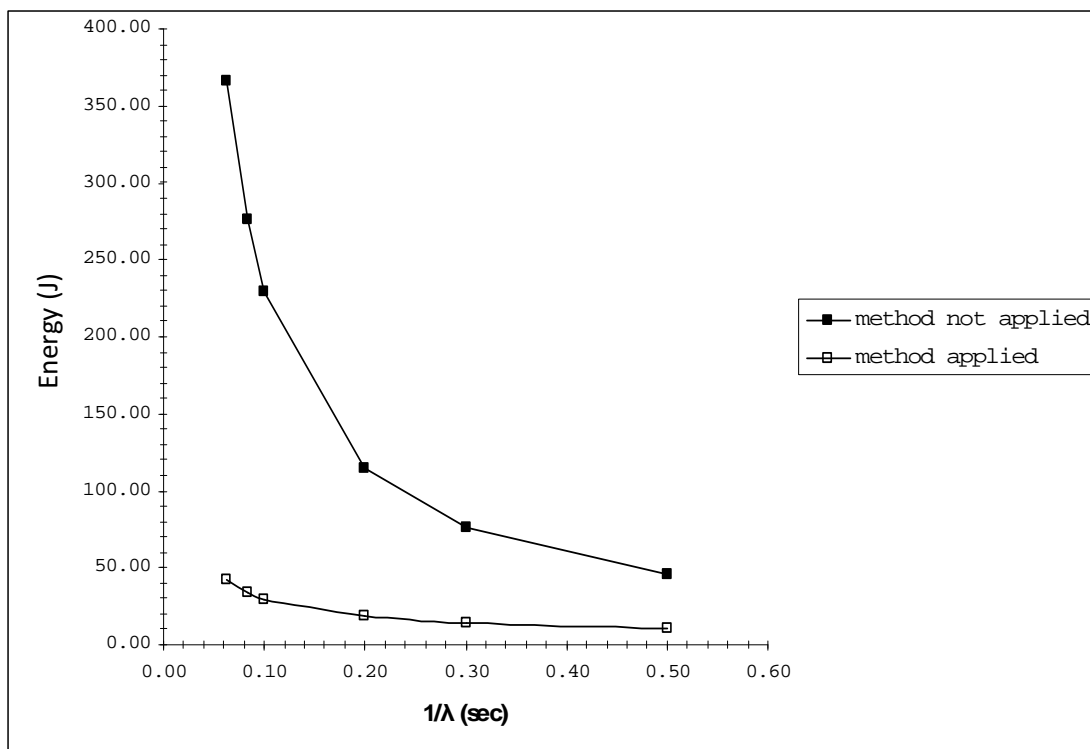
και δεδομένου ότι μία μέτρηση πρέπει να φτάσει στην πηγή μέσα σε 4sec, πραγματοποιείται λιγότερες φορές συνάθροιση.

3.4.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΓΕΝΝΗΣΕΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ & ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην παρούσα ενότητα μεταβάλλουμε την τιμή του χρονικού διαστήματος $1/\lambda$ στο διάστημα $[0.0625, 0.5]$ και μετράμε τη μέση καθυστέρηση των μετρήσεων καθώς και την ποσότητα της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας από όλους τους κόμβους του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για την περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου η πιθανότητα γ τέθηκε ίση με 1, το χρονικό διάστημα τ ίσο με 0.4 sec, ενώ πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και για την περίπτωση μη εφαρμογής της μεθόδου. Ο χρονικός περιορισμός D τέθηκε ίσος με μία πολύ μεγάλη τιμή ώστε να μην παρουσιάζονται απορρίψεις λόγω μη ικανοποίησης αυτού. Κατά συνέπεια, όλες οι μετρήσεις που παράγονται θα φτάνουν στο κέντρο συλλογής, εφόσον δεν θα απορρίπτονται στην πορεία τους προς αυτό. Απορρίψεις πακέτων, στις μετρήσεις αυτές, οφείλονται σε απόρριψη ενός πακέτου από το ασύρματο μέσο πρόσβασης (π.χ. λόγω συμφόρησης). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: Μέση καθυστέρηση για $1/\lambda$ για $D = \infty$ για εφαρμογή και μη της μεθόδου



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του φορτίου για $D = \infty$ για εφαρμογή και μη της μεθόδου

Παρατηρούμε ότι τόσο για την περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου όσο και για τη μη εφαρμογή αυτής, καθώς αυξάνεται το $1/\lambda$, δηλαδή καθώς μειώνεται η κίνηση στο δίκτυο, τόσο η μέση καθυστέρηση μίας μέτρησης (Διάγραμμα 9) όσο και η συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια μειώνονται (Διάγραμμα 10). Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί υπάρχουν λιγότερα πακέτα στο δίκτυο με αποτέλεσμα να γίνονται λιγότερες μεταδόσεις και λήψεις πακέτων. Η καταναλισκόμενη ενέργεια είναι πολύ μικρότερη για την περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου και για όλα τα φορτία σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται η μέθοδος.

Η μέση καθυστέρηση των μετρήσεων είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται η μέθοδος και για μεγάλα φορτία. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέθοδος μειώνει το χρόνο αναμονής και συνεπώς το χρόνο παραμονής των πακέτων στο δίκτυο. Εντούτοις, παρατηρούμε πως για πολύ μικρό φορτίο στο δίκτυο, η περίπτωση μη εφαρμογής της μεθόδου δίνει μικρότερη μέση καθυστέρηση των μετρήσεων, καθώς δεν υπάρχουν πολλά πακέτα στο δίκτυο (συμφόρηση), και τα πακέτα μπορούν να φτάσουν γρήγορα στο κέντρο συλλογής δίχως την εφαρμογή της μεθόδου. Αντίθετα, η εφαρμογή της μεθόδου εισάγει καθυστερήσεις λόγω του χρόνου για πραγματοποίηση συνάθροισης. Εντούτοις, και σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος εξακολουθεί να έχει σημαντικά ενεργειακά οφέλη.

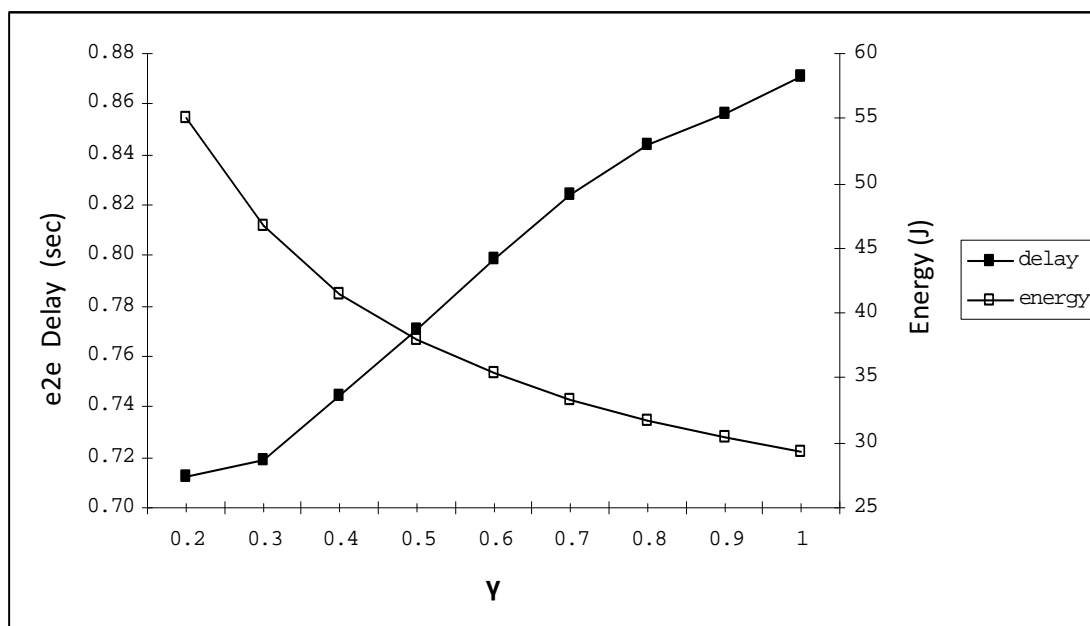
3.4.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ γ ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ & ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην παρούσα ενότητα μεταβάλλουμε την τιμή της πιθανότητας γ στο διάστημα $[0, 1]$ με βήμα 0.1 και μετράμε τη μέση καθυστέρηση των μετρήσεων καθώς και την ποσότητα της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας από όλους τους κόμβους του δικτύου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (Διάγραμμα 11). Το χρονικό διάστημα τ τέθηκε ίσο με 0.4 sec, ενώ ο χρονικός περιορισμός D τέθηκε ίσο με μια πολύ μεγάλη τιμή ώστε να μην παρουσιάζονται απορρίψεις λόγω μη ικανοποίησης του χρονικού περιορισμού. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΜΕΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ & ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ

| Πιθανότητα συνάθροισης γ | Μέση καθυστέρηση (sec) | Κατανάλωση ενέργειας (Joule) |
|---------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 0.0 | 309.81566 | 229.11124 |
| 0.1 | 16.24617 | 71.04515 |
| 0.2 | 0.711925 | 55.11301 |
| 0.3 | 0.718762 | 46.71126 |
| 0.4 | 0.744122 | 41.52679 |
| 0.5 | 0.770911 | 37.977067 |
| 0.6 | 0.798447 | 35.34211 |
| 0.7 | 0.823908 | 33.36819 |
| 0.8 | 0.844169 | 31.69734 |
| 0.9 | 0.856123 | 30.39444 |
| 1.0 | 0.871188 | 29.29141 |

Με την αύξηση της τιμής του γ επιβεβαιώνουμε ότι μειώνεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας. Αντίθετα η μέση καθυστέρηση των μετρήσεων δεν παρουσιάζει ομοιόμορφη συμπεριφορά. Για τιμές του γ από 0 – 0.2 παρατηρούμε μείωση της μέσης καθυστέρησης, πράγμα το οποίο οφείλεται στο ότι μειώνεται ο χρόνος αναμονής των πακέτων στις ουρές, ενώ από τιμές 0.2 – 1.0 η μέση καθυστέρηση αυξάνεται (χωρίς να παρουσιάζει βέβαια μεγάλο εύρος μεταβολής). Αυτό οφείλεται στο ότι από ένα σημείο και μετά η κίνηση στο δίκτυο έχει μειωθεί αρκετά και από εδώ και πέρα αρχίζουν να γίνονται ορατές οι επιδράσεις των πιο συχνών αναβολών μετάδοσης των πακέτων (λόγω συνάθροισης) στην τιμή της μέσης καθυστέρησης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: Μέση καθυστέρηση και καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει του $\gamma \in [0.2,1.0]$ για $D = \infty$ και $\tau = 0.4sec$

Στο Διάγραμμα 11 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης καθυστέρησης για τιμές της πιθανότητας συνάθροισης $\gamma \in [0.2,1]$ με σκοπό να δοθεί έμφαση στην αλληλεπίδραση μεταξύ καταναλισκόμενης ενέργειας και μέσης από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρησης συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ . Η μεταβλητή γ της πιθανότητας καθώς και η μεταβλητή τ της περιόδου συνάθροισης αποτελούν ρυθμιστικούς παράγοντες του συστήματος, όπου ανάλογα με την εφαρμογή, οι κατάλληλες τιμές μπορούν να επιλεγθούν για να επιτευχθεί η επιθυμητή αποδεκτή μέση καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας.

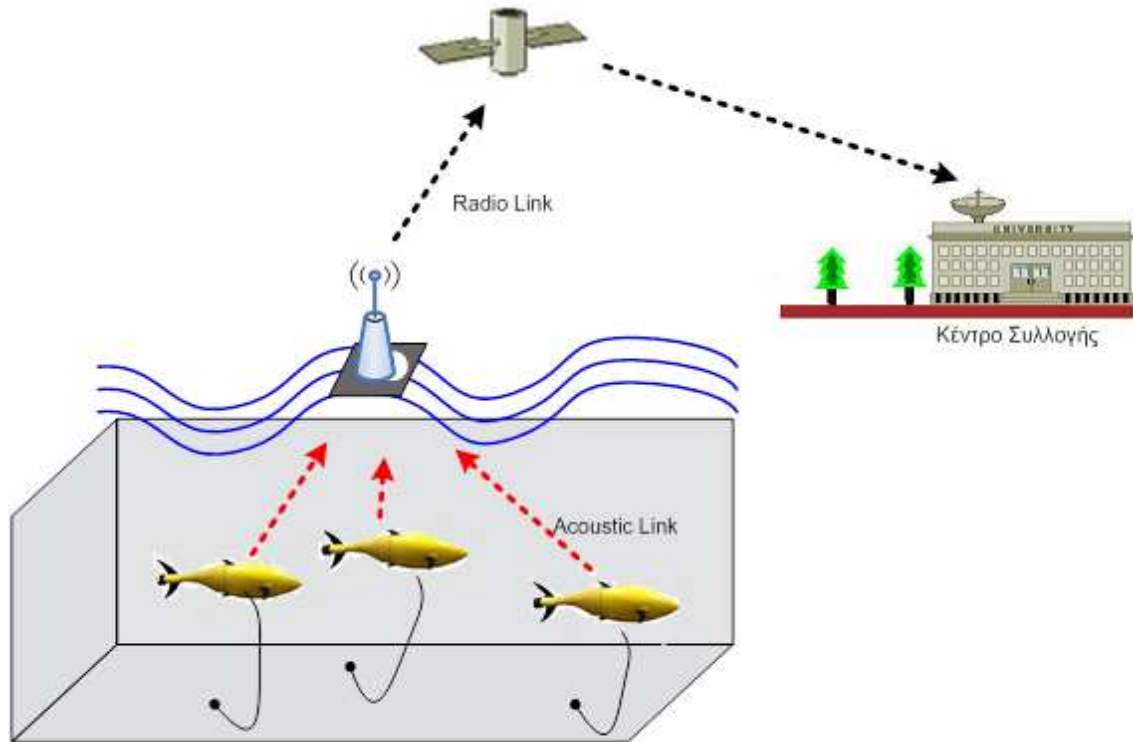
3.5 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΣΤΟ ΡΥΘΜΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, η εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου συνάθροισης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων επιτυγχάνει μείωση στη συνολική κατανάλωση ενέργειας καθώς και αύξηση της πιθανότητας επιτυχημένης μετάδοσης. Η παρατήρηση αυτή μας ωθεί στην αναζήτηση ενός περιβάλλοντος ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων, το οποίο εμφανίζει προβλήματα στην επιτυχημένη μετάδοση και γρήγορης εξάντλησης των ενεργειακών του αποθεμάτων, ώστε η εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου συνάθροισης να αυξήσει την αποδοτικότητα του. Δίκτυα αισθητήρων τα οποία εμφανίζουν τέτοια χαρακτηριστικά είναι τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων, τα οποία παρουσιάζουν χαμηλό ρυθμό μετάδοσης και μεγάλο χρόνο διάδοσης (propagation delay), και

ως εκ τούτου η μετάδοση των πακέτων μετρήσεων είναι δυσχερής, καθώς εμφανίζουν υψηλό ποσοστό απωλειών.

Τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων [75] είναι μια νέα εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης. Θεωρούνται σημαντικά εργαλεία για την πραγματοποίηση ωκεανογραφικών εφαρμογών όπως συλλογή δεδομένων, παρακολούθηση μολύνσεων, εξερεύνηση ακτών, πρόβλεψη καταστροφών, υποβοηθούμενης πλοήγησης και πληθώρα άλλων. Αυτόματα υποβρύχια οχήματα (autonomous underwater vehicles - AUVs) εφοδιασμένα με αισθητήρες έχουν την δυνατότητα να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για υποθαλάσσιους φυσικούς πόρους και να συλλέξουν πολύτιμα επιστημονικά δεδομένα.

Για την επιτυχημένη, όμως, ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών κρίνεται απαραίτητη η χρήση υποθαλάσσιων επικοινωνιών μεταξύ των συσκευών. Οι υποβρύχιοι κόμβοι αισθητήρων πρέπει να έχουν την δυνατότητα αυτό-οργάνωσης, δηλαδή να είναι σε θέση να συντονίζουν τις λειτουργίες τους μέσω της ανταλλαγής τοπολογικών δεδομένων καθώς και στοιχεία κίνησης, και να μπορούν να αποστείλουν τα δεδομένα τους στον τοπικό κόμβο συλλογής, ο οποίος συνήθως βρίσκεται στη ξηρά. Μια τυπική τοπολογία υποβρυχίων ασύρματων δικτύων αισθητήρων παρουσιάζεται παρακάτω.



ΕΙΚΟΝΑ 15: Τυπική τοπολογία υποβρύχιου δικτύου αισθητήρων

Η τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται για την υποβρύχια επικοινωνία των συσκευών, ονομάζεται «ηχητική υποβρύχια επικοινωνία» - acoustic underwater communication – και η οποία επιτυγχάνεται με χρήση ηχητικών κυμάτων αντί των συνήθων ηλεκτρομαγνητικών, καθώς τα τελευταία παρουσιάζουν προβλήματα όπως φαινόμενα πολλαπλών διαδόσεων (multipath propagation), μικρό εύρος ζώνης και χρονικές μεταβολές στο κανάλι [76]. Οι υποβρύχιοι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν ακουστικά μόντεμ για την επικοινωνία τους, ωστόσο τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η μεγάλη χρονική καθυστέρηση, η μικρή ταχύτητα μετάδοσης και ο μεγάλος θόρυβος λόγω της υποβρύχιας επικοινωνίας. Τα υποβρύχια ακουστικά κανάλια είναι μεταβλητά στο χώρο λόγω της φύσης των μέσων και σωματικών ιδιοτήτων μετάδοσης των περιβαλλόντων. Η ταχύτητα διάδοσης σημάτων στο υποβρύχιο ακουστικό κανάλι είναι περίπου $1.5 \times 10^3 \text{ m/sec}$, η οποία είναι πέντε φορές χαμηλότερη από τη ραδιοταχύτητα διάδοσης ($3 \times 10^8 \text{ m/sec}$). Το διαθέσιμο εύρος ζώνης των υποβρύχιων ακουστικών καναλιών είναι περιορισμένο και εξαρτάται εντυπωσιακά και από τη σειρά και από τη συχνότητα μετάδοσης [77]. Εν ολίγοις, τα υποβρύχια ακουστικά κανάλια χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης, το περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης και την υψηλή πιθανότητα λάθους.

Η συνήθης, μέχρι πρότινος, διαδικασία χρήσης αισθητήρων για ωκεανογραφικού τύπου εφαρμογές ήταν η συλλογή δεδομένων για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, η προσωρινή τους αποθήκευση εν συνεχεία η ανάσυρση αυτών από το νερό και εξαγωγή των αποθηκευμένων δεδομένων. Η παραπάνω διαδικασία έχει αρκετά μειονεκτήματα, όπως αναφέρονται παρακάτω:

- Παρακολούθηση σε μη πραγματικό χρόνο: Τα αποθηκευμένα δεδομένα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι την εξαγωγή τους, γεγονός το οποίο τα καθιστά μη χρήσιμα σε εφαρμογές όπως επιτηρήσεις και παρακολουθήσεις περιβαλλοντολογικών φαινομένων, όπως σεισμοί.
- Αδύνατος ο απευθείας επαναπροσδιορισμός του συστήματος: Καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα απευθείας επικοινωνίας με το σύστημα ελέγχου και συλλογής στην ακτή, δεν είναι δυνατή η ρύθμιση των κόμβων όταν η εφαρμογή ή ένα γεγονός το επιτάσσει.
- Μη δυνατότητα ανίχνευσης αποτυχίας κόμβου: Αν ένας κόμβος αποτύχει ή δεν έχει προγραμματιστεί σωστά, τότε μπορεί να μην είναι δυνατόν να ανακαλυφθεί μέχρι την συλλογή του κόμβου, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο την επιτυχία της εκάστοτε εφαρμογής.
- Περιορισμένες δυνατότητες αποθήκευσης πληροφορίας: όπως είναι γνωστό, οι κόμβοι αισθητήρες έχουν περιορισμούς όσο αφορά σε αποθηκευτικούς χώρους για πληροφορίες (μνήμη, σκληρό δίσκο) και ως εκ τούτου απαιτείται η συχνή συλλογή των δεδομένων.

Για όλους του παραπάνω λόγους έχουν πλέον αρχίσει και αναπτύσσονται ευρείας κλίμακας ασύρματα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων όπου οι κόμβοι επικοινωνούν με ασύρματες ζεύξεις αλλά βάσει ηχητικών επικοινωνιών. Η φύση του καναλιού, περιορισμένο εύρος ζώνης καθώς και μεταβλητοί χρόνοι καθυστέρησης, επιβάλλει την ανάπτυξη νέων δικτυακών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, που θα λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες αυτές.

Θεωρούμε πως ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας το οποίο θα πραγματοποιεί συνάθροιση των δεδομένων, θα μπορούσε να αποτελέσει λύση στην αξιόπιστη συλλογή δεδομένων, και ως εκ τούτου εφαρμόζουμε τον προτεινόμενο αλγόριθμο στα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων.

3.5.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΔΕΝΤΡΟΥ ΣΥΛΛΟΓΗΣ

Το πρώτο βήμα είναι η κατασκευή ενός αξιόπιστου και εύρωστου δέντρου συλλογής μέσω του οποίου τα δεδομένα θα μεταφέρονται από τους υποβρύχιους κόμβους αισθητήρες στο παράκτιο κέντρο συλλογής. Πρέπει να σημειωθεί πως τυπικές μέθοδοι σχηματισμού δέντρων τα οποία θα περιλαμβάνουν όλους τους κόμβους (spanning trees) δεν μπορούν να εφαρμοστούν λόγω της απαίτησης για συνεχείς ανανεώσεις, και ως εκ τούτου τα χαρακτηριστικά πρωτόκολλα 802.1 D και η βελτίωση 802.1w (Rapid spanning tree protocol) [78] δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για το λόγο αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε το πρωτόκολλο συλλογής το οποίο προτάθηκε στην παράγραφο 3.3.

3.5.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται με ταυτόχρονη συνάθροιση των δεδομένων στους ενδιάμεσους κόμβους, με βάση χρονικούς περιορισμούς οι οποίοι τίθενται από την εφαρμογή. Αναφερόμαστε, στο παράδειγμα αυτό, σε εφαρμογές στις οποίες η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη, όπως εφαρμογές παρακολούθησης ή υποβοηθούμενης οδήγησης σκαφών. Όταν ένας κόμβος αισθητήρας λάβει ο ίδιος μια μέτρηση ή λάβει ένα πακέτο μέτρησης από έναν γείτονα, τότε πρέπει να υπολογίσει αν το πακέτο μέχρι να φτάσει στο κέντρο συλλογής θα είναι εντός του χρονικού περιορισμού και ανάλογα να αποφασίσει αν θα το συναθροίσει με άλλα πακέτα ή όχι. Η απόφαση αυτή λαμβάνεται με γνώση μόνο τοπικής πληροφορίας με πιθανοτικό τρόπο όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.1.

Η απόρριψη πακέτων στους ενδιάμεσους κόμβους επιτυγχάνει τη μείωση της κίνησης μέσα στο δίκτυο, έτσι ώστε οι κόμβοι να αντιμετωπίζουν λιγότερο ανταγωνισμό για πρόσβαση στο κανάλι. Επιπλέον, η δημιουργία συναθροισμένων πακέτων επιφέρει παρόμοια αποτελέσματα μείωσης κίνησης αλλά με παράλληλη αύξηση στον τελικό χρόνο άφιξης των πακέτων στο κέντρο συλλογής. Σε συνθήκες καναλιού με μεγάλο χρόνο διάδοσης και περιορισμούς στο εύρος ζώνης, όπως είναι τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η προτεινόμενη μέθοδος, όπως παρουσιάζεται στα πειράματα στην ενότητα 3.4, επιφέρει βελτιώσεις τόσο όσον αφορά στο ποσοστό επιτυχημένων μεταδόσεων όσο και στην ποσότητα ενέργειας η οποία καταναλώνεται στο σύστημα. Επιθυμούμε να δείξουμε ότι παρόμοια

αποτελέσματα δύναται να επιτευχθούν και στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου σε περιβάλλοντα με περιορισμούς στο ρυθμό μετάδοσης.

3.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

3.5.3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

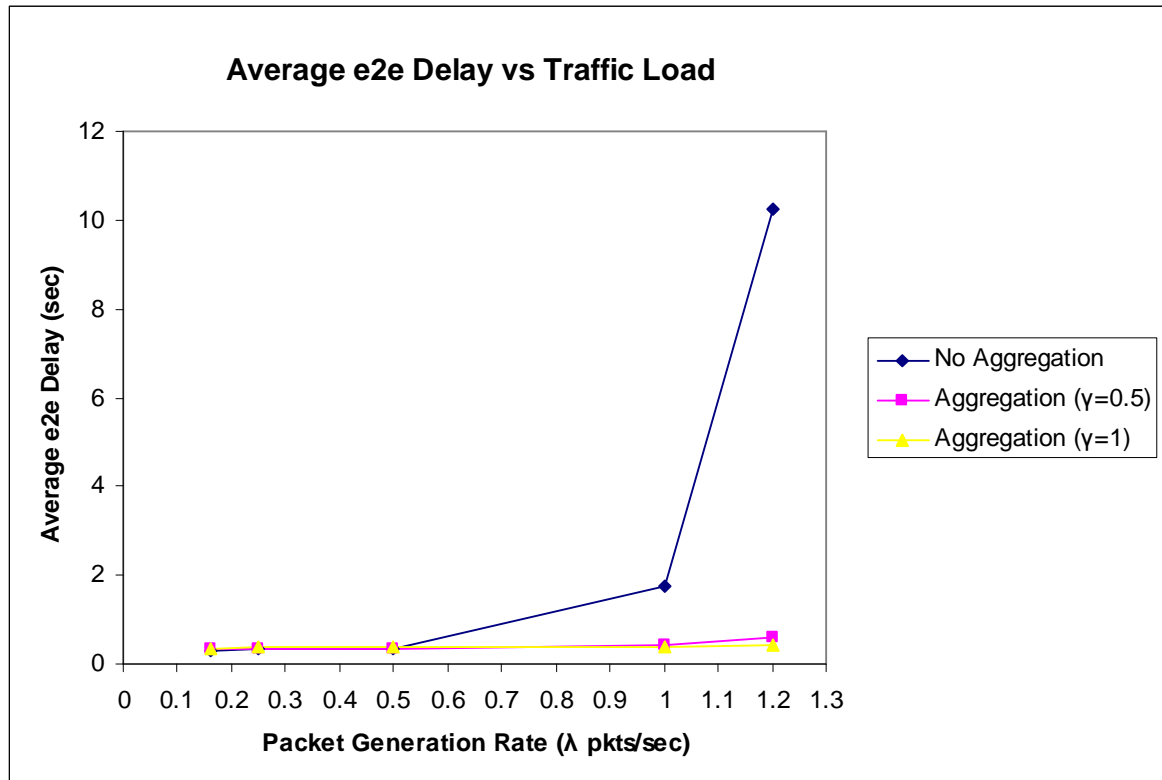
Μελετάμε ένα δίκτυο 48 κόμβων αισθητήρων τοποθετημένους τυχαία σε τετραγωνική περιοχή $200 \times 200 \text{ m}^2$. Κάθε κόμβος καταναλώνει ενέργεια όταν πραγματοποιεί λειτουργίες συλλογής, αποστολής και λήψης μετρήσεων, σύμφωνα με το [26]. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι 0.1 Mbps και ο χρόνος διάδοσης στο κανάλι είναι $1.5 \cdot 10^3 \text{ m/sec}$, όπως συνάδει σε περιβάλλοντα με περιορισμούς στο ρυθμό μετάδοσης και κανάλι με μεταβλητά χαρακτηριστικά όπως είναι τα υποβρύχια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ο παράγοντας συνάθροισης είναι $\beta=0.8$. Οι κόμβοι αισθητήρες γεννάνε πακέτα με ρυθμό Poisson λ πακέτα / δευτερόλεπτο και τα αποστέλλουν στο κέντρο για περαιτέρω επεξεργασία μέσω του δέντρου συλλογής. Η ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου θεωρείται 50 μέτρα (χαμηλή ισχύς μετάδοσης για οικονομία στην ενέργεια και τη μείωση των παρεμβολών). Επιπλέον, παρόλο που το προτεινόμενο σχήμα δεν απαιτεί χρήση συγκεκριμένου πρωτοκόλλου πρόσβασης στο μέσο, επιλέξαμε ένα γενικού τύπου πρωτόκολλο με πρόσβαση στο κανάλι μέσω συναγωνισμού και μηχανισμό αποφυγής των συγκρούσεων. Ο λόγος για τον οποίο δεν επιλέξαμε ένα πρωτόκολλο σχισμών (TDMA ή CDMA) είναι ότι απαιτείται αυστηρός συγχρονισμός, ο οποίος δεν μπορεί να επιτευχθεί σε περιβάλλοντα με μεγάλους χρόνους διάδοσης και μετάδοσης [75].

Οι μετρήσιμοι δείκτες απόδοσης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν είναι η ποσότητα της καταναλισκόμενης ενέργειας E , η από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση και η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης λ , πιθανότητα συνάθροισης γ , χρονικό διάστημα συνάθροισης τ και χρονικούς περιορισμούς D .

3.5.3.2 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

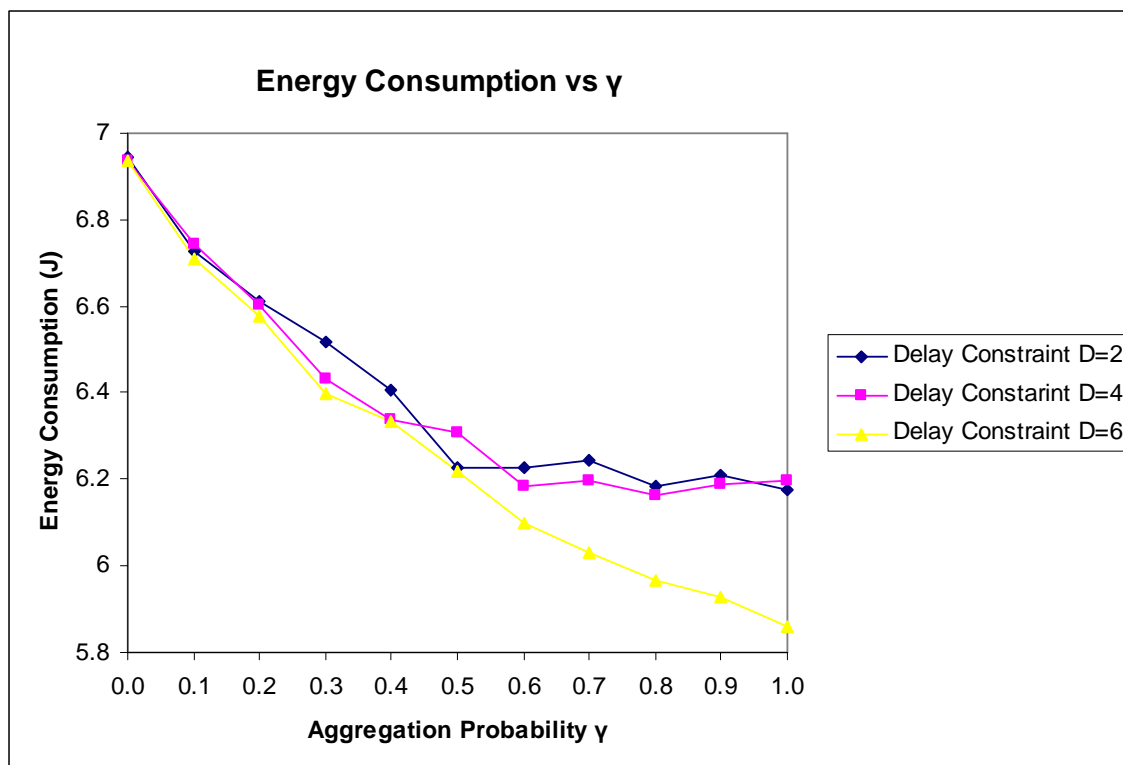
Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζεται η από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση ως συνάρτηση διαφορετικών φορτίων κίνησης. Τα αποτελέσματα για $\gamma = 0$ αντιστοιχούν στην περίπτωση κατά την οποία δεν πραγματοποιείται συνάθροιση των δεδομένων στους ενδιάμεσους

κόμβους. Παρατηρείται πως στην περίπτωση αυτή η καθυστέρηση αυξάνεται δραστικά με την αύξηση της κίνησης στο δίκτυο, ενώ με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου η αύξηση στην καθυστέρηση είναι πιο ομαλή. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται για χαμηλούς ρυθμούς γεννήσεων πακέτων, όταν δεν πραγματοποιείται συνάθροιση η καθυστέρηση είναι πιο μικρή από όταν πραγματοποιείται διότι η συνάθροιση επιβάλλει το χρονικό διάστημα τ .



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12: Μέση καθυστέρηση για διάφορους ρυθμούς γέννησης πακέτων

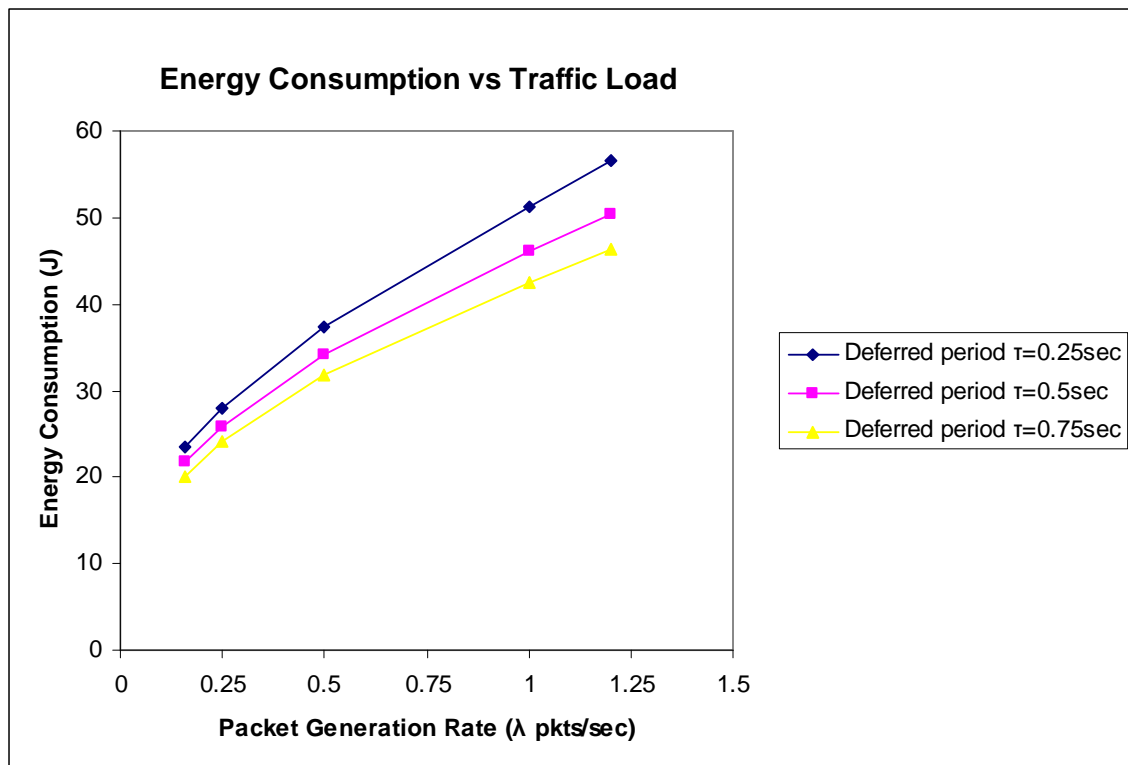
Το Διάγραμμα 13 αποτυπώνει την καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ για διαφορετικούς χρονικούς περιορισμούς D , με ρυθμό Poisson $\lambda = 0,125$ πακέτα/ δευτερόλεπτο και χρονική περίοδο συνάθροισης $\tau = 0,5$ δευτερόλεπτα. Όπως αναμένεται η ποσότητα της καταναλισκόμενης ενέργειας μειώνεται καθώς αυξάνεται η πιθανότητα συνάθροισης, καθώς επίσης όσο ο χρονικός περιορισμός D αυξάνεται, μειώνεται περαιτέρω η συνολικά δαπανώμενη ενέργεια στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει διότι όσο περισσότερο χρόνο έχουν τα πακέτα για να φτάσουν στο κέντρο συλλογής (μεγαλύτερο D) τόσες περισσότερες φορές αποφασίζουν να πραγματοποιήσουν συνάθροιση



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13: Καταναλισκόμενη ενέργεια συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ

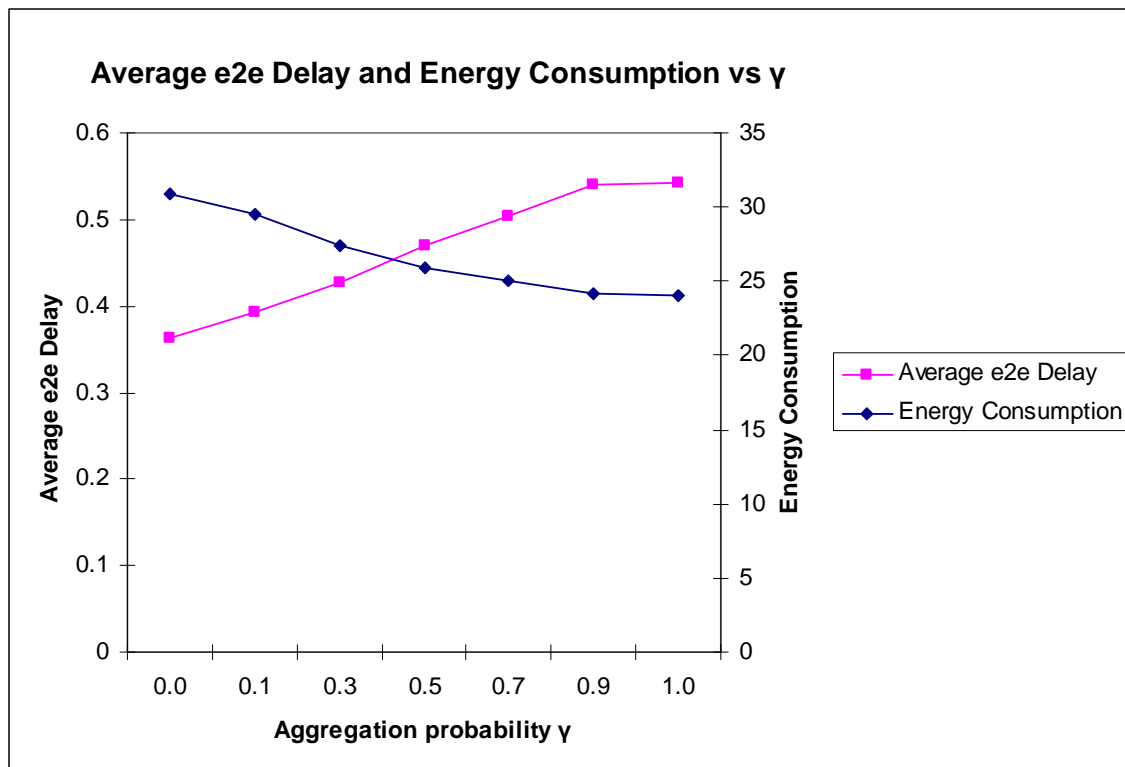
Επιπλέον στο Διάγραμμα 14 παρουσιάζεται η επίδραση της κίνησης στην καταναλισκόμενη ενέργεια του συστήματος για διάφορες τιμές για το χρονικό διάστημα συνάθροισης τ . Θεωρήθηκε πως οι κόμβοι πραγματοποιούν πάντα συνάθροιση $\gamma = 1$ και ότι δεν υπάρχουν απορρίψεις λόγω χρονικού περιορισμού⁵. Όπως αναμενόταν, όσο αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο (μεγαλύτερος αριθμός γεννήσεων πακέτων) τόσο αυξάνεται και η καταναλισκόμενη ενέργεια. Επιπρόσθετα, τα παρακάτω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τον σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει η μεταβλητή τ σε κάθε εφαρμογή, καθώς όσο μεγαλύτερο το χρονικό διάστημα κατά το οποίο περιμένει ένας κόμβος για να πραγματοποιήσει συνάθροιση, τόσο περισσότερα πακέτα συναθροίζονται, και ως εκ τούτου κάθε κόμβος μεταδίδει λιγότερες φορές και κατά συνέπεια καταναλώνει μικρότερη ενέργεια.

⁵ Πρακτικά ο χρονικός περιορισμός D τέθηκε σε πολύ μεγάλη τιμή οπότε σε κάθε περίπτωση ικανοποιείται.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14: Καταναλισκόμενη ενέργεια για διάφορους ρυθμούς γέννησης πακέτων

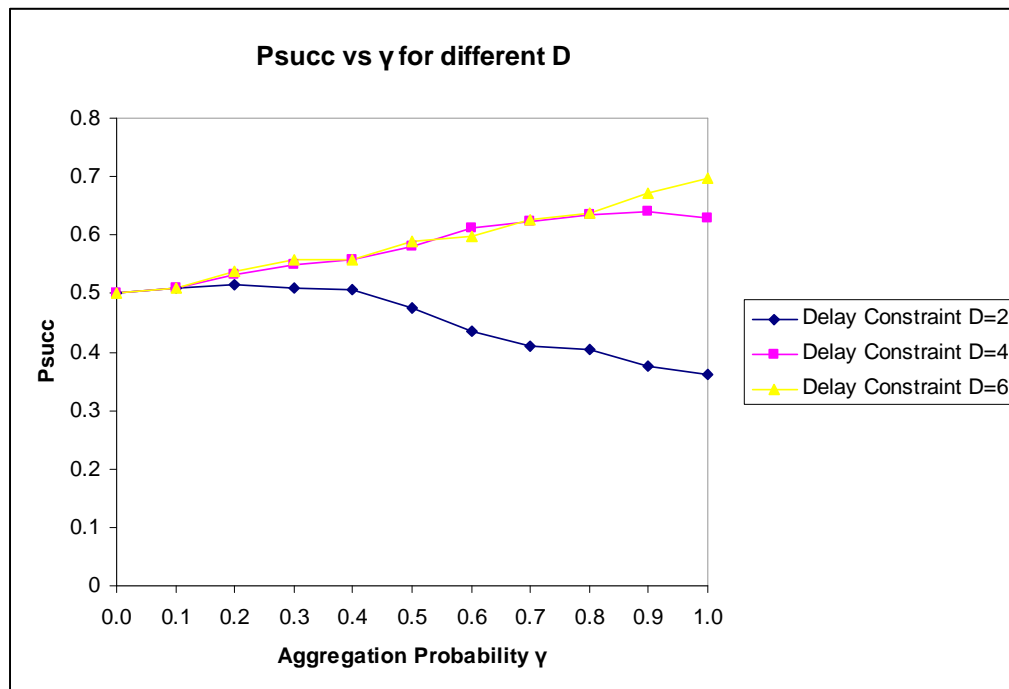
Στο Διάγραμμα 15 παρουσιάζεται συνδυαστικά η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια του συστήματος με την από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ . Η κίνηση είναι $\lambda = 0.5$ πακέτα / δευτερόλεπτο και η περίοδος συνάθροισης $\tau = 0.75$ δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο μετρικών. Καθώς αυξάνεται η πιθανότητα συνάθροισης το σύστημα καταναλώνει μικρότερη ποσότητα ενέργειας ενώ ταυτόχρονα η από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση αυξάνεται. Συνεπώς η πιθανότητα συνάθροισης γ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας ρύθμισης για την εξισορρόπηση των αντίθετων μεταβλητών, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τον σχεδιασμό του συστήματος.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15: Μέση καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ

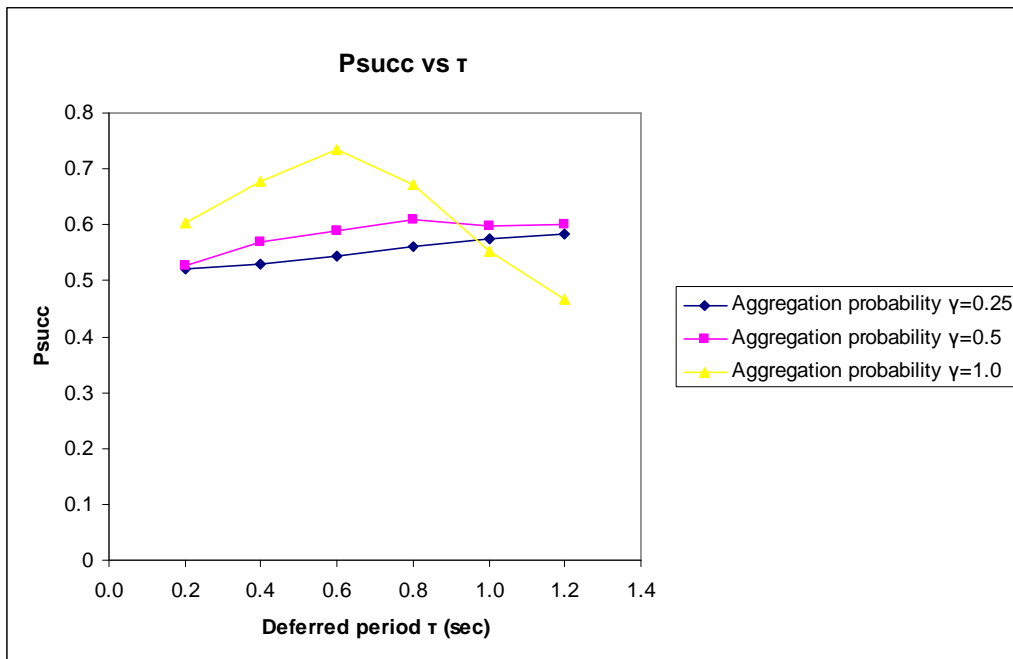
Τέλος, η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης, ο λόγος, δηλαδή, των πακέτων τα οποία έφτασαν εντός του χρονικού περιορισμού στο κέντρο συλλογής προς τα συνολικά πακέτα τα οποία γεννήθηκαν στο δίκτυο, υπολογίζεται και αξιολογείται συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ και της περιόδου συνάθροισης τ . Όπως αποδεικνύεται και στο Διάγραμμα 16, η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει την αύξηση της πιθανότητας επιτυχημένης μετάδοσης σε σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν πραγματοποιείται συνάθροιση ($\gamma = 0$). Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, για το σενάριο προσομοίωσης με χρονικό περιορισμό $D = 4 \text{ sec}$, η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης αυξάνεται αρχικά καθώς η πιθανότητα συνάθροισης γ αυξάνεται, αλλά μετά από ένα σημείο ($\gamma \approx 0.8$) η τάση του δείκτη αντιστρέφεται. Η συμπεριφορά μπορεί να ερμηνευτεί διότι όταν ένα πακέτο παραληφθεί από ένα κόμβο που βρίσκεται σε κατάσταση συνάθροισης, θα συμπεριληφθεί στο συναθροισμένο πακέτο ακόμα και αν αυτό προκαλέσει σε μετέπειτα βήματα την απόρριψη του λόγω μη ικανοποίησης του χρονικού περιορισμού D . Έτσι ενώ η συνάθροιση κατά βάση ωφελεί την λειτουργία του συστήματος καθώς μειώνει την συνολική κίνηση σε αυτό, μετά από ένα σημείο τα πακέτα απορρίπτονται καθώς δεν μπορούν πλέον να ικανοποιήσουν τον χρονικό περιορισμό. Το σημείο καμπής (κατώφλι) εξαρτάται από τον χρονικό περιορισμό, την κίνηση

στο δίκτυο καθώς και από την τιμή της περιόδου συνάθροισης τ . Για παράδειγμα για τιμή του $D = 2sec$ παρατηρούμε από το διάγραμμα πως το κατώφλι μετακινείται σε μικρότερες τιμές της πιθανότητας συνάθροισης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16: Πιθανότητα επιτυχημένης συνάθροισης συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ .

Εν συνεχεία επιλέγουμε το σενάριο όπου ο χρονικός περιορισμός έχει τεθεί στα 6 δευτερόλεπτα και αξιολογούμε την πιθανότητα επιτυχημένης συνάθροισης συναρτήσει της περιόδου συνάθροισης τ , για να μελετήσουμε πως ο χρόνος κατά το οποίο οι κόμβοι είναι σε κατάσταση συνάθροισης επηρεάζουν την συνολική απόδοση του συστήματος. Στο Διάγραμμα 17 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα όπου παρατηρούμε πως για μικρές τιμές της πιθανότητας συνάθροισης γ , η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης παρουσιάζει μια μικρή αύξουσα τάση συναρτήσει του χρόνου συνάθροισης, καθώς όσο περισσότερο χρόνο οι κόμβοι βρίσκονται σε κατάσταση συνάθροισης τόσα περισσότερα πακέτα συναθροίζονται και κατά συνέπεια μειώνεται η κίνηση στο δίκτυο οπότε τα πακέτα προωθούνται στο κέντρο συλλογής εντός του χρονικού περιορισμού. Αντίθετα, όταν πραγματοποιείται πάντα συνάθροιση (κίτρινη καμπύλη) η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης αυξάνεται μέχρι περίοδο συνάθροισης $\tau \approx 0.6$ καθώς όμως οι κόμβοι αυξάνουν το χρόνο κατά τον οποίο πραγματοποιούν συνάθροιση η πιθανότητα μειώνεται, καθώς όλο και περισσότερα πακέτα αποτυγχάνουν να ικανοποιήσουν τον χρονικό περιορισμό.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17: Πιθανότητα επιτυχημένης συνάθροισης συναρτήσει της περιόδου συνάθροισης τ για $D = 6sec$.

Από τα παραπάνω αποδεικνύεται μέσω προσομοιώσεων, πως το προτεινόμενο σχήμα συνάθροισης επιτυγχάνει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.4, όταν εφαρμόζεται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία έχουν πρόσθετους περιορισμούς στο ρυθμό μετάδοσης και στην μεταβλητότητα στο κανάλι, όπως είναι τα υποβρύχια δίκτυα τα οποία εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Η προτεινόμενη μέθοδος προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του περιβάλλοντος και επιτυγχάνει μεγάλο αριθμό επιτυχημένων ληφθέντων πακέτων ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζει μικρή καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας με προσεκτική επιλογή των παραμέτρων του συστήματος.

4 ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ

Η συνάθροιση των δεδομένων κατά στην συλλογή τους σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποφέρει, όπως συζητήθηκε και αποδείχθηκε, σημαντικά ενεργειακά οφέλη. Στην παρούσα ενότητα ορίζουμε το πρόβλημα της αύξησης της διάρκειας ζωής ενός δικτύου ως ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τεχνικές συνάθροισης στοχεύουμε στην ελαχιστοποίηση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο θέτει περιορισμούς στην από – άκρο – σε – άκρο καθυστέρηση των πακέτων πληροφορίας στο κέντρο συλλογής. Αν και η παρούσα μέθοδος ακολουθεί την βασική φιλοσοφία του προτεινόμενου αλγορίθμου στο κεφάλαιο 1, η βασική της διαφορά είναι πως η πιθανότητα συνάθροισης γ καθώς και η αντίστοιχη χρονική περίοδος τ , δεν τίθενται από την εφαρμογή αλλά υπολογίζονται ως λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, για κάθε κόμβο.

4.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Όπως συζητήθηκε στην ενότητα 2.2, έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία πληθώρα τεχνικών για την αύξηση της ζωής των δικτύων αισθητήρων μέσω τεχνικών συνάθροισης. Παρ' όλα αυτά, οι τεχνικές αυτές δεν το ορίζουν ως πρόβλημα βελτιστοποίησης και μόνο ελάχιστες λαμβάνουν υπόψη στους υπολογισμούς τους τον χρόνο ο οποίος απαιτείται για την πραγματοποίηση της συνάθροισης. Αναγνωρίζουν, δηλαδή, ότι η διαδικασία της συνάθροισης επιβαρύνει χρονικά το σύστημα, αυξάνοντας τη συνολική καθυστέρηση των πακέτων, αλλά είτε δεν το λαμβάνουν υπόψη στους υπολογισμούς τους είτε το θεωρούν σταθερό. Αντίθετα, στο προτεινόμενο πλαίσιο η περίοδος συνάθροισης τ αποτελεί μεταβλητή προς βελτιστοποίηση.

Πιο κοντά με την προτεινόμενη μέθοδο, τόσο στον ορισμό όσο και στην ακολουθούμενη μεθοδολογία, είναι οι εργασίες που παρουσιάζονται στα [79] και [80]. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στο [79], μοντελοποιούν και λύνουν μέσω δυναμικού προγραμματισμού, το πρόβλημα της εύρεσης των βέλτιστων σημείων για την πραγματοποίηση της συνάθροισης σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Σκοπός τους είναι η ελαχιστοποίηση της δαπανώμενης ενέργειας στο σύστημα, μέσω του καθορισμού των σημείων συνάθροισης, ικανοποιώντας ταυτόχρονα ορισμένο χρονικό περιορισμό της εφαρμογής. Για τον υπολογισμό της

καθυστερήσης ενός πακέτου θεωρούν πως κάθε φορά που πραγματοποιείται συνάθροιση δαπανάται σταθερός χρόνος t_α . Η μέθοδος τους αφορά σε δίκτυα τα οποία σχηματίζουν δέντρα συλλογής δεδομένων με ρίζα το κέντρο συλλογής και τα οποία τα μετατρέπουν σε δυαδικά για την επίλυση του προβλήματος. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει να λύσει το πρόβλημα εύρεσης των κόμβων συνάθροισης, οι οποίοι ελαχιστοποιούν την συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου ενώ ικανοποιούν τον χρονικό περιορισμό σε πολυωνυμιακό χρόνο.

Στο [80] προτείνονται δύο αλγόριθμοι οι οποίοι έχουν ως στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω του καθορισμού των σημείων – κόμβων συνάθροισης καθώς και του χρόνου συνάθροισης, ικανοποιώντας και πάλι ορισμένο χρονικό περιορισμό. Οι συγγραφείς εισάγουν τον δείκτη του κέρδους συνάθροισης, ο οποίος ορίζεται ως το επικοινωνιακό κέρδος, σε σχέση με τα μεταδιδόμενα πακέτα, το οποίο αποφέρει η πραγματοποίηση της συνάθροισης. Για την επίλυση του προβλήματος παρουσιάζουν δύο αλγόριθμους. Ο πρώτος, ένας brute-force αλγόριθμος, υπολογίζει για κάθε πακέτο το κέρδος συνάθροισης, για κάθε κόμβο και πιθανό χρόνο συνάθροισης στον μονοπάτι του και επιλέγει τα βέλτιστα σημεία και χρόνο συνάθροισης. Ο αλγόριθμος αυτός, όμως, λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας του δεν μπορεί να εφαρμοστεί στους υπολογιστικά περιορισμένους κόμβους του δικτύου. Για το λόγο αυτό, προτάθηκε ένας ευρετικός αλγόριθμος, ο οποίος επιλέγει μόνο έναν κόμβο στο μονοπάτι για συνάθροιση και καταναλώνει όλο τον επιτρεπόμενο χρόνο για συνάθροιση, ώστε παράλληλα να ικανοποιεί και τον χρονικό περιορισμό.

Οι δυο αυτές μέθοδοι, αν και επιτυγχάνουν μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας δεν είναι ικανές να ανταποκριθούν στις αλλαγές του δικτύου όσο αφορά την κίνηση αλλά και αλλαγές στον χρονικό περιορισμό. Επιπλέον, σε κάθε μονοπάτι πληροφορίας, ο αριθμός των κόμβων οι οποίοι πραγματοποιούν συνάθροιση είναι σταθερός, ειδικά στο [80] επιλέγεται μόνο ένας κόμβος, με αποτέλεσμα οι κόμβοι αυτοί να καταναλώνουν μικρότερη ενέργεια σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου, οι οποίοι εξαντλούν τα ενεργειακά τους αποθέματα με ταχύτερο ρυθμό. Η λύση η οποία αποτελεί το αντικείμενο της παρούσης ενότητας επιτυγχάνει ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας ικανοποιώντας ορισμένο χρονικό περιορισμό μέσω της εύρεσης των βέλτιστων πιθανοτήτων συνάθροισης καθώς και της βέλτιστης περιόδου συνάθροισης για κάθε κόμβο, η οποία έχει την ικανότητα να ανταποκρίνεται σε αλλαγές στην λειτουργία του δικτύου. Επιπλέον, η επιλογή συγκεκριμένων κόμβων του δικτύου για πραγματοποίηση συνάθροισης, εμφανίζει φαινόμενα

μη δικαιοσύνης ανάμεσα στους κόμβους, καθώς οι κόμβοι εξαντλούν τα ενεργειακά τους αποθέματα με μη ομοιόμορφο τρόπο.

4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ & ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

4.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

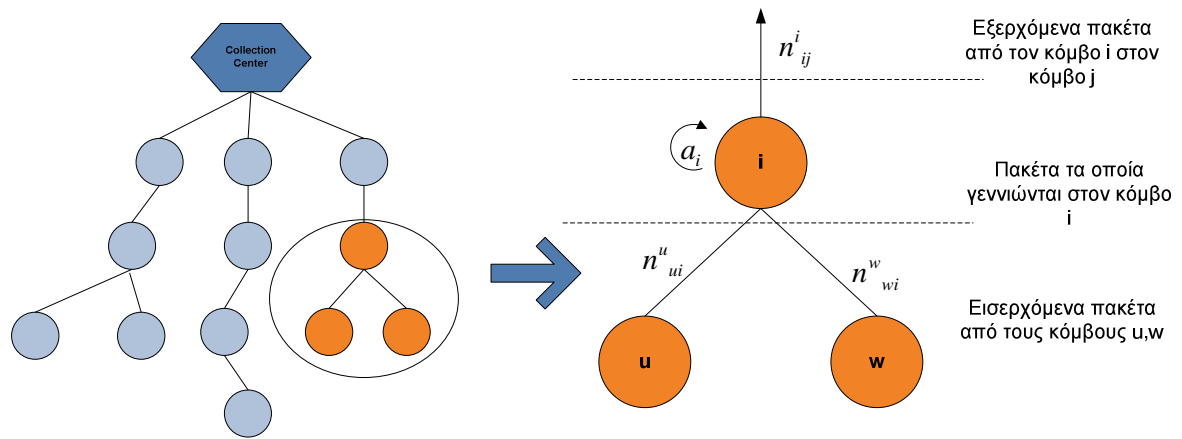
Μοντελοποιούμε το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ως ένα συνδεδεμένο γράφο $G = (N, L)$, όπου N είναι το σύνολο των $|N|$ κόμβων και L είναι το σύνολο των $|L|$ συνδέσεων. Δύο κόμβοι, $i, j \in N$ σχηματίζουν μια σύνδεση $(i, j) \in L$, εάν μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους (δηλαδή είναι ο ένας βρίσκεται εντός της ακτίνας μετάδοσης του άλλου). Το σύνολο των κόμβων όπου ένας κόμβος i μπορεί να επικοινωνήσει σχηματίζουν τη γειτονιά του $N(i)$. Επιπλέον, το δίκτυο επικοινωνίας των ασύρματων κόμβων-αισθητήρων σχηματίζεται με την εφαρμογή του αλγορίθμου σχηματισμού δέντρου συλλογής HELLO, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.3, όπου το κέντρο συλλογής αποτελεί την ρίζα του δέντρου και κάθε αισθητήρας ανήκει σε αυτό είτε ως φύλλο είτε ως εσωτερικός κόμβος. Σύμφωνα με την δομή του δέντρου συλλογής, κάθε κόμβος i λαμβάνει πακέτα από της κόμβους παιδιά του, $j \in Ch(i)$, και τα προωθεί στον κόμβο πατέρα του, σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο υπο-δέντρα συλλογής. Κάθε υπο-δέντρο αναπαριστά το μονοπάτι το οποίο ο κόμβος i χρησιμοποιεί για να στείλει τα πακέτα δεδομένων του στο κέντρο συλλογής. Επιπλέον, ορίζουμε ως $F(i)$ το σύνολο των κόμβων οι οποίοι ανήκουν στο ίδιο υπο-δέντρο με τον κόμβο i και βρίσκονται σε πιο πάνω επίπεδο από αυτόν.

4.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΙΝΗΣΗΣ & ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ

Κάθε κόμβος γεννάει πακέτα με προορισμό το κέντρο συλλογής με ρυθμό a_i όπου $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_i, \dots, a_{|N|})$ ορίζει το διάνυσμα ρυθμού γεννήσεων πακέτων του συστήματος. Επιπλέον, ορίζουμε ως n_{ui}^u τα εισερχόμενα πακέτα από όλα τα παιδιά $u \in Ch(i)$ του κόμβου i , και ως n_{ij}^i τα εξερχόμενα πακέτα του κόμβου i στο κόμβο πατέρα του $j \in F(i)$, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 16.

Επιπλέον, κάθε κόμβος i με πιθανότητα p_i , όπου $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_{|N|})$, εισέρχεται σε περίοδο αναμονής τ_i κατά την οποία όλα τα εισερχόμενα πακέτα καθώς και αυτά που γεννούνται στον κόμβο μπαίνουν την ουρά αναμονής του κόμβου και δεν εξυπηρετούνται. Όταν η χρονική περίοδος τ_i λήξει, ο κόμβος σχηματίζει και αποστέλλει ένα πακέτο το οποίο

περιέχει τα δεδομένα των πακέτων της ουράς. Διαφορετικά, με πιθανότητα $1 - p_i$, ο κόμβος στέλνει μόνο το πρώτο πακέτο της ουράς του.



ΕΙΚΟΝΑ 16: Διαδικασία συλλογής δεδομένων

4.2.3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι κόμβοι καταναλώνουν ενέργεια κάθε φορά που λαμβάνουν ή στέλνουν ένα πακέτο. Η συνάρτηση ενέργειας κάθε κόμβου $E_i(\cdot)$ ορίζεται σύμφωνα με [26]:

$$E(k, d) = E_{receive} + E_{transmit} = e_{elec} \cdot k + e_{elec} \cdot k + e_{amp} \cdot k \cdot d^2$$

Όπου όπως έχει αναφερθεί,

- e_{elec} : Η ενέργεια που καταναλώνεται στο κύκλωμα εκπομπής ή λήψης ,
- e_{amp} : Η ενέργεια που καταναλώνεται στον ενισχυτή εκπομπής ώστε να επιτευχθεί αποδεκτός σηματοθορυβικός λόγος,
- k : το μέγεθος του πακέτου σε bits,
- και d : η ακτίνα μετάδοσης του κόμβου σε m.

Οπότε, σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο συστήματος και θεωρώντας περίοδο πραγματοποίησης συνάθροισης τ_i , η συνολική ενέργεια την οποία καταναλώνει ένας κόμβος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως:

$$E(k, d, p_i, n) = e_{amp} k \sum_{ueCh(i)} n_{ui}^u + p_i (e_{elec} k + e_{amp} k d^2) + (1 - p_i) (e_{elec} n_{ij}^i k + e_{amp} \cdot n_{ij}^i k d^2) \quad (16)$$

Παρατηρούμε ότι η ενέργεια λήψης $E_{receive}$ για κάθε κόμβο εξαρτάται από το πλήθος των πακέτων $\sum_{ueCh(i)} n_{ui}^u$ τα οποία λαμβάνει από τα παιδιά του. Η ενέργεια αποστολής $E_{transmit}$ εξαρτάται από τα πακέτα τα οποία μεταδίδει κάθε κόμβος, τα οποία με την σειρά τους εξαρτώνται από την πιθανότητα συνάθροισης των κόμβων· με πιθανότητα p_i ο κόμβος

στέλνει μόνο ένα πακέτο δεδομένων μήκους k bits και με πιθανότητα $1-p_i$ στέλνει $n_{ij}^i \cdot k$ bits πληροφορίας.

Θεωρώντας σταθερό μέγεθος πακέτου k bits και γνωστή τοπολογία, όπου οι αποστάσεις d μεταξύ γειτονικών κόμβων καθώς και το πλήθος εισερχόμενων και εξερχόμενων πακέτων είναι γνωστά, η συνάρτηση ενέργειας της κόμβου $E(k, d, p_i, n)$ εξαρτάται μόνο από την πιθανότητα συνάθροισης p_i . Οπότε, έχουμε $E(k, d, p_i, n) \equiv E_i(p_i)$, η οποία είναι αυστηρά κοίλη, γνησίως φθίνουσα και διπλά παραγωγίσιμη στο διάστημα $[0, 1]$ συνάρτηση της πιθανότητας συνάθροισης p_i . Επιπλέον, η πιθανότητα p_i φράσσεται σύμφωνα με τον ορισμό της.

$$0 \leq p_i \leq 1$$

Θεωρούμε, επίσης, ότι για κάθε πακέτο υπάρχει χρονικός περιορισμός D ο οποίος συμβολίζει τον εναπομείναντα χρόνο αυτού για να φτάσει στο κέντρο συλλογής. Με το πέρας αυτού, το πακέτο «λήγει» και απορρίπτεται.

Σκοπός μας είναι η μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου ώστε να αυξηθεί ο χρόνος ζωής του, ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιήσουμε απαιτήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας των πακέτων δεδομένων όπως ορίζονται από τον χρονικό περιορισμό D . Επιθυμούμε, λοιπόν, την εύρεση των βέλτιστων πιθανοτήτων συνάθροισης p_i καθώς και την βέλτιστη περίοδο συνάθροισης τ_i , για κάθε κόμβο $i \in N$, τα οποία ελαχιστοποιούν την συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου, ικανοποιώντας παράλληλα της χρονικούς περιορισμούς D των πακέτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το **Γενικό Πρωτεύων Πρόβλημα (Global Problem – GP)** ορίζεται ως:

(GP)

$$\min_{\vec{p}} \sum_i^N E_i \quad (17)$$

$$\text{στ. } End - to - End Delay_{n^i} \leq Delay_{Constraint} \quad \forall i \in N \quad (18)$$

$$0 \leq p_i \leq 1 \quad (19)$$

$$\tau_i \geq 0 \quad (20)$$

Ο όρος $End - to - End Delay_{n^i}$ του περιορισμού (18) αντιστοιχεί στην συνολική καθυστέρηση την οποία ένα πακέτο n^i συναντά από την στιγμή της δημιουργίας του στον κόμβο i μέχρι την λήψη του στο κέντρο συλλογής. Αποτελείται από α) τον χρόνο τον οποία δαπανά στο κόμβο i (χρόνος για συνάθροιση τ_i , επεξεργασία και αναμονή στην ουρά $- Q_i$), β) τον χρόνο που απαιτείται για την μετάδοση του στο κέντρο συλλογής, και ο οποίος εξαρτάται από την θέση του κόμβου στο δέντρο συλλογής, και γ) το χρόνο που το πακέτο δαπανά στους κόμβους που βρίσκονται στα παραπάνω επίπεδα από τον κόμβο $i, j \in F(i)$. Η μεταβλητή $Delay_{Constraint}$ αναπαριστά το χρόνο μέσα στον οποίο κάθε πακέτο πρέπει να φτάσει στο κέντρο συλλογής. Αρχικά, σε κάθε πακέτο το οποίο γεννιέται δίνεται η αρχική τιμή D , η οποία μειώνεται με το χρόνο. Κατά συνέπεια, κάθε πακέτο πρέπει να ικανοποιεί τον περιορισμό (17), όπου $Delay_{Constraint} = D - elapsed_{time}$. Ο περιορισμός (18) αναλύεται στην ενότητα 4.3.1.

4.2.4 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ & ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στοχεύοντας σε μία αποδοτική λύση του GP, υιοθετούμε της ακόλουθες υποθέσεις.

ΥΠ1: Το πρόβλημα **GP** είναι αυστηρά εφικτό (Slatter Conditions Qualification [81]). Υπάρχει, δηλαδή, πάντα ένα διάνυσμα \vec{p} και ένα διάνυσμα \vec{t} τέτοιο ώστε να ικανοποιούνται αυστηρά οι περιορισμοί (18), (19) και (20).

ΥΠ2: Θεωρούμε ότι ο χρόνος διαιρείται σε πλαίσια και κάθε πλαίσιο σε T χρονοσχιμές. Οι κόμβοι μπορούν να στείλουν ή/και να λάβουν μόνο ένα πακέτο σε κάθε χρονοσχιμή. Στην αρχή κάθε πλαισίου, επιλύεται το πρόβλημα **GP** και υπολογίζονται οι πιθανότητες p_i καθώς και οι περίοδοι συνάθροισης τ_i .

ΥΠ3: Δεδομένης της δυσκολίας του υπολογισμού της από-άκρο-σε άκρο καθυστέρησης ενός πακέτου n^i πριν της λήψης του στο κέντρο συλλογής, υιοθετούμε την ακόλουθη προσέγγιση. Κάθε κόμβος i περιοδικά ενημερώνει τα παιδιά του $u \in Ch(i)$ για την μέση καθυστέρηση εξυπηρέτησης του, η οποία παρατηρήθηκε στα προηγούμενα πλαίσια, δηλαδή για το μέσο χρόνο μετάδοσης των πακέτων στο κέντρο συλλογής, και εξαρτάται από το αν ένας κόμβος i πραγματοποιούσε συνάθροιση κατά το προηγούμενο πλαίσιο. Κάθε κόμβος $u \in Ch(i)$ προσθέτει την δική του καθυστέρηση σε αυτή του πατέρα του και ενημερώνει τα παιδιά του. Με τον τρόπο αυτό, και κάνοντας χρήση μόνο τοπικής πληροφορίας, κάθε κόμβος έχει την δυνατότητα να υπολογίσει την μέση καθυστέρηση την οποία ένα πακέτο του θα

συναντήσει στα παραπάνω επίπεδα. Επιπλέον, με παρόμοιο τρόπο και χρήση παρελθοντικής πληροφορίας, κάθε κόμβος υπολογίζει το πλήθος των πακέτων που αναμένεται να του στείλουν τα παιδιά του στο τρέχον πλαίσιο. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή κάθε πλαισίου κάθε κόμβος i , λαμβάνει της τιμές των p_i και τ_i των γειτόνων του, και κάνοντας χρήση τεχνικών εκθετικού προσδιορισμού μέσω α όρων, μπορεί να υπολογίσει τη συμπεριφορά αυτών. Η πληροφορία αυτή μπορεί να σταλθεί μαζί με τα υπάρχοντα πακέτα σηματοδοσίας και δεν επιβαρύνει τη λειτουργία του δικτύου. Η χρησιμοποιούμενη συνάρτηση εκθετικού προσδιορισμού μέσω α όρων η οποία χρησιμοποιείται είναι η: $S_t = \alpha Y(t-1) + (1-\alpha)S_{t-1}$. Δηλαδή, η τιμή της μεταβλητής προς προσδιορισμό S_t υπολογίζεται από την τιμή της μεταβλητής $Y(t-1)$ και αφορά στο προηγούμενο χρονικό πλαίσιο, και την τιμή για την μεταβλητή η οποία υπολογίστηκε στο προηγούμενο πλαίσιο, S_{t-1} . Η σταθερά α καθορίζει την βαρύτητα ή "ευαισθησία" για κάθε μεταβλητή.

ΥΠ4: Αποτέλεσμα της διαδικασίας της συναθροίσεως είναι η δημιουργία ενός πακέτου με το ίδιο μέγεθος (k bits) με τα πακέτα μετρήσεων, τα οποία δημιουργούν οι κόμβοι όταν συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον. Το συναθροισμένο πακέτο δημιουργείται από της μετρήσεις που περιέχουν τα πακέτα τα οποία συναθροίζονται αφού εφαρμοστεί σε αυτά η κατάλληλη συνάρτηση συναθροίσεως. Η συνάρτηση αυτή εξαρτάται από την εφαρμογή και ενδεικτικά μπορεί να είναι ο υπολογισμός του μέσου όρου, της μέγιστης ή/και ελάχιστης τιμής κ.α.

ΥΠ5: Θεωρούμε ιδανικό μέσο μετάδοσης (επίπεδο πρόσβασης μέσου), δηλαδή δεν λαμβάνουμε υπόψη τις συγκρούσεις και τις επαναμεταδόσεις στο επίπεδο αυτό. Για να θεωρηθεί ένα πακέτο ως επιτυχημένη μετάδοση πρέπει να φτάσει στο κέντρο συλλογής εντός του χρονικού περιορισμού D .

Παρατηρήσεις

Η ΥΠ1 αντιστοιχεί στην ικανοποίηση των περιορισμών κατά Slatter (Slatter Conditions Qualification), η οποία και εγγυάται την ύπαρξη των βέλτιστων πολλαπλασιαστών Lagrange [81], η παρουσία των οποίων θα διευκολύνει την επίλυση του προβλήματος GP, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Η ασύγχρονη φύση της λειτουργίας του δικτύου οδηγεί στην υιοθέτηση της ΥΠ2, να χωρίσουμε, δηλαδή, τον χρόνο σε πλαίσια και χρονοσχισμές. Το μέγεθος αυτών, είναι μεγάλο με αποτέλεσμα να μην απαιτείται αυστηρός συγχρονισμός των κόμβων [61]. Πακέτα

χρονισμού θα μπορούσαν να μεταδίδονται στην αρχή κάθε πλαισίου, μαζί με τα πακέτα τα οποία απαιτούνται από την ΥΠ3, δίχως να επιβαρύνουν το δίκτυο.

Η ΥΠ3 είναι απαραίτητη λόγω του μη εφικτού προσδιορισμού της καθυστέρησης σε κάθε επίπεδο. Υιοθετούμε για το λόγο αυτό μια προσεγγιστική μέθοδο η οποία, όπως διαπιστώνεται από τις αναλυτικές προσομοιώσεις στην ενότητα 4.5, είναι ακριβής. Η ακρίβεια της εξαρτάται από το πλήθος των περασμένων πλαισίων για τα οποία αποστέλλονται οι τιμές για τα p_i και τ_i .

Οι υποθέσεις ΥΠ4 και ΥΠ5 εξασφαλίζουν την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου σε ένα αρκετά γενικό πλαίσιο, όπου μπορεί να εφαρμοστεί σε πληθώρα εφαρμογών. Η ΥΠ5 εξασφαλίζει ότι όλες οι απορρίψεις πακέτων στο δίκτυο θα οφείλονται σε αδυναμία ικανοποίησης του χρονικού περιορισμού και όχι σε αδυναμία μετάδοσης στο μέσο. Διαισθητικά, θεωρούμε ότι η προτεινόμενη μέθοδος όταν εφαρμοστεί πάνω από επίπεδο πρόσβασης μέσου με συγκρούσεις και επαναμεταδόσεις (π.χ. το IEEE 802.11), θα απέδιδε εξίσου ικανοποιητικά, καθώς η συνάθροιση επιτυγχάνει μείωση της κίνησης στο δίκτυο καθώς και την ανάγκη για ανάκτηση του καναλιού για κάθε πακέτο.

Με βάση της ΥΠ2 και ΥΠ3, ο περιορισμός (17) αναλύεται επιπλέον ως:

$$p_i \cdot \tau_i + (1 - p_i) \min [Q_i, T] + t_{transmit} + \sum_{j \in F(i)} (p_j \cdot \tau_j + (1 - p_j) \min [Q_j, T]) \leq \text{Delay}_{constraint} \quad (21)$$

Η παραπάνω σχέση ορίζει την καθυστέρηση την οποία θα συναντήσει ένα πακέτο n^i , το οποίο γεννιέται ή λαμβάνεται στο κόμβο i , στην χειρότερη περίπτωση.

Η σχέση (21) αναλύεται ως:

Ένα πακέτο n^i , με πιθανότητα p_i περιμένει για χρόνο τ_i , μέχρι να λήξει ο χρόνος συνάθροισης, ενώ με πιθανότητα $(1 - p_i)$ περιμένει τη σειρά του στην ουρά για να εξυπηρετηθεί. Ο χρόνος εξυπηρέτησης στην ουρά είναι ο μικρότερος όρος μεταξύ του μήκους της ουράς Q_i και του πλήθους των χρονοσχισμών T του πλαισίου. Αυτό ισχύει, διότι ένα πακέτο προς μετάδοση θα περιμένει τόσες χρονοσχισμές όσες το πλήθος των πακέτων που βρίσκονται μπροστά του στην ουρά⁶. Αν τα πακέτα στην ουρά είναι περισσότερα από τις χρονοσχισμές T σε ένα πλαίσιο, τότε θα περιμένει για όλη τη διάρκεια του χρονικού πλαισίου.

⁶ Κάθε πακέτο απαιτεί μια χρονοσχισμή για τη μετάδοση του όπως ειπώθηκε στην ΥΠ2

Ο χρόνος $t_{transmit}$ αντιστοιχεί στο χρόνο ο οποίος απαιτείται για τη μετάδοση του πακέτου n^i από τον κόμβο i στο κέντρο συλλογής και εξαρτάται από την θέση / επίπεδο στο οποίο ανήκει ο κόμβος στο δέντρο συλλογής.

Το υπόλοιπο αριστερό μέρος της εξίσωσης (21) αντιστοιχεί στην καθυστέρηση την οποία το πακέτο συναντά στη διαδρομή από τον κόμβο i στο κέντρο συλλογής και εξαρτάται από το αν οι κόμβοι $j \in F(i)$ πραγματοποιούν ή όχι συνάθροιση, σύμφωνα με ΥΠ3.

Όπως αναλύθηκε νωρίτερα, η μεταβλητή $Delay_{constraint}$ αναπαριστά τον χρόνο μέσα στον οποίο κάθε πακέτο πρέπει να φτάσει στο κέντρο συλλογής, όπου $Delay_{constraint} = D - elapsed_{time}$.

4.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει δύο ιδιότητες οι οποίες διευκολύνουν την κατανομή του λύση. Αρχικά, η (17) είναι ένα άθροισμα του συνόλου των $|N|$ συναρτήσεων ενέργειας $E_i(p_i)$ που εξαρτώνται μόνο από την μεταβλητή p_i , και αφορούν κάθε κόμβο – αισθητήρα i . Επιπλέον, οι περιορισμοί (18)- (20) εξαρτώνται μόνο από τα p_i και τ_i . Βασιζόμενοι στις παραπάνω ιδιότητες στην παρούσα ενότητα θα αναπτύξουμε και θα παρουσιάσουμε έναν αλγόριθμο βασισμένο σε τεχνικές Lagrange, ο οποίος είναι ικανός να επιλύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης, να βρει δηλαδή τις βέλτιστες τιμές της πιθανότητας και της χρονικής περιόδου συνάθροισης, p^* και τ^* .

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία αποσύνθεσης πρωτεύοντος-δυσικού προβλήματος [84] στο πρωτεύον πρόβλημα GP, έχουμε:

- I. N ανεξάρτητα υπο-προβλήματα (**SP**). Θεωρώντας την αποσύνθεση πρωτεύοντος βήματος και κρατώντας σταθερή την τιμή της μεταβλητής τ , δηλαδή για ορισμένη περίοδο συνάθροισης, το πρόβλημα **GP** διαιρείται σε $|N|$ ανεξάρτητα υπο-προβλήματα (**SP**) το καθένα υπεύθυνο για τον υπολογισμό της βέλτιστης τιμής της πιθανότητας συνάθροισης p_i^* , δεδομένης μιας ανάθεσης τ_i . Η επίλυση των υπο-προβλημάτων δίνεται στην ενότητα 4.3.1.
- II. Ένα κυρίαρχο (master) πρόβλημα, υπεύθυνο για την ανανέωση των τιμών τ_i προς την βέλτιστη τιμή τ_i^* . Προκειμένου να επιλύσουμε το πρόβλημα (**MP**), υιοθετούμε την μέθοδο υπο-βαθμίδων (subgradient) η οποία αξιοποιεί την

πληροφορία που φέρουν οι πολλαπλασιαστές multipliers λ_i^* $i \in |N|$, οι οποίοι υπολογίζονται από τα (SP) και συνδέονται με τον περιορισμό (18). Η επίλυση του(MP)αναλύεται στην ενότητα 4.3.3 .

Αξίζει να τονίσουμε πως αφού το πρόβλημα (GP) είναι ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, τόσο το κυρίαρχο πρόβλημα (MP), όσο και τα υπο-προβλήματα (SP) είναι επίσης κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης [82]. Ακολουθούν οι λύσεις των προβλημάτων SP και MP, αντίστοιχα.

4.3.1 ΕΠΙΛΥΩΝΤΑΣ ΤΑ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΥΠΟ-ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (SP)

Κρατώντας σταθερά την τιμή της μεταβλητής τ , το πρόβλημα **GP** γίνεται διαχωρίσιμο και μετασχηματίζεται σε $|N|$ ανεξάρτητα υπο-προβλήματα υπολογισμού της πιθανότητας συνάθροισης για κάθε κόμβο αισθητήρα i . Το καθένα από αυτά είναι ανεξάρτητα επιλύσιμο καθώς α) η συνάρτηση ενέργειας είναι άθροισμα $|N|$ συναρτήσεων οι οποίες εξαρτώνται μόνο από το p_i , $i \in N$, β) το σύνολο των περιορισμών είναι διαχωρίσιμο στο N και γ) το πεδίο του **GP** μπορεί να αναλυθεί σε Καρτεσιανό γινόμενο, δηλαδή $p = [0, \dots, 1] \times \dots \times [0, \dots, 1]$.

Κάθε κόμβος $i \in N$ επιλύει το παρακάτω πρόβλημα στην αρχή κάθε πλαισίου (κάθε πλαίσιο διαιρείται σε T χρονοσχιμές). Το πρόβλημα SP ορίζεται ως:

$$\text{SP: } \min E_i(p_i) \quad (22)$$

$$\text{st. } p_i \tau_i + (1 - p_i) \min[Q_i, T] + t_{\text{transmit}} + \sum_{j \in F(i)} (p_j \tau_j + (1 - p_j) \min[Q_j, T]) \leq \text{Delay}_{\text{Constraint}} \quad (23)$$

$$0 \leq p_i \leq 1 \quad (24)$$

Η σχέση (21) μπορεί περαιτέρω να αναλυθεί σύμφωνα με την (16):

$$E_i(p_i) = e_{\text{amp}} k \sum_{u \in Ch(i)} n_{ui}^u + p_i (e_{\text{elec}} k + e_{\text{amp}} k d^2) + (1 - p_i) (e_{\text{elec}} n_{ij}^i k + e_{\text{amp}} n_{ij}^i k d^2) \quad (25)$$

Για λόγους απλότητας για την παρακάτω ανάλυση, υποθέτουμε ότι η αποστολή και η λήψη ενός πακέτου k bits καταναλώνει την ίδια ποσότητα ενέργειας, δηλαδή

$$E_{\text{transmit}} = E_{\text{receive}} = E_{\text{receive/transmit}}$$

Όποτε (25) γράφεται ως:

$$E_i(p_i) = E_{\text{receive}} \sum_{u \in Ch(i)} n_{ui}^u + E_{\text{transmit}} (p_i + (1 - p_i) n_{ij}^i).$$

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε πλαίσιο διαχωρίζεται σε T χρονοσχιμές, υποστηρίζουμε ότι σε ένα πλαίσιο ένας κόμβος θα πραγματοποιήσει συνάθροιση το πολύ $\left\lceil \frac{T}{\tau_i} \right\rceil$

φορές. Με πιθανότητα $(1 - p_i)$ της κόμβος θα στείλει σε ένα πλαίσιο $\min [Q_i, T]$ πακέτα. Οπότε, ξαναγράφουμε την συνάρτηση ενέργειας $E_i(p_i)$ ως:

$$E_i(p_i) = E_{receive/transmit} \left[\sum_{ueCh(i)} n_{ui}^u + p_i \cdot \left[\frac{T}{\tau_i} \right] + (1 - p_i) \min [Q_i, T] \right].$$

Επιπλέον, επιλύοντας τον περιορισμό (23) ως προς p_i για ορισμένο τ_i έχουμε:

$$p_i \leq \frac{Delay_{Constraint} - \min [Q_i, T] - t_{transmit} - \sum_{j \in F(i)} p_j \cdot \tau_j + (1 - p_j) \min [Q_j, T]}{\tau_i - \min [Q_i, T]}, \quad for \tau_i \geq \min [Q_i, T] \quad (23a)$$

ή

$$p_i \geq \frac{Delay_{Constraint} - \min [Q_i, T] - t_{transmit} - \sum_{j \in F(i)} p_j \cdot \tau_j + (1 - p_j) \min [Q_j, T]}{\min [Q_i, T] - \tau_i}, \quad for \tau_i < \min [Q_i, T] \quad (23b)$$

Επιπλέον, η πιθανότητα p_i φράσσεται από τον ορισμός της:

$$0 \leq p_i \leq 1 \quad (24)$$

Από της σχέσεις (23a) και (24) και δεδομένης της φθίνουσας φύσης της συνάρτησης ενέργειας $E_i(p_i)$ έχουμε για $\tau_i \geq \min [Q_i, T]$,

$$p_i = \min \left[\frac{Delay_{Constraint} - \min [Q_i, T] - t_{transmit} - \sum_{j \in F(i)} p_j \cdot \tau_j + (1 - p_j) \min [Q_j, T]}{\tau_i - \min [Q_i, T]}, 1 \right]$$

Επιπλέον, για την περίπτωση $\tau_i \leq \min [Q_i, T]$ και λαμβάνοντας της σχέσεις (23b) και (24), η βέλτιστη τιμή της μεταβλητής p_i στο διάστημα $[0, 1]$ η οποία επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $E_i(p_i)$ είναι η τιμή 1,

Οπότε, τελικά έχουμε:

$$p_i = \begin{cases} \min \left[\frac{Delay_{Constraint} - \min [Q_i, T] - t_{transmit} - \sum_{j \in F(i)} p_j \cdot \tau_j + (1 - p_j) \min [Q_j, T]}{\tau_i - \min [Q_i, T]}, 1 \right] & for \tau_i \geq \min [Q_i, T] \\ 1 & for \tau_i < \min [Q_i, T] \end{cases} \quad (26)$$

4.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΣ ΤΟΝ ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗ LAGRANGE ΤΗΣ SP

Για την επίλυση του κυρίαρχου προβλήματος (MP) απαιτείται ο υπολογισμός του βέλτιστου πολλαπλασιαστή Lagrange λ_i^* , για κάθε (SP) ο οποίος συνδέεται με τον περιορισμό (25). Ο υπολογισμός των πολλαπλασιαστών αυτών εγγυάται την κατανομημένη επίλυση του (MP).

Ορίζουμε ως $\lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_N]$ το διάνυσμα των Lagrange πολλαπλασιαστών που αντιστοιχούν στη χαλάρωση του περιορισμού (26). Η Lagrange συνάρτηση του προβλήματος (SP) δίνεται από την:

$$L(\vec{p}, \vec{\lambda}) = E(p_i) - \lambda_i \left[\min \left[\frac{Delay_{Constraint} - \min[Q_i, T] - t_{transmit} - \sum_{j \in F(i)} p_j \cdot \tau_j + (1 - p_j) \min[Q_j, T]}{\tau_i - \min[Q_i, T]}, 1 \right] - p_i \right]$$

Η υποκείμενη συνάρτηση του δυϊκού προβλήματος και το αντίστοιχο δυϊκό πρόβλημα (Global Dual) είναι συνεπώς:

GD

$$g(\lambda) := \min_{\{p_i\}} L(\lambda) \quad (27)$$

$$\min_{\lambda \geq 0} g(\lambda) \quad (28)$$

$$st. \lambda_i \geq 0$$

Επιπλέον, λόγω της **ΥΠ1** και της κυρτότητας του πρωτεύοντος και του δυϊκού προβλήματος, η επίλυση του δυϊκού προβλήματος επιτυγχάνει και την λύση του πρωτεύοντος.

Συνυπολογίζοντας της απαραίτητες συνθήκες βελτιστότητας 2^{ns} τάξης [83], δηλαδή

$$\nabla_p L(p, \lambda) \Big|_{p=p^*} = 0, \text{ ο μοναδικός πολλαπλασιαστής Lagrange της (SP) (η μοναδικότητα } \lambda = \lambda^*$$

προκύπτει από την κυρτότητα του προβλήματος (SP)), δίνεται μετά από κάποιες πράξεις από:

$$\lambda_i^* = E_{transmit/receive} \left(\min [Q_i, T] - \left\lfloor \frac{T}{\tau_i} \right\rfloor \right) \quad (29)$$

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση, ο αλγόριθμος για την επίλυση των (SP) δέχεται ως είσοδο οποιαδήποτε τιμή τ_i και παρέχει ως έξοδο την αντίστοιχη βέλτιστη τιμή της πιθανότητας συνάθροισης p_i^* καθώς και την βέλτιστη τιμή της συνάρτησης ενέργειας $E_i^*(p)$.

4.3.3 ΕΠΙΛΥΟΝΤΑΣ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΚΥΡΙΑΡΧΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ)

Σύμφωνα με την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, δοθέντος της διανύσματος πιθανότητας συνάθροισης $\vec{p}^*, \forall i \in |N|$, το κυρίαρχο πρόβλημα ορίζεται ως:

$$\begin{aligned} \text{MP: } \min_{\mathbf{p}} \sum_i^N E_i^*(\mathbf{p}) & \quad (30) \\ \text{st. } \tau_i \geq 0 & \end{aligned}$$

Προκειμένου να επιλύσουμε το (MP), εφαρμόζουμε μία μέθοδο υπο-βαθμίδων βασισμένοι στο [82], [84] και [85]. Η επιλογή της υποκινείται αφενός από το γεγονός ότι η κλίση (gradient) της αντικειμενικής συνάρτησης του (MP) είναι δύσκολο να υπολογιστεί, και αφετέρου, από το γεγονός ότι στο [82] και [84] αποδεικνύεται πως οι υπο-βαθμίδες (subgradient) της κάθε E_i^* είναι ίσες με το βέλτιστο πολλαπλασιαστή Lagrange που αντιστοιχεί στον περιορισμό (26) στο (SP).

Συνεπώς, $\nabla_{\mathbf{p}} E_i^*(\mathbf{p}) = \lambda_i^*(p_i)$, η οποία υπολογίζεται στην (29). Άρα η συνολική τιμή της συνάρτησης υπο-βαθμίδων υπολογίζεται ως:

$$\nabla_{\mathbf{p}} E_i^*(\mathbf{p}) = \sum_{i \in V} \lambda_i^*(\mathbf{p}) \quad (31)$$

Το κυρίαρχο πρόβλημα (MP) μπορεί συνεπώς να λυθεί με χρήση μεθόδων υποβαθμίδων ανανεώνοντας την περίοδο πραγματοποίησης συνάθροισης. Ο αλγόριθμος MP λειτουργεί σύμφωνα με τον παρακάτω κανόνα ανανέωσης:

$$\begin{bmatrix} \tau_1(t+1) \\ \vdots \\ \tau_N(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \vdots \\ \tau_N(t) \end{bmatrix} \pm \varepsilon(t) \begin{bmatrix} \lambda_1^*(p_1(t)) \\ \vdots \\ \lambda_N^*(p_N(t)) \end{bmatrix} \quad (32)$$

όπου, το t δηλώνει τις επαναλήψεις του αλγορίθμου και το $\varepsilon(t)$ το βήμα.

Ο παραπάνω βηματικός αλγόριθμος μπορεί να εκτελεστεί σε κάθε αισθητήρα i ανεξάρτητα, γνωρίζοντας μόνον της αντίστοιχους πολλαπλασιαστές Lagrange λ_i^* του προβλήματος (SP), οι οποίοι με την σειρά τους είναι ανεξάρτητα υπολογίσιμοι από τον κάθε αισθητήρα μέσω του αλγορίθμου SP.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, όλοι οι αλγόριθμοι οι οποίοι αποτελούν και άρα επιλύουν το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, δηλαδή ο SP και MP, επιλύονται κατανεμημένα από κάθε κόμβο αισθητήρα στο δίκτυο.

4.3.4 ΣΥΓΚΛΙΣΗ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΤΗΤΑ

Στην ενότητα αυτή επιχειρηματολογούμε υπέρ της σύγκλισης και της βελτιστότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Αρχικά, όσο αφορά στο βήμα ανανέωσης που έχει επιλεγεί για τον αλγόριθμο της (32), αποτελεί ένα φθίνον βήμα $\varepsilon(t)$, με της ακόλουθες ιδιότητες:

$$\varepsilon(t) \geq 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0 \text{ και } \sum_t^{\infty} \varepsilon(t) = \infty$$

Σύμφωνα με το [83], η χρήση της φθίνοντος βήματος, για παράδειγμα του $\varepsilon(t) = \frac{t}{\beta+t}$ όπου το $\beta > 1$ είναι μια σταθερά, ο αλγόριθμος υποβαθμίδων θα συγκλίνει, δηλαδή ισχύει

$$\mathbf{p}(t) \rightarrow \mathbf{p}^* \text{ καθώς το } t \rightarrow \infty$$

4.4 ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

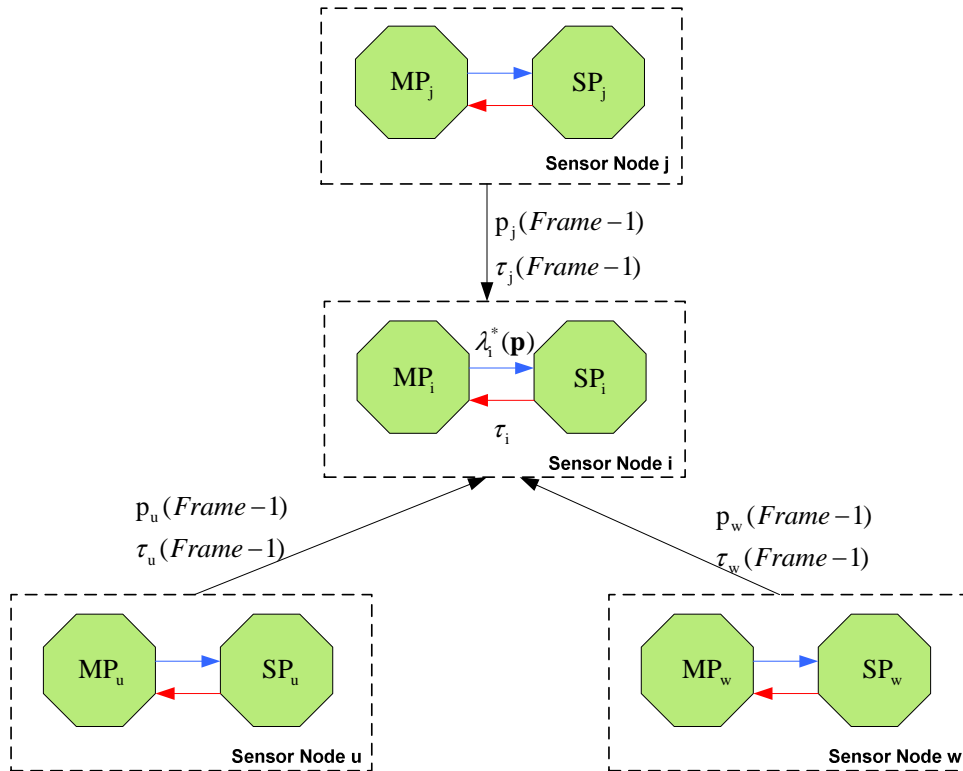
Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε έναν κατανεμημένο αλγόριθμο (Aggregation – based Energy Management- **AEM**) ο οποίος με βάση την ανάλυση της παραγράφου 4.3 εφαρμόζεται σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με στόχο την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Την πρώτη φορά της λειτουργίας του αλγορίθμου κάθε κόμβος αρχικοποιεί την πιθανότητα συνάθροισης p_i σε μια τιμή από το διάστημα $[0,1]$, και την περίοδο συνάθροισης ίση με $\tau_i = T$, όπου T το πλήθος των χρονοσχιμών του πλαισίου. Στην αρχή κάθε πλαισίου τρέχει ο παρακάτω αλγόριθμος, όπως αυτός παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 3. Κάθε κόμβος $i \in N$ λαμβάνει από τα παιδιά $u \in Ch(i)$ και από τον πατέρα του $j \in F(i)$ τις πιθανότητες και τις χρονικές περιόδους συνάθροισης του προηγούμενου πλαισίου. Οι τιμές αυτές χρειάζονται για τον υπολογισμό της αναμενόμενης κίνησης από τα παιδιά του καθώς και της αναμενόμενης καθυστέρησης ενός πακέτου από τα πιο πάνω επίπεδα στο δέντρο συλλογής, σύμφωνα με την σχέση (26). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τιμές αυτές μπορούν να προστεθούν στα ήδη υπάρχοντα πακέτα σηματοδότησης στο δίκτυο, ώστε να μην το επιβαρύνουν. Κάθε κόμβος i μπορεί τώρα να επιλύσει το υπο-πρόβλημα (SP) και να υπολογίσει τα $p_i^*(t)$ και τον πολλαπλασιαστή Lagrange $\lambda_i^*(p_i(t))$, για δεδομένο $\tau_i(t)$. Στην συνέχεια, επιλύεται το κυρίαρχο πρόβλημα (MP) όπου με γνώση των πολλαπλασιαστών Lagrange υπολογίζεται το $\tau_i(t+1)$. Ελέγχεται το κριτήριο τερματισμού σύγκλισης, και αν ισχύει, η τιμή του $\tau_i(t+1)$ χρησιμοποιείται για την επίλυση των SP. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνει και να καταλήξουμε στα βέλτιστα \mathbf{p}^* και $\boldsymbol{\tau}^*$.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΕΜ

| Αρχικοποίηση | Για $Frame = 0, \tau_i = T$ και $p_i \in [0,1]$ | | |
|--------------|--|--|--|
| Βήμα | Λειτουργία | Είσοδος | Έξοδος |
| 1 | Αποστολή σε κάθε κόμβο $i \in N$ των $p_u(Frame - 1), \tau_u(Frame - 1), u \in Ch(i),$ και $p_j(Frame - 1), \tau_j(Frame - 1), j \in F(i)$ | | |
| 2 | Επίλυση των SP για κάθε κόμβο – αισθητήρα σύμφωνα με την παράγραφο 4.3.1 και 4.3.2, υπολογίζοντας την βέλτιστη πιθανότητα συνάθροισης $p_i^*(t)$ και τον πολλαπλασιαστή Lagrange $\lambda_i^*(\mathbf{p}(t))$, για δεδομένο $\tau_i(t)$ | $Delay_{constraint}$ $\tau_i(t)$ | $p_i^*(t)$ $\lambda_i^*(\mathbf{p}(t))$ |
| 3 | Επίλυση του κυρίαρχου προβλήματος (MP) ελαχιστοποίησης και ανανέωση του $\tau_i(t + 1)$ σύμφωνα με την παράγραφο 4.3.3 | $p_i^*(t)$ $\lambda_i^*(\mathbf{p}(t))$ | $\tau_i(t + 1)$ |
| 4 | Θέσε $t \leftarrow t + 1$ και στείλε $\tau_i(t + 1)$. Αν η συνθήκη τερματισμού δεν έχει ικανοποιηθεί πηγαίνει στο βήμα 2. Αλλιώς ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει και έχουν υπολογιστεί τα βέλτιστα \mathbf{p}^* και $\boldsymbol{\tau}^*$ | | $(\mathbf{p}^*, \boldsymbol{\tau}^*)$ |

Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται σχηματικά ο παραπάνω αλγόριθμος.



ΕΙΚΟΝΑ 17: Σχηματική Αναπαράσταση του αλγορίθμου AEM

Όπως φαίνεται σχηματικά παραπάνω, στην αρχή κάθε χρονικού πλαισίου, ο κόμβος i λαμβάνει από τα παιδιά του, κόμβους u και w , καθώς και από τον πατέρα του, κόμβο j , τις τιμές για τις πιθανότητες p και χρονικές περιόδους συνάθροισης τ για το προηγούμενο χρονικό πλαίσιο. Οι τιμές αυτές χρειάζονται όπως αναφέρθηκε για να υπολογίσει α) την κίνηση που αναμένεται από τα παιδιά του για το τρέχον χρονικό πλαίσιο και β) τη μέση καθυστέρηση την οποία θα συναντήσει ένα πακέτο καθώς μεταδίδεται προς το κέντρο συλλογής. Ο κόμβος i με το αλγόριθμο AEM υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές πιθανότητας και περιόδου συνάθροισης, τις οποίες χρησιμοποιεί στο τρέχων πλαίσιο λειτουργίας. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο $i \in N$ του δικτύου στην αρχή κάθε χρονικού πλαισίου.

4.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

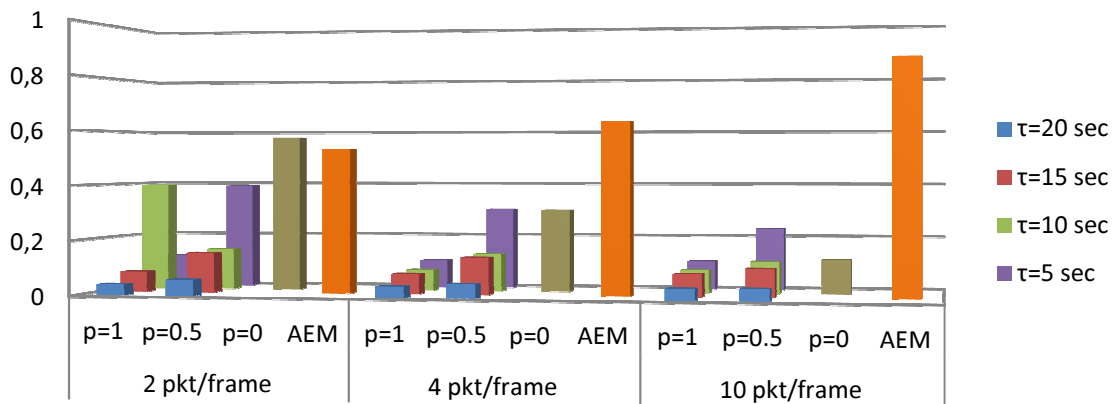
Στην ενότητα αυτή παραθέτουμε ενδεικτικά αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία αποδεικνύουν την αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου, ενώ και επιβεβαιώνουν την εφαρμοσιμότητα του στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα αποτελέσματα επιδεικνύουν πως επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση όσον αφορά στην πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης και την κατανάλωση ενέργειας, συγκρινόμενα με συλλογή δεδομένων δίχως την

πραγματοποίηση συνάθροισης καθώς και με τεχνικές οι οποίες πραγματοποιούν συνάθροιση με σταθερή πιθανότητα p_i και για προκαθορισμένη περίοδο συνάθροισης τ_i .

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο περιβάλλον της Matlab [86] για δίκτυο αισθητήρων 50 κόμβων ομοιόμορφα κατανομημένους σε τετραγωνική περιοχή 200 m x 200 m. Το κέντρο συλλογής βρίσκεται τοποθετημένο στην άκρη του δικτύου (κάτω αριστερά) και για τη δημιουργία του δέντρου συλλογής χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ο οποίος περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3. Η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων είναι ίση με 48 m και οι κόμβοι έχουν γνωστές αποστάσεις 20-30m. Το μοντέλο ενέργειας το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό το οποίο περιγράφηκε στο [26], όπου οι κόμβοι καταναλώνουν ενέργεια κάθε φορά που λαμβάνουν και μεταδίδουν πακέτα μετρήσεων. Κάθε πακέτο έχει μέγεθος 100 bytes, είτε πρόκειται για αρχικό πακέτο μετρήσεων είτε για συναθροισμένο πακέτο. Το μέγεθος κάθε πλαισίου είναι 20 χρονοσχισμές, η κάθε μία διάρκειας 1 sec. Συνολικά έχουν πραγματοποιηθεί 50 ανεξάρτητα και με τις ίδιες αρχικοποιήσεις πειράματα για 1000 πλαίσια, και παρακάτω παρουσιάζεται η μέση τιμή αυτών. Αξίζει να επισημανθεί ότι αντίστοιχες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για μεγαλύτερου μεγέθους πλαίσια (π.χ. πλαίσια με 100 χρονοσχισμές) και διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος του πλαισίου δεν επηρεάζει τη λειτουργία του αλγορίθμου όσον αφορά στην κατανάλωση της ενέργειας και την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης. Τέλος, οι κόμβοι αποθηκεύουν πληροφορία, σχετικά με την πιθανότητα και την περίοδο συνάθροισης, για τους γείτονες τους για το προηγούμενο χρονικό πλαίσιο και χρησιμοποιούν τεχνικές εκθετικού προσδιορισμού μέσω $\alpha = 0,5$, όπως αναφέρθηκε στην ΥΠ3 της ενότητας 4.2.4.

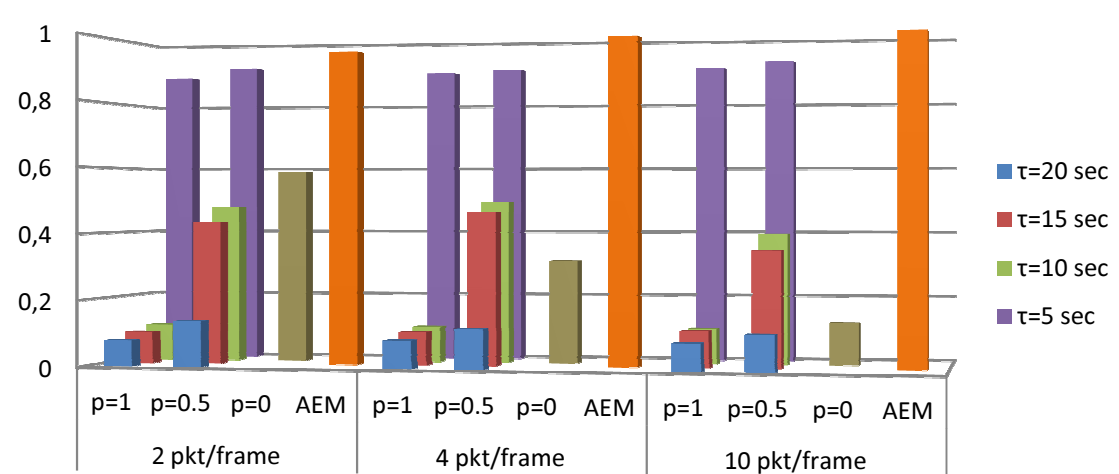
Αρχικά, επιθυμούμε να αξιολογήσουμε την απόδοση του αλγορίθμου AEM όσο αφορά στην πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης. Υπενθυμίζουμε ότι ένα πακέτο θεωρείται ότι έχει ληφθεί επιτυχημένα στο κέντρο συλλογής αν έχει φτάσει εντός του αρχικού χρονικού περιορισμού D . Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για 3 είδη κίνησης, μικρή - 2 πακέτα/πλαίσιο, μεσαία - 4 πακέτα/πλαίσιο και υψηλή - 10 πακέτα/πλαίσιο, και για δύο διαφορετικούς χρονικούς περιορισμούς, αυστηρό - 20 sec (1 πλαίσιο) και τυπικό - 40 sec (2 πλαίσια). Η προτεινόμενη μέθοδος συγκρίνεται με έναν απλό αλγόριθμο συλλογής δεδομένων ο οποίος δεν πραγματοποιεί συνάθροιση καθώς επίσης και με μεθόδους οι οποίες πραγματοποιούν συνάθροιση με σταθερή πιθανότητα ($\gamma = 1$ και $\gamma = 0,5$) και για σταθερή χρονική περίοδο ($\tau = 5:5:20$ sec). Όλοι οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιούν το δέντρο συλλογής για την δρομολόγηση των πακέτων.

Πιθανότητα Επιτυχημένης Μετάδοσης



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης για χρονικό περιορισμό $D = 20sec$

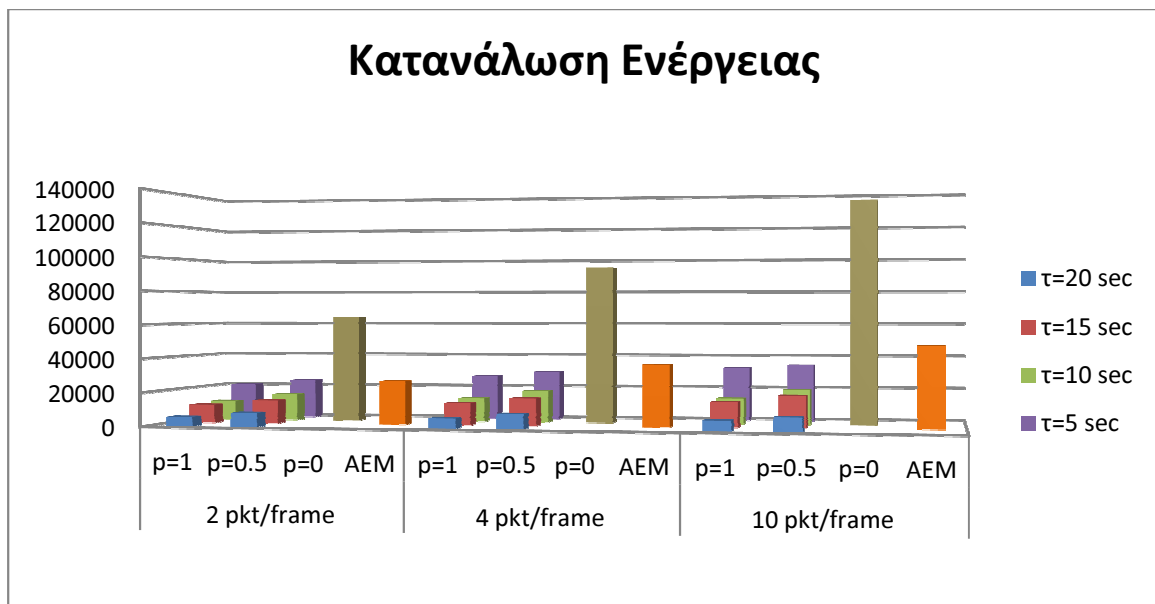
Πιθανότητα Επιτυχημένης Μετάδοσης



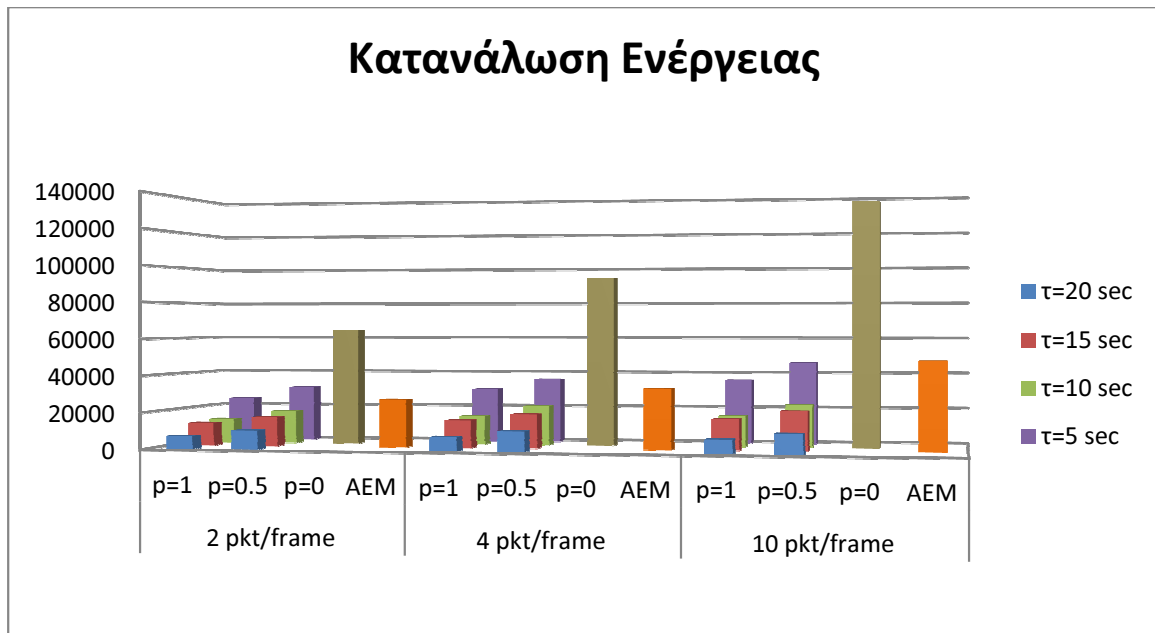
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης για χρονικό περιορισμό $D = 40sec$

Στην περίπτωση της χαμηλής κίνησης και για αυστηρό χρονικό περιορισμό, Διάγραμμα 18, παρατηρούμε ότι η περίπτωση όπου δεν πραγματοποιείται συνάθροιση παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά, και αυτό διότι με χαμηλή κίνηση στο δίκτυο ένα πακέτο επιτυγχάνει μικρότερη μέση καθυστέρηση, οπότε και φτάνει στο κέντρο συλλογής εντός χρονικού

περιορισμού, αν δεν πραγματοποιηθεί συνάθροιση στους ενδιάμεσους κόμβους. Όταν όμως αυξάνεται η διάρκεια του χρονικού περιορισμού (Διάγραμμα 19), ο αλγόριθμος AEM παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα για όλα τα φορτία στο δίκτυο. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν το φορτίο στο δίκτυο είναι υψηλό, ο αλγόριθμος εμφανίζει την υψηλότερη πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης (ποσοστό περίπου 90%) διότι η διαδικασία της συνάθροισης επιτυγχάνει την μείωση του συνολικού φορτίου στο δίκτυο και άρα την έγκαιρη λήψη των πακέτων μετρήσεων στο κέντρο συλλογής. Όπως παρατηρήθηκε από τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων, για υψηλό φορτίο στο δίκτυο αποφασίζονται περισσότερες συναθροίσεις (μεγαλύτερες τιμές της πιθανότητας γαλλά για μικρό χρονικό διάστημα, οπότε ελαττώνεται το συνολικό φορτίο. Οι μέθοδοι συνάθροισης με πιθανότητα 1 και πιθανότητα 0.5 και με σταθερούς περιόδους συνάθροισης τ , επιτυγχάνουν χαμηλά ποσοστά επιτυχημένης μετάδοσης κυρίως για αυστηρό χρονικό περιορισμό. Παρατηρούμε, επίσης, ότι όσο μεγαλύτερη η χρονική περίοδος συνάθροισης τόσο μικρότερη η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20: Κατανάλωση Ενέργειας για χρονικό περιορισμό $D = 20sec$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21: Κατανάλωση Ενέργειας για χρονικό περιορισμό $D = 40sec$

Η κατανάλωση της ενέργειας για όλες τις εξεταζόμενες μεθόδους, για διαφορετικό φορτίο και χρονικό περιορισμό, παρουσιάζεται στα παραπάνω διαγράμματα. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο περισσότερο χρόνο ένας κόμβος πραγματοποιεί συνάθροιση τόσο μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη έχει. Ταυτόχρονα όμως, όπως παρατηρήθηκε για την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης οι μέθοδοι με σταθερή πιθανότητα και χρόνο συνάθροισης παρουσιάζουν χαμηλά ποσοστά επιτυχίας (για $\tau = 10 sec, \tau = 15 sec, \tau = 20 sec$) οπότε και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας οφείλεται εν μέρει στο μικρό αριθμό πακέτων τα οποία εξυπηρετεί το σύστημα. Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε τον προτεινόμενο αλγόριθμο όσο αφορά στην επίτευξη της ελαχιστοποίησης της ενέργειας το συγκρίνουμε με τα αποτελέσματα για σταθερό $\tau = 5 sec$ και $D = 40 sec$, Διάγραμμα 21, όπου και εμφανίζεται ο αλγόριθμος AEM να καταναλώνει ελαφρώς (10%) λιγότερη ενέργεια.

Επιπλέον, εισάγουμε τον δείκτη του κέρδους πληροφορίας, όπου μετράμε τις επιπτώσεις της πραγματοποίησης συνάθροισης στην ποιότητα της πληροφορίας, δηλαδή σε τι ποσοστό η αρχική πληροφορία φτάνει στο κέντρο συλλογής. Το κέρδος πληροφορίας ορίζεται από την σχέση:

$$Info_{gain} = 1 - Info_{loss}/Pkts_arrivals,$$

και η τιμή της μεταβλητής $Info_{loss}$ ορίζεται ως:

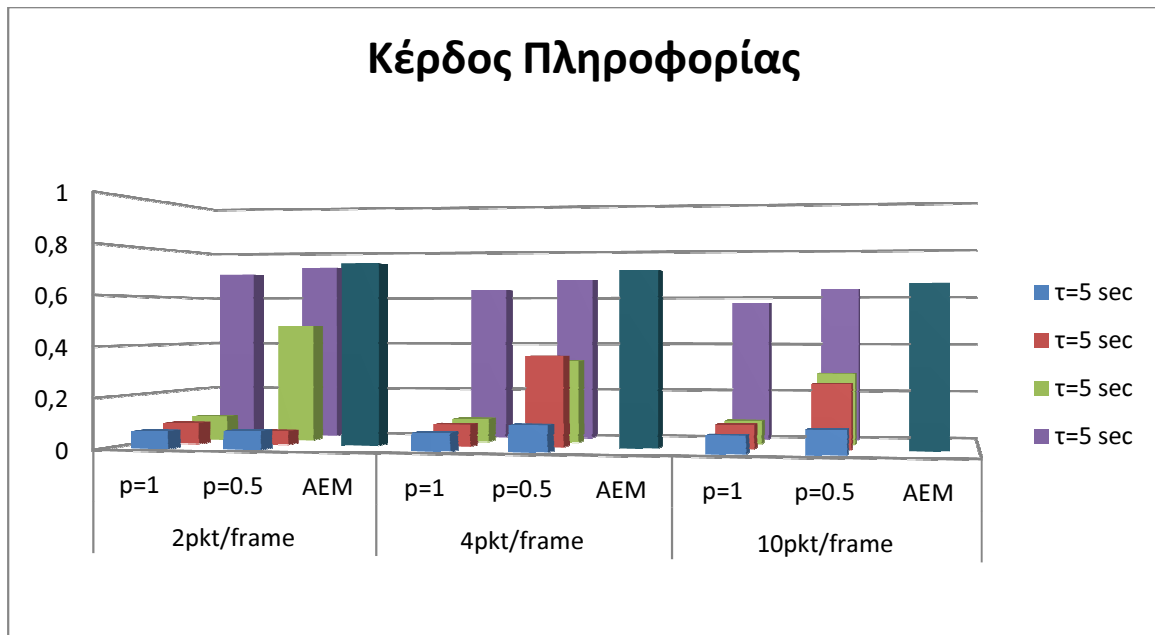
$$Info_{loss} = \sum_{i=1}^{levels} aggr_cost_function(i) * Pkts_aggregated_i_times \quad (33)$$

Θεωρούμε, δηλαδή, ότι κάθε φορά που πραγματοποιείται συνάθροιση σε ένα πακέτο εμφανίζεται απώλεια ποσοστού της αρχικής του πληροφορίας ανάλογα με τη συνάρτηση

$aggr_cost_function(i)$. Κάθε πακέτο θα υποστεί το μέγιστο τόσες φορές συνάθροιση όσα είναι και τα επίπεδα του δέντρου συλλογής, $|levels|$. Τα πακέτα τα οποία φτάνουν στο κέντρο συλλογής αναλύονται και βρίσκουμε κάθε τελικό πακέτο πόσες φορές έχει συναθροιστεί κατά την δρομολόγηση του, $Pkts_aggregated_i_times$. Για τον υπολογισμό της μετρικής κέρδους πληροφορίας κανονικοποιούμε το υπολογιζόμενο $Info_{loss}$ διαιρώντας το με τα συνολικά πακέτα τα οποία έφτασαν στο κέντρο συλλογής και στη συνέχεια το αφαιρούμε από το 1.

Τα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνουν τις μεθόδους συνάθροισης με σταθερή πιθανότητα και περίοδο με τον προτεινόμενο αλγόριθμο AEM για χρονικό περιορισμό $D = 40 sec$. Ο αλγόριθμος κόστους συνάθροισης $aggr_cost_function(i)$, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και ορίζει το κόστος στην ακρίβεια της πληροφορίας είναι, $aggr_cost_function(i) = (10 - i)/10$, δηλαδή για $i = 2$ (ένα πακέτο έχει συναθροιστεί 2 φορές) έχει απωλέσει το 20% της αρχικής του πληροφορίας. Η επιλεγμένη συνάρτηση κόστους είναι αρκετά απλοϊκή και ίσως λίγο αυστηρή, αλλά επιτυγχάνει να δείξει το κόστος της συνάθροισης στην πληροφορία στο βαθμό το οποίο το χρησιμοποιούμε. Άλλοι, πιο σύνθετοι, τύποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να προσομοιώσουν διάφορες συναρτήσεις συνάθροισης.

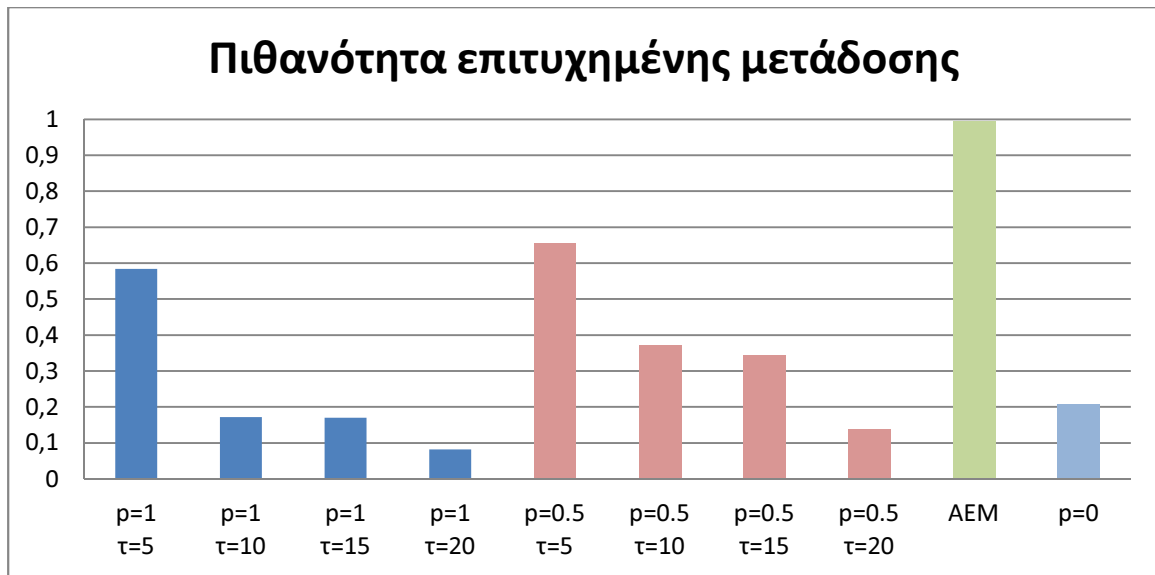
Στο Διάγραμμα 22 παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη η περίοδος συνάθροισης τόσο μικρότερο το κέρδος πληροφορίας, καθώς συναθροίζονται περισσότερα πακέτα και άρα σε μεγάλο ποσοστό χάνουν την αρχική μετρούμενη πληροφορία. Η μέθοδος AEM επιτυγχάνει αύξηση στην ακρίβεια των δεδομένων καθώς δεν πραγματοποιεί συνάθροιση σε κάθε κόμβο, και άρα σε κάθε επίπεδο, όπως οι υπόλοιπες συγκρινόμενες μέθοδοι, αλλά επιλέγει τα βέλτιστα σημεία. Μάλιστα, παρατηρήθηκε ότι η συνάθροιση πραγματοποιείται κυρίως στα πρώτα επίπεδα του δέντρου συλλογής, δηλαδή στους κόμβους οι οποίοι είναι πιο κοντά στο κέντρο συλλογής, καθώς εκεί προκαλείται και η μεγαλύτερη συμφόρηση.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22: Κέρδος πληροφορίας για χρονικό περιορισμό $D = 40sec$

Το χαρακτηριστικό του προτεινόμενου αλγόριθμου είναι η ικανότητα του να προσαρμόζεται στις αλλαγές στην κίνηση στο δίκτυο και στις απαιτήσεις της εφαρμογής, δηλαδή αλλαγές στο χρονικό περιορισμό, επιλέγοντας κάθε φορά τις βέλτιστες πιθανότητες και περιόδους συνάθροισης. Για να αξιολογήσουμε την επίδοση του αλγορίθμου σε ένα τέτοιο περιβάλλον προσομοιώσαμε το ακόλουθο σενάριο.

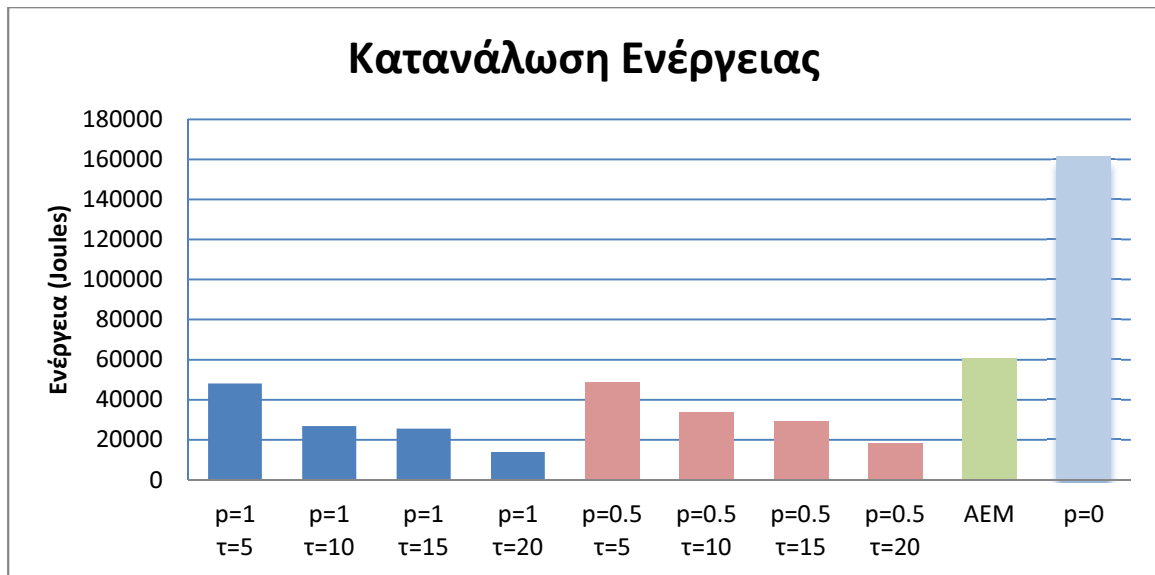
Στην παραπάνω περιγραφείσα τοπολογία οι κόμβοι γεννάνε πακέτα με ρυθμό 0.2 πακέτα το δευτερόλεπτο τα οποία έχουν χρονικό περιορισμό 40 δευτερόλεπτα. Μετά από μια περίοδο 50 χρονικών πλαισίων συντελείται γεγονός το οποίο απαιτεί την έγκαιρη μετάδοση του στο κέντρο συλλογής (δηλαδή ενός χρονικού περιορισμού 20 δευτερολέπτων) και για την σύλληψη του γεγονότος οι κόμβοι γεννάνε πακέτα με μεγαλύτερο ρυθμό, δηλαδή με ρυθμό 0.5 πακέτα το δευτερόλεπτο. Όταν το γεγονός λήξει (μετά από 50 χρονικά πλαίσια) το δίκτυο επιστρέφει στην πρότερη κανονική του λειτουργία.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης σε δυναμικό περιβάλλον

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 23, ο αλγόριθμος AEM επιτυγχάνει πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης πολύ κοντά στο 1 (0,98) διότι σε κάθε χρονικό πλαίσιο υπολογίζει την βέλτιστη πιθανότητα και περίοδο συνάθροισης με βάση πρότερη αλλά και τρέχουσα υπολογίζουσα πληροφορία. Για το λόγο αυτό επιτυγχάνει να προσαρμοστεί γρήγορα στις αυξημένες ανάγκες του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί πως το πλήθος k χρονικών πλαισίων για τα οποία κρατάει τις πιθανότητες και τις περιόδους συνάθροισης των γειτόνων επηρεάζει την προσαρμοστικότητα του αλγορίθμου. Μικρό k συνάδει με μικρότερη μνήμη και κατά επέκταση ταχύτερη προσαρμογή με αντίστοιχο κόστος στην ακρίβεια.

Στο Διάγραμμα 24 παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας για το προσομοιωμένο σενάριο λειτουργίας του δικτύου. Η προτεινόμενη μέθοδος καταναλώνει μικρή κατανάλωση ενέργειας εκπληρώνοντας το σκοπό του αλγορίθμου, δηλαδή την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Η μικρότερη κατανάλωση την οποία εμφανίζουν οι συγκρινόμενες μέθοδοι οφείλεται στο γεγονός ότι δεν επιτυγχάνουν την αποστολή όλων των πακέτων στο κέντρο συλλογής παρουσιάζοντας αυξημένα επίπεδα χαμένων πακέτων και άρα δαπανούν μικρότερη ενέργεια στην επικοινωνία.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24: Κατανάλωση ενέργειας σε δυναμικό περιβάλλον

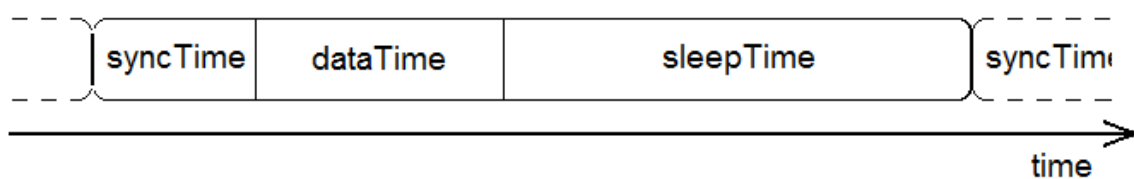
Τέλος, επικεντρωνόμαστε στις αλγοριθμικές ιδιότητες του προτεινόμενου αλγόριθμου AEM, και ειδικότερα στο ρυθμό σύγκλισης, καθώς αυτό επηρεάζει την πρακτικότητα και εφαρμοσιμότητα του. Στις προσομοιώσεις τις οποίες πραγματοποιήσαμε, παρατηρήσαμε ότι για το 90% περιπτώσεων ο μέσος αριθμών επαναλήψεων που απαιτούνται ώστε ο αλγόριθμος AEM να μεταβεί σε ένα σταθερό σημείο λειτουργίας, (δηλαδή να συγκλίνει η (32) είναι 15 επαναλήψεις, και ποτέ πάνω από 20. Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως στην περίπτωση ενός χρονικού πλαισίου 100 χρονοσχισμών ο χρόνος σύγκλισης δεν ξεπερνά το 15% αυτού.

5 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΚΡΟΑΣΗΣ / ΥΠΝΟΥ

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3 της βιβλιογραφικής έρευνας, η χρήση ενεργειακών πρωτοκόλλων στο επίπεδο πρόσβασης μέσου, και πιο συγκεκριμένα η εναλλαγή της κατάστασης λειτουργίας των αισθητήρων (ενεργή - ύπνος) αποτελεί μια διαφορετική προσέγγιση για την εξοικονόμηση ενέργειας στα δίκτυα αισθητήρων. Για το λόγο αυτό σχεδιάσαμε ένα απλό πρωτόκολλο στο επίπεδο αυτό με σκοπό να εκτιμήσουμε τα ενεργειακά του οφέλη. Βασιζόμενοι στο πρωτόκολλο SMAC [61], θέτουμε περιοδικά τους αισθητήρες του δικτύου σε κατάσταση ύπνου με σκοπό τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο των αισθητήρων. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο χρησιμοποιεί το δέντρο συλλογής δεδομένων που προτάθηκε στην ενότητα 3.3, το οποίο δημιουργεί πολλαπλά υπο-δέντρα με ρίζα το κέντρο συλλογής. Οι κόμβοι που ανήκουν σε κάθε υπο-δέντρο συγχρονίζονται μεταξύ τους ώστε να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση στην συλλογή δεδομένων που επιφέρει ο περιοδικός ύπνος των αισθητήρων. Παράλληλα, πραγματοποιείται και συνάθροιση δεδομένων καθώς αυτά μεταδίδονται προς το κέντρο συλλογής, η διάρκεια της οποίας εξαρτάται πλέον από το πρόγραμμα που ακολουθεί κάθε κόμβος.

5.1 ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ SMAC

Το βασικό μοντέλο λειτουργίας του πρωτοκόλλου SMAC αναπαρίστανται στην Εικόνα 18. Ο χρόνος χωρίζεται σε διακριτά τμήματα τα οποία αποτελούν ένα κύκλο (cycleTime). Κάθε κύκλος χωρίζεται στη συνέχεια σε ενεργή περίοδο και περίοδο ύπνου, όπου κατά την ενεργή περίοδο πραγματοποιείται η λήψη και αποστολή πακέτων (dataTime) καθώς και ανταλλαγή των πακέτων συγχρονισμού (syncTime). Ο κάθε κόμβος κοιμάται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (sleepTime), έπειτα ξυπνάει και ακούει να δει εάν υπάρχει κάποιος γειτονικός κόμβος που θέλει να επικοινωνήσει μαζί του (dutyCycle). Την χρονική διάρκεια κατά την οποία ο κόμβος βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου, απενεργοποιεί τον πομποδέκτη του και ενεργοποιεί έναν μετρητή για να ξυπνήσει ξανά αργότερα.



ΕΙΚΟΝΑ 18: Χρονική δομή κύκλου ακρόασης / ύπνου

Αρχικά κάθε κόμβος χρειάζεται να επιλέξει ένα πρόγραμμα και να το ανταλλάξει με τους γείτονες του. Ο κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα προγραμμάτων στον οποίο καταχωρεί τα προγράμματα όλων των γνωστών του γειτόνων. Ακολουθεί τα παρακάτω βήματα για να επιλέξει το πρόγραμμα του και να καθιερώσει τον πίνακα προγραμμάτων του.

1. Ο κόμβος αρχικά ακούει για ένα συγκεκριμένο διάστημα. Εάν δεν ακούσει την ανακοίνωση προγράμματος από έναν άλλο κόμβο, διαλέγει τυχαία μια χρονική στιγμή για να κοιμηθεί και αμέσως διαφημίζει το πρόγραμμά του μέσα σε ένα μήνυμα SYNC, υποδειχνοντας πως θα κοιμηθεί μετά από t δευτερόλεπτα. Ένας τέτοιος κόμβος ονομάζεται «συγχρονιστής», διότι διαλέγει το πρόγραμμα του ανεξάρτητα και αναγκάζει άλλους κόμβους να συγχρονιστούν μαζί του.
2. Εάν ο κόμβος δεχτεί ένα πρόγραμμα από έναν γείτονα πριν προλάβει να επιλέξει το δικό του, το ακολουθεί ορίζοντάς το σαν το δικό του. Ένας τέτοιος κόμβος ονομάζεται ακόλουθος. Έπειτα, ο κόμβος αυτός περιμένει για ένα τυχαίο διάστημα t_d και διαφημίζει και αυτός το πρόγραμμα, υποδεικνύοντας πως θα κοιμηθεί σε χρόνο $t - t_d$ δευτερόλεπτα. Η τυχαία καθυστέρηση χρησιμεύει στην αποφυγή συγκρούσεων έτσι ώστε πολλαπλοί ακόλουθοι που θα κινητοποιηθούν από τον ίδιο συγχρονιστή, να μην συγκρουστούν κατά την αναμετάδοση του προγράμματος.
3. Εάν ένας κόμβος λάβει ένα διαφορετικό πρόγραμμα αφότου έχει επιλέξει και μεταδώσει το δικό του, υιοθετεί και τα δύο (δηλ. προγραμματίζει τον εαυτό του ώστε να ξυπνάει την ώρα που ξυπνάει και ο γείτονας του και ο ίδιος). Τέλος, πριν κοιμηθεί διαφημίζει το πρόγραμμά του.

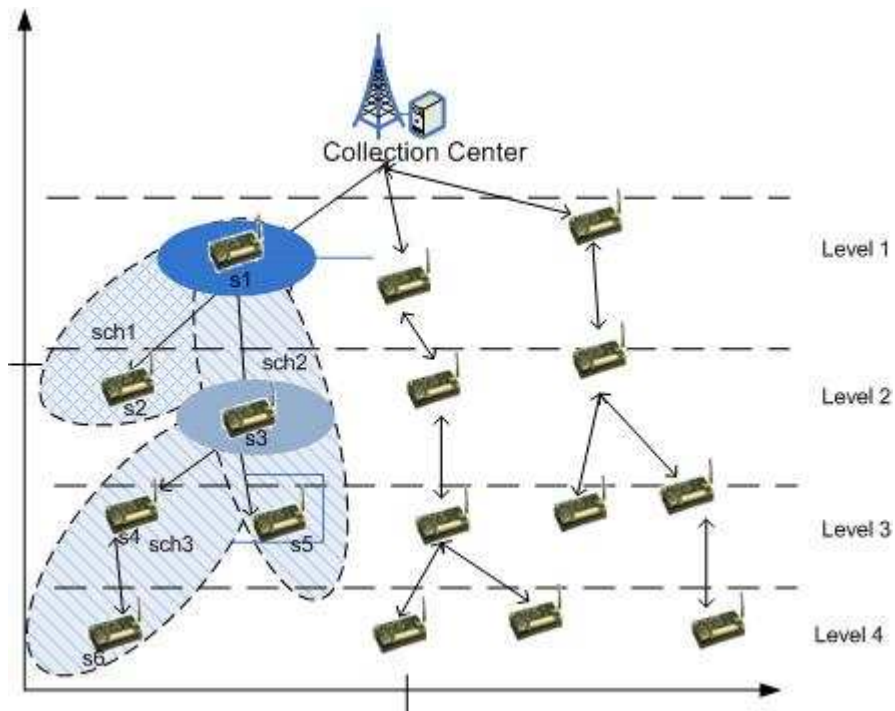
Το παραπάνω μοντέλο ακρόασης/ύπνου απαιτεί συγχρονισμό μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Παρότι μεγάλοι χρόνοι ακρόασης έχουν ανοχή σε σφάλματα στους ωρολογιακούς μηχανισμούς, οι γείτονες κόμβοι χρειάζεται περιοδικά να ανανεώνουν τα μεταξύ τους προγράμματα για την πρόληψη μακροπρόθεσμου αθροιστικού σφάλματος.

Η ανανέωση αυτή επιτυγχάνεται με την αποστολή ενός πακέτου SYNC. Το πακέτο SYNC είναι πολύ μικρό και περιέχει τη διεύθυνση του αποστολέα και την χρονική στιγμή του επόμενου ύπνου του. Η χρονική στιγμή του επόμενου ύπνου είναι σχετική με την στιγμή που ο αποστολέας ολοκληρώνει τη μετάδοση του πακέτου SYNC και συμπίπτει σχεδόν με τη στιγμή που οι παραλήπτες θα λάβουν το πακέτο (θεωρούμε ότι η καθυστέρηση λόγω μετάδοσης είναι αμελητέα). Οι παραλήπτες θα ρυθμίσουν τους μετρητές τους αμέσως μόλις λάβουν το πακέτο SYNC και θα κοιμηθούν όταν αυτοί σημάνουν.

Για να έχει την δυνατότητα ένας κόμβος να λαμβάνει τόσο πακέτα SYNC όσο και πακέτα δεδομένων, η διάρκεια της ακρόασης διαιρείται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι για την λήψη πακέτων SYNC και το δεύτερο για την λήψη πακέτων RTS όπως φαίνεται στην Εικόνα 18. Το κάθε μέρος χωρίζεται περαιτέρω σε πολλές χρονοσχισμένες ώστε οι αποστολείς να επιδίδονται σε παρατήρηση του καναλιού. Για παράδειγμα, εάν ένας αποστολέας θέλει να στείλει ένα πακέτο SYNC, ξεκινά την παρατήρηση τη στιγμή που ο παραλήπτης αρχίζει να ακούει. Διαλέγει τυχαία μια χρονοσχισμή για να σταματήσει και εάν σε αυτό το διάστημα δεν έχει εντοπίσει άλλη μετάδοση, καταλαμβάνει το μέσο και αμέσως στέλνει το SYNC πακέτο του. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στην περίπτωση πακέτων δεδομένων. Όλοι οι κόμβοι παρατηρούν το κανάλι προτού ξεκινήσουν τη μετάδοση ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις. Εάν κάποιος κόμβος δεν καταφέρει να κερδίσει το μέσο, κοιμάται και ξυπνάει στον επόμενο κύκλο ακρόασης του παραλήπτη του. Τα πακέτα SYNC αποστέλλονται χωρίς τη χρήση RTS/CTS πακέτων. Τα πακέτα δεδομένων ακολουθούν την αλληλουχία του RTS/CTS/DATA/ACK μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη.

5.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΑΚΡΟΑΣΗΣ - ΎΠΝΟΥ

Ως πρωτόκολλο δρομολόγησης των μετρήσεων των αισθητήρων στο κέντρο συλλογής, χρησιμοποιείται το δέντρο συλλογής δεδομένων όπως αυτό παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3. Το κέντρο συλλογής αρχικοποιεί την διαδικασία HELLO και κατασκευάζεται το αντίστοιχο δέντρο συλλογής. Για την αποτελεσματική συλλογή όμως δεδομένων είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός του, έτσι ώστε οι κόμβοι να αρχίσουν να κοιμούνται περιοδικά, αλλά παράλληλα να μπορούν να επικοινωνούν με τον πατέρα τους για να προωθούν τα δεδομένα. Ο συγχρονισμός του δέντρου γίνεται σύμφωνα με το πρωτόκολλο SMAC, αλλά με ορισμένες τροποποιήσεις. Ενώ στο πρωτόκολλο SMAC κάθε κόμβος αισθητήρας συγχρονίζεται με τους όλους ή τους περισσότερους γείτονες, στον αλγόριθμο που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα κάθε κόμβος συγχρονίζεται μόνο με τα παιδιά και τον πατέρα του. Δημιουργούνται κατά αυτόν τον τρόπο υπο-δέντρα συγχρονισμένα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την ροή της πληροφορίας μεταξύ των κόμβων και του κέντρου συλλογής, δίχως τις μεγάλες καθυστερήσεις οι οποίες υπεισέρχονται από τον περιοδικό ύπνο των κόμβων. Η Εικόνα 19 παρουσιάζει σχηματικά το αποτέλεσμα εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου και ο Πίνακας Πίνακας 4 την λειτουργία του.



ΕΙΚΟΝΑ 19: Δημιουργία συγχρονισμένων υπο-δέντρων

Τα πακέτα SYNC δεν αποτελούν μόνο μέρος της φάσης αρχικοποίησης, αλλά ανταλλάσσονται περιοδικά καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου ώστε να διατηρείται ο συγχρονισμός των προγραμμάτων των κόμβων κάθε μονοπατιού.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΔΕΝΤΡΟΥ

Algorithm Schedule Assignment - Tree Synchronization

Each time the algorithm runs the value of HelloCycleNum increments by one

BEGIN

int myLevel(i), i=1,...N, # of sensor nodes,

int myFather(i)

int CycleNum

int HelloCycleNum

myChildrenList = []

while node(i) received HELLO packet

If (isACK == 1) && (CycleNum == HelloCycleNum), // received ACK in current cycle, ACKs from different cycles are discarded

```

        Add node to myChildrenList [node_ID, HelloCycleNum]

    else

        if (isACK != 1) && (CycleNum != HelloCycleNum) &&
        (node(i) != sink) //received new Hello packet

            myLevel(i) = level + 1

            myFather = node_ID

            cycleNum = HelloCycleNum

            send HELLO_ACK to myFather

            broadcast HELLO message

    while node(i)

    wait for period T to receive SYNC packet

    if T expires

        broadcast SYNC packet (t sec)

    else

        if node_ID ∈ mychildrenList || node_ID ∈ Father // received SYNC
packet from my children or my father

            adopt schedule

            broadcast SYNC packet (t - td sec)

        else

            discard packet

    end

END

```

5.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

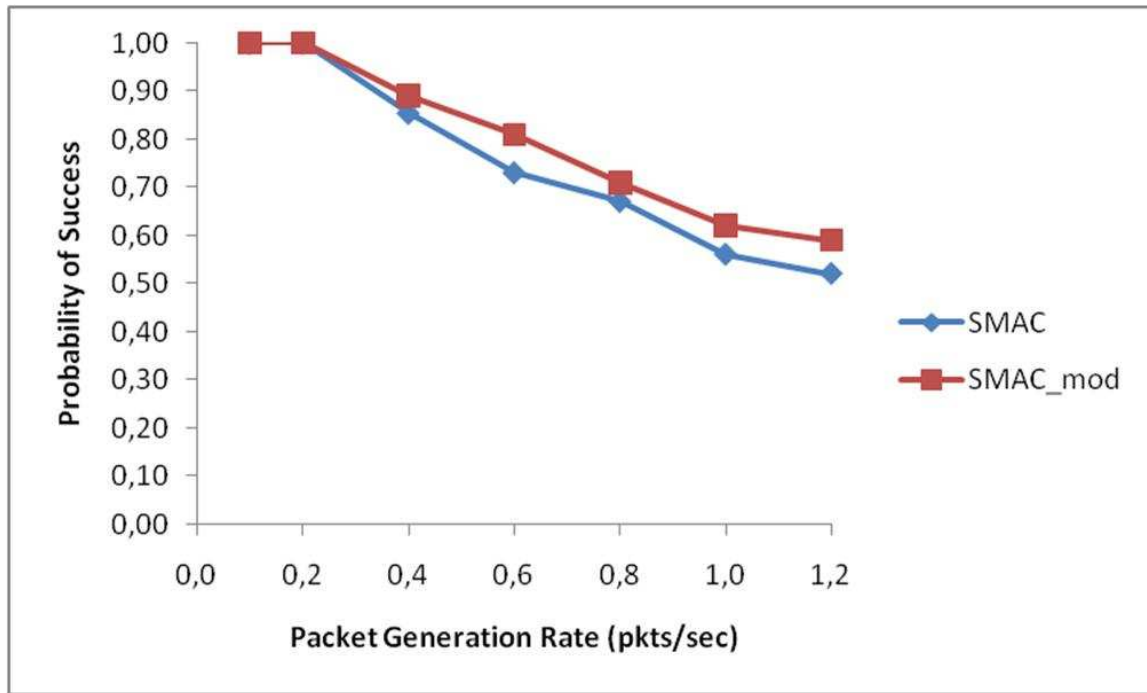
Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγόριθμου, χρησιμοποιήσαμε το NS2 προσομοιωτή, και την αντίστοιχη τοπολογία δικτύου που χρησιμοποιήθηκε στις προηγούμενες μετρήσεις (τοπολογία πλέγματος με 49 κόμβους αισθητήρες). Το μοντέλο ενέργειας το οποίο χρησιμοποιήθηκε, κάνει χρήση του μοντέλου ενέργειας όπως ορίστηκε στην ενότητα 3.4.1 με πρόβλεψη για τον χρόνο κατά τον οποίο ένας κόμβος είτε κοιμάται είτε είναι σε κατάσταση αδρανείας. Πιο αναλυτικά θεωρήθηκε λοιπόν πως ένας κόμβος

καταναλώνει ενέργεια όταν: στέλνει ή λαμβάνει δεδομένα, συλλέγει δεδομένα από το περιβάλλον, βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας καθώς και όταν κοιμάται. Η ενέργεια η οποία κάθε κόμβος καταναλώνει όταν βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας ή κοιμάται, δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το χρόνο.

Τα χαρακτηριστικά του μέσου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, και οι δείκτες απόδοσης οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση των δύο πρωτοκόλλων (SMAC και προτεινόμενου) είναι η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης, η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση και η συνολική ενέργεια η οποία καταναλώθηκε στο σύνολο των κόμβων του δικτύου, αντίστοιχα με τα προηγούμενα πειράματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

| <i>Παράμετρος</i> | <i>Τιμή</i> |
|-----------------------|---|
| Radio bandwidth | 100 kbps |
| Radio transmission | 48m |
| SENSOR packet length | 44 bytes |
| HELLO interval | 10 sec |
| HELLO and SYNC packet | 6 bytes |
| CycleTime | 0.239sec |
| DutyCycle | 60%cycleTime = 0.1434sec |
| SyncPeriod | 10cycles |
| Transmit Power | $E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \cdot k + e_{amp} \cdot k \cdot d$ |
| Receive Power | $E_{Rx}(k) = E_{elec} \cdot k$ |
| Sensing Power | $E_{sense} = 0.00001 \text{ Joule}$ |
| Idle Power | $E_{idle} = 0.0001 \text{ Joule / sec}$ |
| Sleep Power | $E_{sleep} = 0.00001 \text{ Joule / sec}$ |

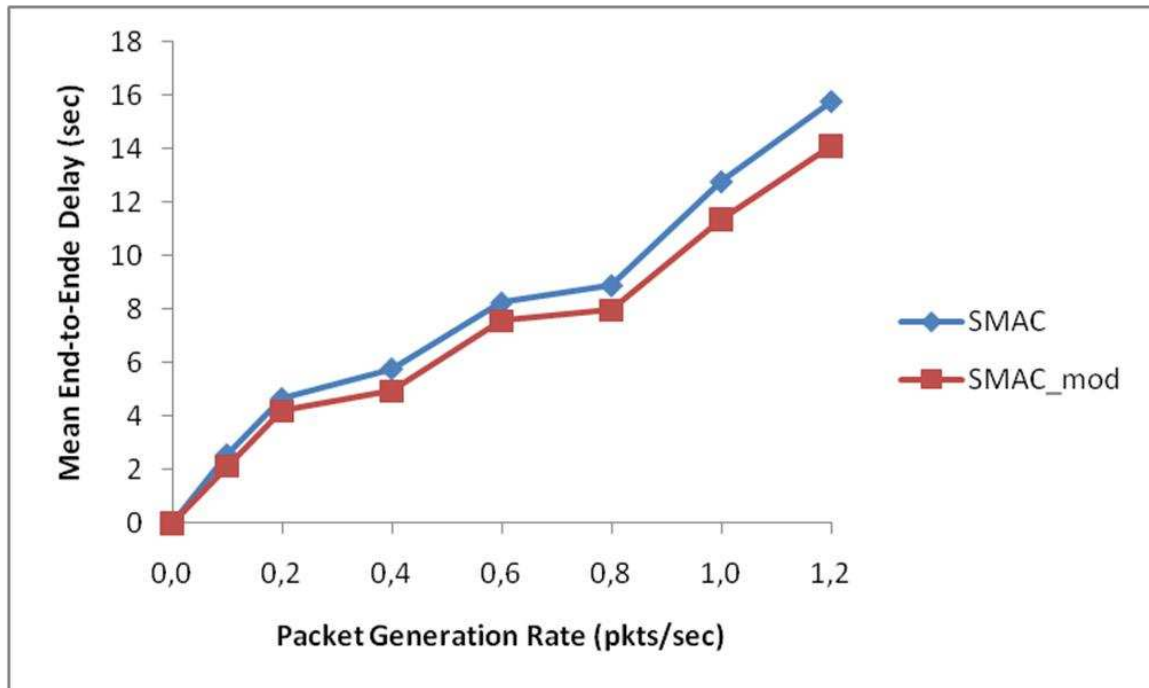


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 25: Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης συναρτήσει του ρυθμού γεννήσεων πακέτων ($D = 8 \text{ sec}$)

Παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται ο ρυθμός γεννήσεων πακέτων στους κόμβους η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης (δηλαδή εντός του χρονικού περιορισμού $D = 8 \text{ sec}$) μειώνεται, αλλά παρ' όλα αυτά το τροποποιημένο πρωτόκολλο εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα (Διάγραμμα 25). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το τροποποιημένο πρωτόκολλο δημιουργεί μονοπάτια συνεχόμενης ροής και κατά συνέπεια η περίοδος του ύπνου των αισθητήρων δεν επηρεάζει τα πακέτα τα οποία κατευθύνονται στο κέντρο συλλογής τόσο δραστικά. Αυτό συμβαίνει διότι συγχρονίζοντας τα υπο-δέντρα μετάδοσης δεδομένων αποφεύγονται οι συγκρούσεις και άρα οι επαναμεταδόσεις κατά την προσπάθεια κατάληψης του μέσου από γειτονικούς κόμβους οι οποίοι όμως δεν ανήκουν στο ίδιο υπο-δέντρο. Η μείωση της πιθανότητας επιτυχημένης μετάδοσης οφείλεται στην αύξηση της συνολικής κίνησης στο δίκτυο με αποτέλεσμα μεγάλες καθυστερήσεις στις ουρές καθώς οι κόμβοι δεν προλαβαίνουν σε μία μόνο ενεργή περίοδο να αποστείλουν όλα τα δεδομένα τους (ειδικότερα όσο πλησιάζουμε στο κέντρο συλλογής). Πακέτα μπορεί να καθυστερήσουν σε έναν κόμβο αρκετά πλαίσια χρόνου με αποτέλεσμα να μην ικανοποιούν τον χρονικό περιορισμό των 8 sec που θέτει η εφαρμογή στα συγκεκριμένα πειράματα.

Όπως παρατηρούμε στο επόμενο διάγραμμα (Διάγραμμα 26) η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο, γεγονός που επιβεβαιώνει τον

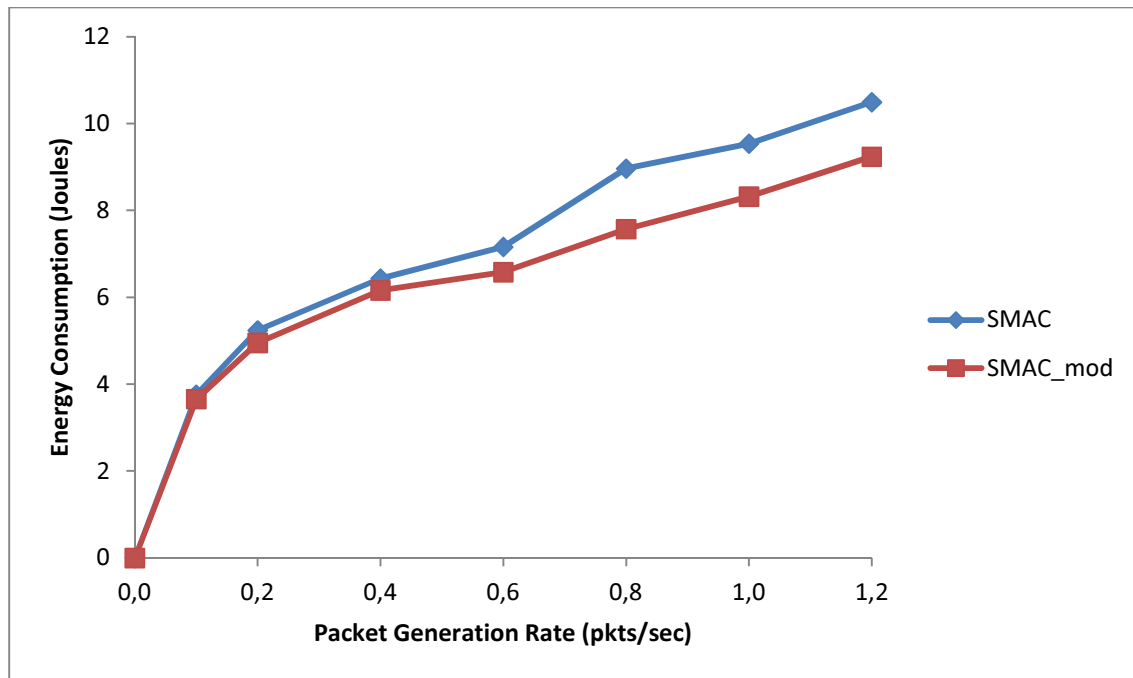
συλλογισμό μας. Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν δίχως χρονικό περιορισμό ώστε να υπολογίσουμε την καθυστέρηση όλων των πακέτων στο δίκτυο.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 26: Μέση καθυστέρηση συναρτήσει του ρυθμού γεννήσεων πακέτων ($D = \infty$)

Το τροποποιημένο πρωτόκολλο SMAC παρουσιάζει μικρότερη μέση καθυστέρηση καθώς αυξάνεται η κίνηση, το οποίο συνάδει με τις μετρήσεις μας για την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης.

Τέλος, συγκρίναμε τα δύο πρωτόκολλα όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 27.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 27: Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει του ρυθμού γεννήσεων πακέτων

Παρατηρούμε πως η προτεινόμενη μέθοδος προσφέρει μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη, διότι συγχρονίζοντας τα υπο-δέντρα αποφεύγονται οι συγκρούσεις και επομένως οι επαναμεταδόσεις κατά την προσπάθεια κατάληψης του μέσου από γειτονικούς κόμβους οι οποίοι όμως δεν ανήκουν στο ίδιο υπο-δέντρο. Παρόλο που ορισμένοι κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται στα πρώτα επίπεδα του δέντρου συλλογής αναγκάζονται να υιοθετήσουν πολλαπλά προγράμματα σπαταλώντας περισσότερη ώρα σε ενεργή κατάσταση με αποτέλεσμα να καταναλώνουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας, η συνολική κατανάλωση είναι μικρότερη.

5.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΑΚΡΟΑΣΗΣ - ΎΠΝΟΥ ΜΕ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Επιθυμώντας να εκμεταλλευτούμε τα μεγάλα ενεργειακά οφέλη τα οποία προσφέρει η συνάθροιση των δεδομένων, θα εφαρμόσουμε συνάρτηση συνάθροισης στο πρωτόκολλο ακρόασης – ύπνου το οποίο προτάθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

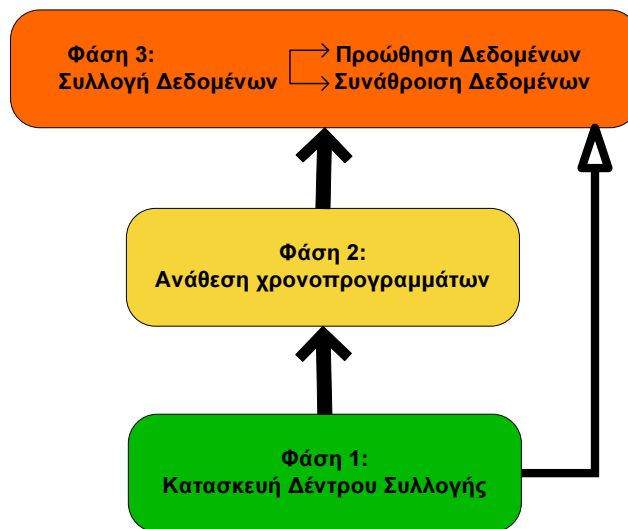
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η περιοδική παύση της λειτουργίας των κόμβων αισθητήρων, ενώ επιφέρει μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της μη ύπαρξης χρόνου αδράνειας, παράλληλα προκαλεί μεγάλες καθυστερήσεις όσον αφορά στην τελική συλλογή τους στο κέντρο. Ταυτόχρονα, η συνάθροιση των δεδομένων σε επίπεδο εφαρμογής προσθέτει επιπλέον καθυστερήσεις λόγω της ύπαρξης της περιόδου συνάθροισης τ . Απαιτείται λοιπόν, ο

ακριβής συγχρονισμός των κόμβων του δικτύου όσον αφορά στην συλλογή και συνάθροιση των δεδομένων.

Η βασική φιλοσοφία η οποία διέπει το προτεινόμενο σχήμα είναι να εκμεταλλευτούμε την εισήγηση χρονικών περιόδων ύπνου στους κόμβους αισθητήρες, όπως πράττουν τα διάφορα πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου με καταστάσεις «ύπνου», ώστε να δημιουργήσουμε ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο. Κατά την διάρκεια αρχικοποίησης δημιουργείται ένα δέντρο συλλογής δεδομένων με ρίζα το κέντρο συλλογής (Φάση 1). Ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται είναι αυτός ο οποίος περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3. Εν συνεχεία, κάθε κόμβος επιλέγει ένα πρόγραμμα ακρόασης / ύπνου το οποίο ακολουθεί κατά την λειτουργία του δικτύου (Φάση 2). Η επιλογή προγράμματος ακολουθεί τη βασική φιλοσοφία του πρωτοκόλλου SMAC αλλά διαφέρει στο ότι επιτυγχάνει τον συγχρονισμό των υπο-δέντρων μέσα στο δέντρο. Ουσιαστικά, κάθε κόμβος συγχρονίζεται με τους γείτονες του στο δέντρο συλλογής (πατέρα και παιδιά) ώστε να δημιουργούνται υπο-δέντρα συγχρονισμένα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την ροή της πληροφορίας μεταξύ των κόμβων και του κέντρου συλλογής, δίχως τις μεγάλες καθυστερήσεις οι οποίες υπεισέρχονται από τον περιοδικό ύπνο των κόμβων, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.2. (Πίνακας 4). Τέλος, αφού έχουν καθοριστεί τα προγράμματα για κάθε κόμβο αισθητήρα, η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται σύμφωνα με την βασική ιδέα της συνάθροισης η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.2 (Φάση 3), λαμβάνοντας υπόψη και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται κάθε κόμβος (ακρόαση ή ύπνο).

Η προσέγγιση αυτή έχει ως στόχο να αξιοποιήσει αποτελεσματικά τους πόρους του συστήματος μειώνοντας τη συνολική κίνηση στο δίκτυο, και ως εκ τούτου να μειώσει τους χρόνους αναμονής των πακέτων πληροφορίας στις ουρές των κόμβων, να μειώσει τις συγκρούσεις κατά την πρόσβαση στο μέσο και τελικά να μειώσει την ενέργεια η οποία δαπανάται κατά την μετάδοση.

Στην Εικόνα 20 απεικονίζονται οι διαφορετικές φάσεις του υπό ανάπτυξη αλγορίθμου.



ΕΙΚΟΝΑ 20: Στρωματική αναπαράσταση προτεινόμενου αλγορίθμου

5.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ

Η απόφαση πραγματοποίησης συνάθροισης για κάθε κόμβο βασίζεται μόνο σε τοπική πληροφορία, εφαρμόζεται πιθανοτικά, και εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως είναι η κατάσταση στην οποία βρίσκεται κάθε κόμβος (πληροφορία η οποία δίνεται από το επίπεδο πρόσβασης μέσου) καθώς και από τον χρονικό περιορισμό μέσα στον οποίο πρέπει τα δεδομένα να φτάσουν στο κέντρο συλλογής (πληροφορία η οποία δίνεται από την εφαρμογή).

Πιο συγκεκριμένα σε κάθε χρονική στιγμή ένας κόμβος μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις δύο καταστάσεις, όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 18.

- Κατάσταση = Ακρόασης; οι κόμβοι λαμβάνουν και δέχονται πακέτα. Κατά τη χρονική διάρκεια αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί συνάθροιση δεδομένων
- Κατάσταση= Ύπνου; οι κόμβοι έχουν απενεργοποιήσει την κεραία τους για επικοινωνία αλλά μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον και να τα επεξεργάζονται. Παρ' όλα αυτά δεν μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν πακέτα.

Ορίζουμε την χρονική περίοδο συνάθροισης τ , καθώς και τις μεταβλητές $time2listen$ και $time2sleep$ οι οποίες αναπαριστούν τον χρόνο μέχρι ένας κόμβος να βρεθεί σε κατάσταση Ακρόασης ή Ύπνου αντίστοιχα. Η μεταβλητή τ αποτελεί μεταβλητή ορισμένη από το σύστημα, και ως εκ τούτου μπορεί να παραμετροποιηθεί κατά την διάρκεια λειτουργίας του δικτύου, και αποτελεί έναν ενδεικτικό χρόνο τον οποίο θέλουμε ένας κόμβος να διενεργήσει συνάθροιση. Ο πραγματικός χρόνος συνάθροισης για κάθε κόμβο, $Taggr$, εξαρτάται όχι μόνο από την αρχική τιμή του τ αλλά και την κατάσταση του κόμβου και αλλάζει δυναμικά κατά τη

διάρκεια λειτουργίας του δικτύου. Πιο αναλυτικά ο πραγματικός χρόνος συνάθροισης *Taggr* εξαρτάται από την διάρκεια του κύκλου, και συγκεκριμένα από τη χρονική διάρκεια της *Ακρόασης*. Στην περίπτωση κατά την οποία το τ είναι μεγαλύτερο από την διάρκεια της κατάστασης *Ακρόασης*, οι κόμβοι συναθροίζουν τα δεδομένα τους καθώς και αυτά τα οποία δέχονται από τα παιδιά τους για έναν ολόκληρο κύκλο (ανεξαρτήτων της κατάστασης στην οποία βρίσκονται οι κόμβοι). Δηλαδή, οι κόμβοι θα πραγματοποιούν συνάθροιση μέχρι να φτάσουν στην κατάσταση *Ακρόασης* καθώς και έναν επιπλέον κύκλο. Ο στόχος είναι να χρησιμοποιηθεί ένας ολόκληρος κύκλος για συνάθροιση, ώστε οι κόμβοι να συναθροίζουν τα δεδομένα των γειτόνων τους κατά την διάρκεια της *Ακρόασης* αλλά ακόμα και κατά τη διάρκεια του *Υπνου* οι κόμβοι να συναθροίζουν τα πακέτα μετρήσεων που δημιουργούν.

Όταν η χρονική περίοδος συνάθροισης τ είναι μικρότερη από τον χρόνο *Ακρόασης*, αν ο κόμβος βρίσκεται σε κατάσταση *Ακρόασης*, τότε η συνάθροιση πραγματοποιείται για χρόνο ίσο με τ μέσα στον χρόνο *Ακρόασης* και αν απομένει χρόνος το συναθροισμένο πακέτο αποστέλλεται μέσα στον ίδιο κύκλο, με στόχο την μείωση της συνολικής καθυστέρησης. Αν, όμως, αυτό δεν είναι εφικτό, τότε, για να μεγιστοποιήσουμε τα οφέλη της συνάθροισης, ο κόμβος συνεχίζει και κατά την διάρκεια του *Υπνου*, μέχρι να ξαναφτάσει σε κατάσταση *Ακρόασης* όπου και θα προωθήσει το πακέτο στον πατέρα του. Αν ο κόμβος είναι σε κατάσταση *Υπνου* τότε ο κόμβος συναθροίζει δεδομένα μέχρι να φτάσει στην αρχή της κατάστασης *Ακρόασης* συν την χρονική μεταβλητή τ .

Στον Πίνακα Πίνακας 6 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος υπολογισμού του χρόνου συνάθροισης *Taggr* για τις διάφορες καταστάσεις και περιπτώσεις, με βάση τα παραπάνω.

Algorithm Data Aggregation - Timer Calculation

Nodes check their state and decide:

BEGIN

dataTime(i)

time2listenTime(i)

time2sleep(i)

Taggr=0

if $\tau > listenPeriod$ AND status = sleep

$T_{aggr} = time2listenTime + cycleTime$

else if $\tau > listenPeriod$ AND status = listen

$T_{aggr} = time2listenTime$

else if $\tau < listenPeriod$ AND status = sleep

$T_{aggr} = time2listenTime + \tau$

else if $\tau < listenPeriod$ AND status = listen

(if sufficient time to be sent in the same cycle)

$T_{aggr} = \tau$

else $T_{aggr} = time2listenTime$

END

5.3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η αξιολόγηση του προτεινόμενου ενεργειακά αποδοτικού αλγορίθμου – Energy Efficient Framework (EEF) - μέσω μοντελοποίησης και προσομοιώσεων με χρήση του ns2. Εξετάζεται η απόδοση του αλγορίθμου EEF για διάφορες παραμέτρους του συστήματος και επιπλέον συγκρίνεται με άλλους αντίστοιχους μηχανισμούς όπως είναι το SMAC πρωτόκολλο και το απλό CSMA/CA (με και δίχως δυνατότητα συνάθροισης). Έχουμε επιλέξει τρεις διαφορετικούς δείκτες απόδοσης για να μελετήσουμε και πιο συγκεκριμένα: τη συνολική ενέργεια η οποία δαπανάται στο σύστημα κατά την λειτουργία του, τη μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση, η οποία αντιστοιχεί στον χρόνο από την στιγμή που γεννιέται ένα πακέτο μέχρι τελικά να φτάσει στο κέντρο συλλογής, και τέλος την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης, η οποία υπολογίζεται ως ο λόγος των πακέτων τα οποία έφτασαν επιτυχημένα στο κέντρο συλλογής προς τα συνολικά πακέτα του συστήματος. Όλοι οι παραπάνω δείκτες αξιολογούνται συναρτήσει της παραγόμενης κίνησης στο δίκτυο.

5.3.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

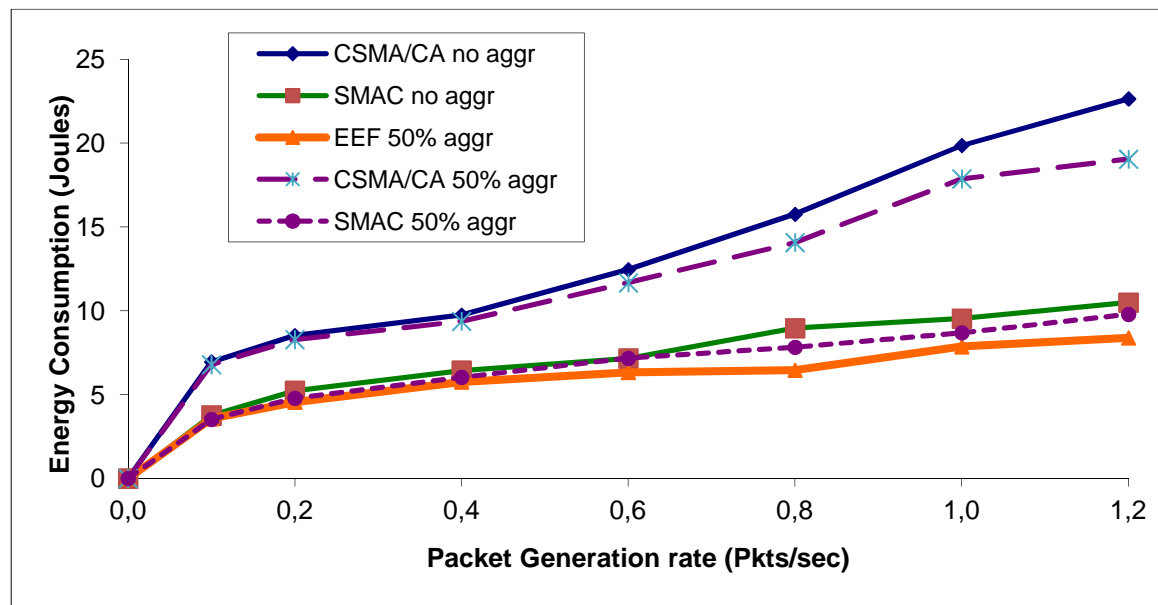
Η τοπολογία του δικτύου είναι ένα πλέγμα 150 x 150 m με 49 κόμβους και το κέντρο συλλογής τοποθετημένο στο κάτω δεξί άκρο. Κάθε κόμβος έχει ακτίνα μετάδοσης 48m και ένας κόμβος θεωρείται γειτονικός με έναν άλλο αν βρίσκεται εντός της ακτίνας μετάδοσης του. Το μοντέλο αυτό αντιστοιχεί σε ένα πραγματικό δίκτυο πολλαπλών βημάτων, θεωρώντας ένα ντετερμινιστικό μοντέλο διάδοσης στο μέσο, όπου η ισχύς μετάδοσης φθίνει αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης μεταξύ κόμβων που επικοινωνούν. Η παραπάνω τοπολογία δημιουργεί δέντρα συλλογής μέχρι βάθους 8 βημάτων, δηλαδή ο μέγιστος αριθμός βημάτων για ένα πακέτο να φτάσει από έναν κόμβο στο κέντρο συλλογής. Χρησιμοποιούμε τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά για τις προσομοιώσεις, όπως παρουσιάστηκαν στον Πίνακα Πίνακας 5.

Οι κόμβοι όταν βρίσκονται σε κατάσταση Ύπνου δεν μπορούν να λάβουν και να στείλουν δεδομένα (η κεραία τους απενεργοποιείται για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας) αλλά έχουν την ικανότητα να λαμβάνουν μετρήσεις και να επεξεργάζονται δεδομένα. Για το πρωτόκολλο μας, EEF, καθώς και για το SMAC πρωτόκολλο ο κύκλος λειτουργίας τίθεται στο 40%, δηλαδή το 40% του χρόνου ενός πλαισίου χρησιμοποιείται για *Ακρόαση*, (συμπεριλαμβανομένου αποστολής και λήψης πακέτων). Το χρονικό μέγεθος του πλαισίου είναι ίσο με 1.2sec. Όλοι οι κόμβοι γεννάνε πακέτα σύμφωνα με την διαδικασία Poisson με ρυθμό λ πακέτα το δευτερόλεπτο. Όταν πραγματοποιείται συνάθροιση στο πακέτο το οποίο δημιουργείται εφαρμόζουμε ένα παράγοντα συνάθροισης β , με στόχο την μείωση του

μεγέθους του πακέτου. Το συνολικό κέρδος συνάθροισης είναι συνδυασμός της μείωσης η οποία επιτυγχάνεται από τη μείωση του κόστους σε επίπεδο MAC (δηλαδή από την επικεφαλίδα του πακέτου) [32] καθώς και από την μείωση στο ωφέλιμο φορτίου λόγω της εφαρμογής του παράγοντα συνάθροισης β . Για όλη τη σειρά των πειραμάτων ο παράγοντας αυτός είναι $\beta = 0.8$. Τέλος, όλες οι προσομοιώσεις έχουν «τρέξει» ανεξάρτητα, ακολουθώντας διαφορετικές ακολουθίες αριθμών, για 240 δευτερόλεπτα.

5.3.2.2 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να αυξήσουμε το χρόνο ζωής ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, πρέπει να μειώσουμε την κατανάλωση ενέργειας σε κάθε κόμβο. Για να το επιτύχουμε αυτό μπορούμε είτε να μειώσουμε τον χρόνο κατά τον οποίο οι κόμβοι είναι αδρανείς και να τους θέσουμε σε κατάσταση Ύπνου είτε να μειώσουμε το συνολικό αριθμό των μεταδόσεων. Η πρώτη προσέγγιση επιτυγχάνεται με χρήση πρωτοκόλλων Ύπνου-Ακρόασης, όπως επιβεβαιώνεται και από το Διάγραμμα 28⁷, όπου ο προτεινόμενος αλγόριθμος EEF καθώς και το SMAC επιτυγχάνουν μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη σε σύγκριση με το CSMA/CA.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 28: Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της κίνησης στο δίκτυο

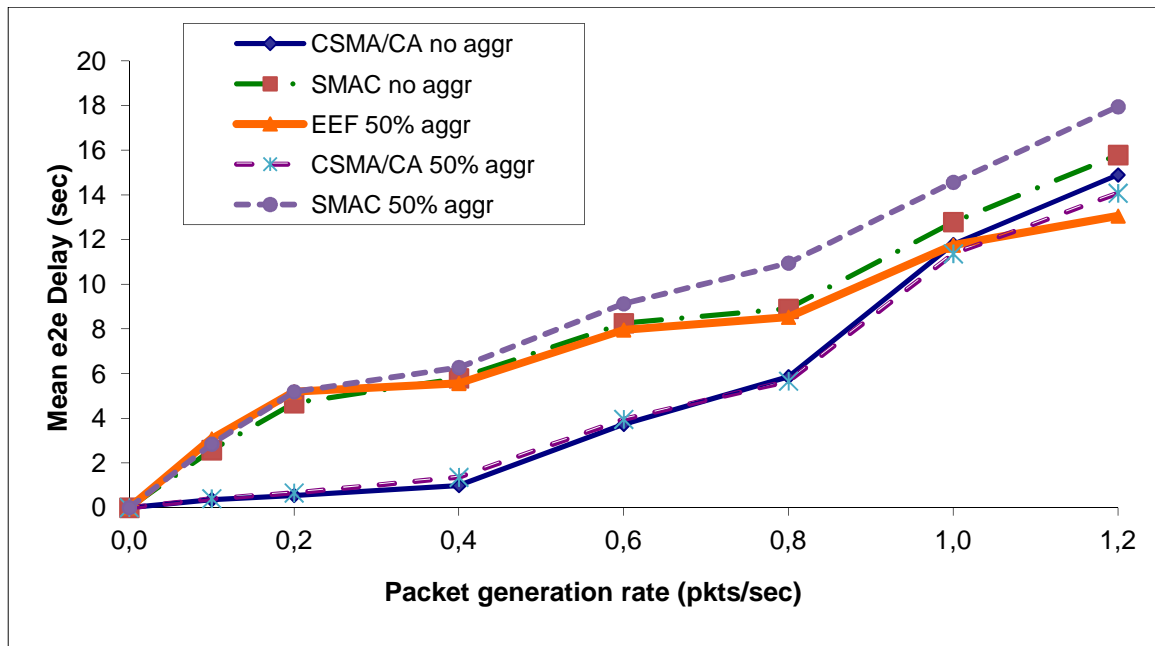
⁷ Η περίπτωση 50% aggregation αντιστοιχεί στο σενάριο όπου η πιθανότητα συνάθροισης γ είναι ίση με 0.5.

Επιπλέον ενεργειακά οφέλη επιτυγχάνονται λόγω της συνάθροισης, κυρίως επειδή μειώνεται η συνολική κίνηση στο δίκτυο και συνεπώς ο αριθμός των συγκρούσεων και των επαναμεταδόσεων.

Κατά συνέπεια, όπως μπορεί να διαπιστωθεί από το παραπάνω διάγραμμα, τεχνικές τύπου CSMA/CA καταναλώνουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, ακόμα και αν χρησιμοποιούν τεχνικές συνάθροισης, ενώ μέθοδοι οι οποίοι θέτουν τους αισθητήρες σε κατάσταση Ύπνου επιτυγχάνουν ακόμα και μέχρι 50% μικρότερη κατανάλωση. Επιπλέον, όπως αναμενόταν η χρήση συνάθροισης είναι πιο ενεργειακά αποδοτική καθώς μικρότερος αριθμός πακέτων μεταδίδονται. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος EEF παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά και τέλος, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η κατανάλωση ενέργειας στο πρωτόκολλο SMAC αυξάνει πιο δραστικά με την αύξηση της κίνησης στο δίκτυο. Το παραπάνω μπορεί να εξηγηθεί καθώς στην περίπτωση κατά την οποία δεν πραγματοποιείται συνάθροιση, το δίκτυο γεμίζει με πακέτα ενώ ακόμα και όταν πραγματοποιείται δεν είναι συγχρονισμένη όπως στο EEF.

5.3.2.3 ΜΕΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ

Πρωτόκολλα τα οποία χρησιμοποιούν κύκλους *Ακρόασης / Ύπνου*, έχουν αποδειχθεί να επιφέρουν μεγαλύτερες από-άκρο-σε-άκρο καθυστερήσεις σε σύγκριση με παραδοσιακά CSMA/CA τύπου πρωτόκολλα. Στο Διάγραμμα 29 παρουσιάζεται η μέση καθυστέρηση συναρτήσει της κίνησης στο δίκτυο για όλα τα υπό εξέταση πρωτόκολλα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 29: Μέση καθυστέρηση συναρτήσει της κίνησης στο δίκτυο

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για μικρή κίνηση, δηλαδή για λ ίσο με 0.1 και 0.2 pkts/sec, το CSMA/CA πρωτόκολλο επιτυγχάνει ελάχιστη καθυστέρηση (σχεδόν αμελητέα). Καθώς, όμως, η συμφόρηση στο δίκτυο αυξάνεται, το CSMA/CA παρουσιάζει δραστική αύξηση, ενώ το προτεινόμενο πρωτόκολλο EEF πιο ήπια. Πρέπει να σημειωθεί, πως στο σενάριο πραγματοποίησης συνάθροισης με πιθανότητα $\gamma = 0.5$ για το CSMA/CA παρουσιάζει την χειρότερη απόδοση για μικρό φορτίο, ενώ βελτιώνεται καθώς η κίνηση αυξάνει. Επιπλέον, παρατηρούμε πως το SMAC με χρήση συνάθροισης εμφανίζει μεγάλη αύξηση συναρτήσεως της κίνησης λόγω μη ύπαρξης συγχρονισμού, καθώς γειτονικοί κόμβοι ο οποίοι δεν ανήκουν στο ίδιο υπο-δέντρο έχουν επικαλυπτόμενα προγράμματα και ως εκ τούτου παρατηρούνται πολλές συγκρούσεις για την πρόσβαση στο μέσο. Επιπλέον οι κόμβοι συναθροίζουν πακέτα ανεξάρτητα της κατάστασης τους οπότε και παρατηρείται το φαινόμενο κάποιιοι κόμβοι να δαπανούν μεγάλο χρόνο για πραγματοποίηση συνάθροισης αυξάνοντας την συνολική καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο. Εν αντιθέσει, ο αλγόριθμος EEF πραγματοποιεί συνάθροιση για χρόνο εξαρτώμενο από την κατάσταση του κόμβου και επιπλέον τα υπο-δέντρα είναι συγχρονισμένα έτσι ώστε να μειώνονται οι καθυστερήσεις στους ενδιάμεσους κόμβους. Για μικρό φορτίο, ο EEF επιφέρει καθυστέρηση στα πακέτα λόγω της περιόδου συνάθροισης, πακέτα τα οποία θα μπορούσαν να φτάσουν στο κέντρο συλλογής σε μικρό χρόνο καθυστερούν και συναθροίζονται στους ενδιάμεσους κόμβους, ενώ καθώς η κίνηση αυξάνεται, ο αλγόριθμος παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά. Γενικά, η πραγματοποίηση συνάθροισης συνεπάγεται την μείωση του φορτίου του δικτύου και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο

χρόνος αναμονής στην ουρά αυξάνεται συνήθως με μη γραμμικό τρόπο με την αύξηση του φορτίου στο δίκτυο (για παράδειγμα με εκθετικό τρόπο), η μείωση στην κίνηση επιφέρει τελικά μείωση στο μέσο χρόνο καθυστέρησης σε ένα δίκτυο.

5.3.2.4 ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΤΥΧΗΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες, για διάφορες εφαρμογές πραγματικού χρόνου, οι κόμβοι πρέπει να αποφασίσουν αν θα πραγματοποιήσουν συνάθροιση με βάση τον χρονικό περιορισμό D ο οποίος τίθεται από την εφαρμογή. Στα προηγούμενα πειράματα στις ενότητες 5.3.2.2 και 5.3.2.3 ο χρονικός περιορισμός είχε τεθεί σε πολύ μεγάλη τιμή ώστε να μην απορρίπτονται πακέτα λόγω αδυναμίας τήρησης του. Στην παρούσα ενότητα όμως, επιθυμώντας να αναδείξουμε τη δυνατότητα για διασφάλιση ποιότητας υπηρεσιών του προτεινόμενου αλγορίθμου EEF, διεξήγαμε προσομοιώσεις με τον χρονικό περιορισμό ίσο με 8 δευτερόλεπτα – $D = 8sec$ – και τον συγκρίναμε με τις ίδιες μεθόδους. Στο σενάριο αυτό, οι κόμβοι κατά την λήψη της απόφασης τους για πραγματοποίηση συνάθροισης λαμβάνουν υπόψη τον χρονικό περιορισμό και αποφασίζουν ανάλογα. Στον Πίνακα Πίνακας 7 δίνονται τα αποτελέσματα για την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης για διάφορες τιμές της κίνησης.

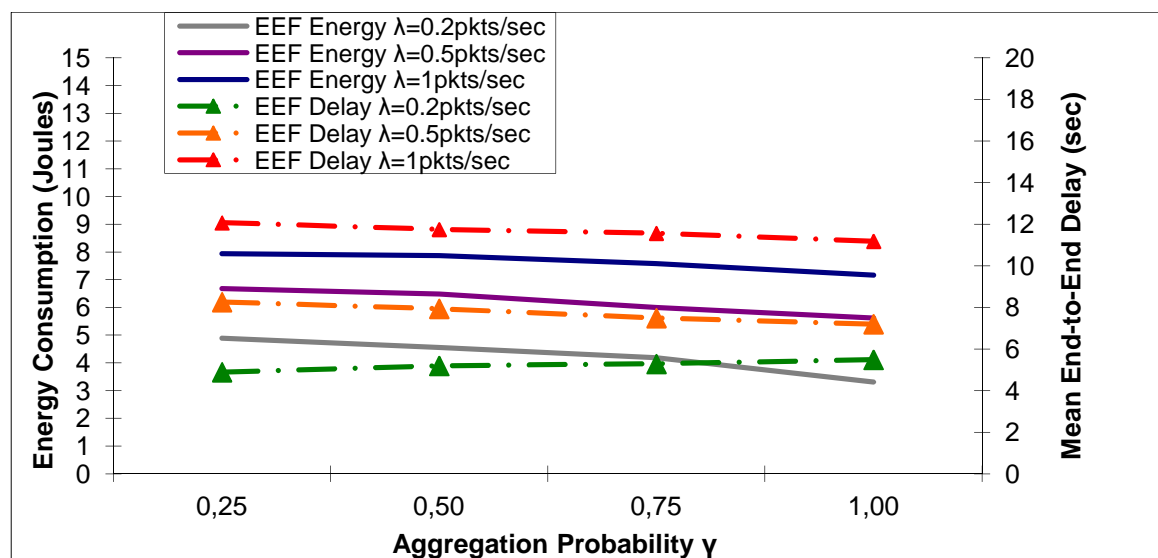
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΤΥΧΗΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΕΦ

| <i>Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης</i> | | | | | |
|--|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Pkts/sec | <i>CSMA/CA</i> | <i>CSMA/CA</i> | <i>SMAc</i> | <i>SMAC</i> | <i>EEF</i> |
| | <i>No aggr</i> | <i>50% aggr</i> | <i>No aggr</i> | <i>50% aggr</i> | <i>50% aggr</i> |
| 0.1 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 0.2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 0.95 |
| 0.4 | 0.94 | 0.95 | 0.85 | 0.82 | 0.80 |
| 0.6 | 0.65 | 0.68 | 0.73 | 0.63 | 0.78 |
| 0.8 | 0.58 | 0.62 | 0.6 | 0.6 | 0.72 |
| 1.0 | 0.44 | 0.50 | 0.56 | 0.55 | 0.63 |
| 1.2 | 0.39 | 0.44 | 0.52 | 0.49 | 0.59 |

Όταν η κίνηση είναι μικρή στο δίκτυο τότε όλα τα σχήματα παρουσιάζουν πολύ καλά αποτελέσματα με ποσοστό 100% ή πολύ κοντά επιτυχημένη μετάδοση. Για τους λόγους τους οποίους αναλύθηκαν στην παραπάνω ενότητα το πρωτόκολλο τύπου CSMA/CA επιτυγχάνει τα καλύτερα αποτελέσματα, ενώ στις άλλες με μεθόδους με πραγματοποίηση συνάθροισης, ένας μικρός αριθμός πακέτων χάνεται λόγω της καθυστέρησης την οποία επιφέρει η διαδικασία της συνάθροισης. Παρ' όλα αυτά, καθώς αυξάνεται η κίνηση όλο και περισσότερα πακέτα κυκλοφορούν στο δίκτυο και η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης μειώνεται, ιδιαίτερα στην περίπτωση του πρωτοκόλλου CSMA/CA όπου για μεγάλη κίνηση πάνω από το 50% των πακέτων απορρίπτονται. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί πως όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο SMAC με δυνατότητα συνάθροισης, η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης μειώνεται δραστικά καθώς λόγω της απουσίας συγχρονισμού και της καθυστέρησης των πακέτων, δεν είναι εφικτή η ικανοποίηση του χρονικού περιορισμού, παρουσιάζοντας τιμές χειρότερες και από το απλό SMAC. Σε αντίθεση, το προτεινόμενο πρωτόκολλο ΕΕΦ για μεσαία και υψηλή κίνηση υπερτερεί των άλλων μεθόδων, λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών του τα οποία επιτυγχάνουν συγχρονισμό μεταξύ των προγραμμάτων και της διαδικασίας συνάθροισης.

5.3.2.5 ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ

Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα μετρήσεων για μελέτη της επίδρασης της πιθανότητας συνάθροισης στην λειτουργία του EEF αλγορίθμου. Στο Διάγραμμα 30⁸ παρουσιάζεται με συνδυαστικό τρόπο η κατανάλωση ενέργειας κα η μέση καθυστέρηση συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης γ για διάφορες τιμές κίνησης στο δίκτυο.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 30: Μέση καθυστέρηση και κατανάλωσης ενέργειας συναρτήσει της πιθανότητας συνάθροισης

Όπως παρατηρούμε, καθώς αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο τόσο η κατανάλωση ενέργειας όσο και η μέση καθυστέρηση αυξάνονται, για δεδομένη τιμή της πιθανότητας συνάθροισης γ .

Οι τιμές της κατανάλωσης ενέργειας μειώνονται με την αύξηση της πιθανότητας συνάθροισης ενώ η μέση καθυστέρηση μπορεί να αυξηθεί για χαμηλή κίνηση (όπως για ρυθμό κίνησης $\lambda = 0.2 \text{ pkts/sec}$), όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 5.3.2.3, και μειώνεται για υψηλή κίνηση καθώς η πιθανότητα συνάθροισης αυξάνεται. Για άλλη μια φορά επιβεβαιώνεται πως η διαδικασία της συνάθροισης συνεισφέρει στη μείωση του φορτίου στο δίκτυο, επιτρέποντας περισσότερα πακέτα να φτάσουν έγκαιρα στο κέντρο συλλογής.

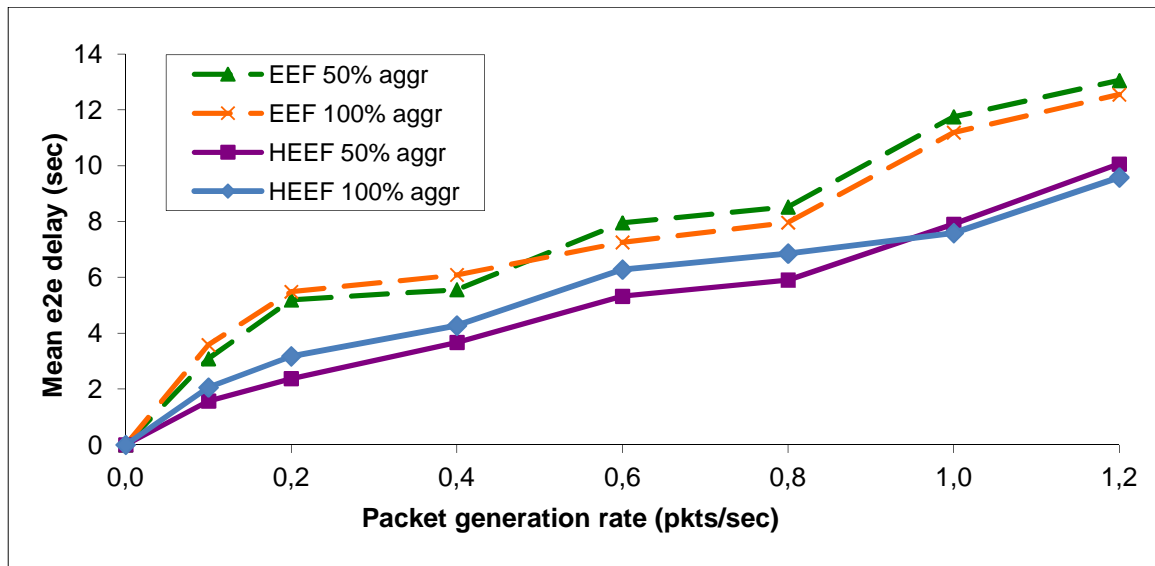
⁸ Οι καμπύλες με έντονο χρώμα αντιστοιχούν την κατανάλωση ενέργειας ενώ με διακεκομμένες οι καμπύλες για την μέση καθυστέρηση.

5.3.3 ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

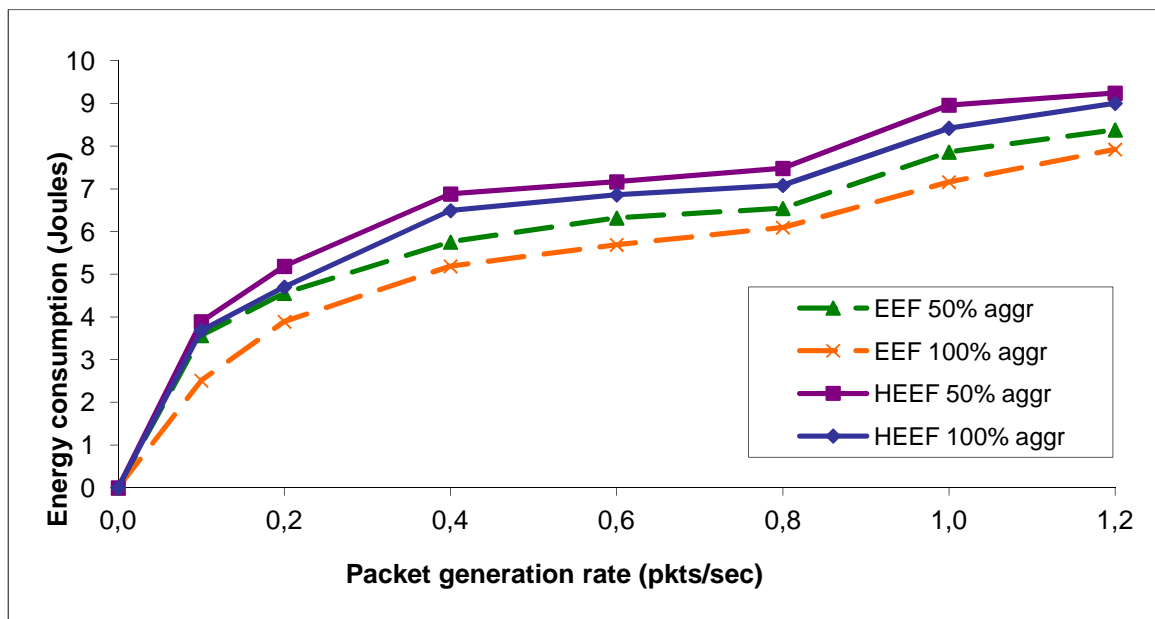
Όπως έχει διαπιστωθεί από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στις προηγούμενες ενότητες, υπάρχει ξεκάθαρα μια αλληλεπίδραση (trade-off) μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της μέσης καθυστέρησης. Γενικά, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναμένεται να λειτουργούν σε περιβάλλοντα στα οποία η δυνατότητα επαναφόρτισης των μπαταριών τους και άρα της ενέργειας τους δεν είναι εφικτή. Βάσει αναλυτικών μεθόδων και μετρήσεων, έχει παρατηρηθεί πως οι μεγαλύτερες καθυστερήσεις υπεισέρχονται στους κόμβους αισθητήρες των πρώτων επιπέδων, δηλαδή σε αυτούς που βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο συλλογής. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός πως τα πακέτα πρέπει να προωθηθούν στους κόμβους αυτούς για να φτάσουν στο τελικό τους προορισμό, και κατά συνέπεια μπορεί να προκύψει συμφόρηση. Η λειτουργία με προγράμματα *Ακρόασης / Ύπνου* έχει ως αποτέλεσμα πακέτα να καθυστερούν για πολλούς κύκλους λόγω μεγάλων ουρών αναμονής. Ακόμα και με μη επικαλυπτόμενα προγράμματα τα πρόβλημα δεν μπορεί να επιλυθεί, ιδιαίτερα όταν η κίνηση είναι μεγάλη στο δίκτυο.

Ως εκ τούτου, για να βελτιώσουμε τη λειτουργία του προτεινόμενου αλγορίθμου EEF, θέτουμε τους κόμβους πρώτων επιπέδων, κρίσιμοι κόμβοι, σε συνεχή λειτουργία, δίχως περιόδους *Ύπνου*, και ορίζουμε την αποστολή των δεδομένων τους με πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο τύπου CSMA/CA, παρέχοντας έτσι ένα υβριδικό ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο - HEEF. Για την αξιολόγηση του χρησιμοποιούνται οι ίδιες μετρικές απόδοσης; συνολική κατανάλωση ενέργειας, μέση καθυστέρηση και πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης συναρτήσει της κίνησης του δικτύου και συγκρίνεται με τον αλγόριθμο EEF.

Στο Διάγραμμα 31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την συνολική κατανάλωση ενέργειας και στο Διάγραμμα 32 για την μέση καθυστέρηση συναρτήσει της κίνησης στο δίκτυο για τις μεθόδους EEF και HEEF με πιθανότητα συνάθροισης $\gamma = 0.5$ και $\gamma = 1$.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 31: Μέση καθυστέρηση συναρτήσει της κίνησης για τους αλγορίθμους EEF και HEEF



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 32: Κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της κίνησης για τους αλγορίθμους EEF και HEEF

Παρατηρείται ότι το υβριδικό πρωτόκολλο επιτυγχάνει μικρότερη μέση καθυστέρηση με ταυτόχρονη μικρή αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το πρωτόκολλο EEF. Τέλος, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 8 η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης είναι μεγαλύτερη για το πρωτόκολλο HEEF.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΤΥΧΗΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΕΦ ΚΑΙ ΗΕΕΦ

| <i>Πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης</i> | | | | |
|--|----------|-----------|-------------|-------------|
| Pkts/sec | ΕΕΦ | ΕΕΦ | ΗΕΕΦ | ΗΕΕΦ |
| | 50% aggr | 100% aggr | 50%aggr | 100% aggr |
| 0.1 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 0.2 | 0.95 | 0.92 | 1.00 | 1.00 |
| 0.4 | 0.80 | 0.74 | 0.83 | 0.85 |
| 0.6 | 0.76 | 0.73 | 0.80 | 0.78 |
| 0.8 | 0.72 | 0.70 | 0.75 | 0.77 |
| 1.0 | 0.63 | 0.59 | 0.65 | 0.63 |
| 1.2 | 0.59 | 0.55 | 0.64 | 0.61 |

Η προτεινόμενη μέθοδος είναι προσαρμοστική και ως εκ τούτου διάφοροι άλλοι παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την αποδοτικότητα του. Ο κύκλος λειτουργίας μπορεί να προσαρμοστεί ώστε οι κύκλοι *Ακρόασης/Υπνου* να είναι μικρότεροι/μεγαλύτεροι ανάλογα αν επιθυμούμε μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη ή μικρότερη μέση καθυστέρηση, καθώς επίσης να προσαρμόζονται ανάλογα με την κίνηση στο δίκτυο.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύτηκε το πρόβλημα της ενεργειακά αποδοτικής συλλογής δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ικανοποιώντας ταυτόχρονα συγκεκριμένες μετρικές Ποιότητας Υπηρεσίας των εφαρμογών. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν διαφορετικά εγγενή λειτουργικά χαρακτηριστικά από τα αυτο-οργανούμενα δίκτυα και ως εκ τούτου η εφαρμογή πρωτοκόλλων σχεδιασμένων για τα αυτο-οργανούμενα δίκτυα έχει αποδειχτεί μη αποδοτική λύση. Επιπλέον, οι αισθητήρες κόμβοι, οι οποίοι αποτελούν ένα ασύρματο δίκτυο, εμφανίζουν εκ φύσεως περιορισμένες δυνατότητες, τόσο όσον αφορά την αποθηκευτική και υπολογιστική ισχύς τους, όσο και λόγω των πεπερασμένων ενεργειακών τους αποθεμάτων. Κρίνεται, λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη υλοποίησης νέων πρωτοκόλλων συλλογής δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη τους στον σχεδιασμό τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά.

Οι μέθοδοι και τα πρωτόκολλα τα οποία σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή έχουν σαν γνώμονα την ενεργειακά περιορισμένη φύση των αισθητήρων και ως εκ τούτου στοχεύουν στην αύξηση της διάρκειας ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Για το λόγο αυτό, αντιμετωπίσαμε το πρόβλημα της συλλογής των δεδομένων σε δύο επίπεδα, στο επίπεδο της εφαρμογής και στο επίπεδο πρόσβασης μέσου, σύμφωνα με τις τρέχουσες ερευνητικές τάσεις.

Αρχικά, παρατηρούμε ότι τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται από γειτονικούς κόμβους αισθητήρες, σε μία περιοχή παρακολούθησης, εμφανίζουν χωρικές και χρονικές συσχετίσεις. Αποστέλλεται στο κέντρο συλλογής, λοιπόν, πλεονάζουσα πληροφορία, καταναλώνοντας τους περιορισμένους πόρους του δικτύου. Για την μείωση της μεταδιδόμενης πληροφορίας, έχει προταθεί η τεχνική της συνάθροισης δεδομένων, κατά την εφαρμογή της οποίας, πολλαπλές μετρήσεις δεδομένων γειτονικών κόμβων συναθροίζονται σε μία και αποστέλλεται ένα πακέτο συνολικών μετρήσεων. Η μέθοδος αυτή, έχει αποδειχτεί εξαιρετικά ενεργειακά αποδοτική, καθώς η ενέργεια η οποία δαπανάται στους κόμβους οφείλεται κυρίως στη μετάδοση και λήψη πακέτων, και επομένως η αποστολή λιγότερων πακέτων επιτυγχάνει την μείωση του συνολικού επικοινωνιακού κόστους.

Προτείναμε, λοιπόν, και αξιολογήσαμε πειραματικά, την εφαρμογή ενός αλγορίθμου συλλογής δεδομένων ο οποίος πραγματοποιεί συνάθροιση δεδομένων στους ενδιάμεσους κόμβους με πιθανοτικό και κατανεμημένο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, δοθέντος ορισμένου

χρονικού περιορισμού από την εφαρμογή, κάθε κόμβος δύναται να αποφασίσει αν θα πραγματοποιήσει συνάθροιση των δεδομένων του με τα δεδομένα τα οποία λαμβάνει από τους γείτονες του, με χρήση μόνο τοπικής πληροφορίας, δηλαδή της απόστασης του από το κέντρο συλλογής και του χρονικού περιορισμού εντός του οποίου τα πακέτα πρέπει να φτάσουν στο κέντρο συλλογής. Η διαδικασία της συνάθροισης και η χρονική καθυστέρηση των πακέτων στο δίκτυο μοντελοποιήθηκε και ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιολογήθηκε τόσο για τα ενεργειακά του οφέλη όσο και για τη μέση καθυστέρηση και την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης των πακέτων. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι η εφαρμογή της συνάθροισης επιτυγχάνει την αύξηση της διάρκειας ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με ταυτόχρονη αύξηση στην από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση των πακέτων. Επιπλέον, η επίδοση της προτεινόμενης λύσης αξιολογήθηκε σε περιβάλλοντα τα οποία εμφανίζουν μεγάλο χρόνο διάδοσης και μεταβλητά χαρακτηριστικά καναλιού, όπως είναι τα υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων, και αποδείχτηκε ότι επιτυγχάνουν μεγάλο ποσοστό επιτυχημένης μετάδοσης των πακέτων με ταυτόχρονη μικρή κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ανάλογα με το είδος της εφαρμογής - αυστηρός ή πιο ανεκτικός χρονικός περιορισμός - διάφοροι παράμετροι μπορούν να τεθούν ώστε να επιτευχθεί το προσδοκώμενο κέρδος. Η τιμή της πιθανότητας συνάθροισης γ , η χρονική περίοδος συνάθροισης τ , καθώς και το ποσοστό συνάθροισης αποτελούν ρυθμιζόμενες σχεδιαστικές παραμέτρους.

Η παραπάνω παρατήρηση όσο αφορά την επιρροή της πιθανότητας και της χρονικής περιόδου συνάθροισης μας οδήγησε στην αντιμετώπιση του προβλήματος της ενεργειακά αποδοτικής συλλογής δεδομένων με χρήση συνάθροισης ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ορίσαμε κατά αυτόν τον τρόπο το κυριώδες πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με ταυτόχρονη ικανοποίηση συγκεκριμένων χρονικών περιορισμών. Επιλύσαμε το πρόβλημα με μεθοδολογία αποσύνθεσης πρωτεύοντος-δευτερίου προβλήματος και αποκτήσαμε τις βέλτιστες τιμές της πιθανότητας και της χρονικής περιόδου συνάθροισης για κάθε κόμβο στο δίκτυο, οι οποίες ελαχιστοποιούν την δαπανώμενη ενέργεια. Μέσω προσομοιώσεων δείχτηκε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας επιτυγχάνει βελτιωτικά αποτελέσματα συγκριτικά με χρήση στατικών τεχνικών συνάθροισης, δηλαδή προκαθορισμένη πιθανότητα και χρονική διάρκεια. Επιπλέον, έχει την δυνατότητα προσαρμογής σε δυναμικά περιβάλλοντα και εφαρμογές όπως είναι των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Τέλος, παρατηρήσαμε ότι μεγάλο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων οφείλεται κατά την διαδικασία της αδρανούς ακρόασης, κατά την οποία οι κόμβοι ακούν το κανάλι για ενδεχόμενη λήψη πακέτου. Για τον περιορισμό του χρόνου αυτού σχεδιάσαμε και υλοποιήσαμε ένα πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου του οποίου ορίζεται η λειτουργία των κόμβων με χρήση προγραμμάτων *ακρόασης – ύπνου*. Το πρωτόκολλο, υιοθετεί τις προτεινόμενες λύσεις από την βιβλιογραφία, αλλά επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην μέση καθυστέρηση, καθώς αντιμετωπίζει το πρόβλημα της καθυστέρησης η οποία υπεισέρχεται από την περιοδική απενεργοποίηση των κόμβων, μέσω του συγχρονισμού μονοπατιών πληροφορίας. Εν συνεχεία, το παραπάνω προτεινόμενο πρωτόκολλο πρόσβασης εφαρμόστηκε σε συνδυασμό με το αντίστοιχο προτεινόμενο πλαίσιο συνάθροισης όπου οι κόμβοι προσδιορίζουν την χρονική διάρκεια της συνάθροισης δυναμικά με χρήση μόνο τοπικής πληροφορίας. Η συνδυαστική χρήση των μεθόδων επιτυγχάνει εξαιρετικά ενεργειακά οφέλη ενώ ταυτόχρονα κρατά την μέση καθυστέρηση μικρή, για χρήση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

6.1 ΤΡΕΧΟΥΣΕΣ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται ορισμένα ανοιχτά ερευνητικά θέματα τα οποία προκύπτουν από την παρούσα διδακτορική διατριβή, καθώς και μελλοντικές σχετικές κατευθύνσεις έρευνας στην περιοχή των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων.

6.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΟΥΡΩΝ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

Στην ενότητα 1 μελετήσαμε το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της καταναλισκόμενης ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μέσω επίλυσης ενός κυρτού προβλήματος βελτιστοποίησης. Για τη μοντελοποίηση του συστήματος καθώς και τον υπολογισμό της λύσης κάναμε την παραδοχή ότι οι ουρές αναμονής των κόμβων ήταν γνωστές, μέσω ανταλλαγής τοπικής πληροφορίας μεταξύ γειτονικών κόμβων. Γενικά όμως είναι επιθυμητό να μοντελοποιηθεί η αποθήκευση σε κάθε κόμβο ως ένα σύστημα αναμονής, επιτρέποντας καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του δικτύου, καθώς και μεγαλύτερη ευελιξία στην εφαρμογή και ανάλυση έξυπνων πολιτικών διαχείρισης ([87]-[89]).

Η ασύγχρονη φύση της λειτουργίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, σε συνδυασμό με την πιθανοτική εφαρμογή της συνάθροισης καθιστά το πρόβλημα μοντελοποίησης και υπολογισμού του μεγέθους της ουράς των κόμβων ιδιαίτερα ενδιαφέρον

και απαιτητικό, και ως τώρα δεν έχει προταθεί αποδοτική λύση επίλυσης αυτού. Η ιδέα είναι να θεωρήσουμε ένα σύστημα αναμονής το οποίο λειτουργεί με διαστήματα διακοπής (vacation periods) κατά τα οποία η ουρά δεν θα εξυπηρετεί αλλά θα πραγματοποιείται συνάθροιση των πακέτων στην ουρά. Μετά το πέρας του διαστήματος διακοπής θα αποστέλλεται ένα πακέτο και η ουρά θα αδειάζει. Εναλλακτικά, θα επιτρέπεται η συνάθροιση μέχρι k πακέτων και άρα θα απομένουν $N - k$ πακέτα στην ουρά, όπου N ο αρχικός αριθμός των πακέτων στην ουρά. Η θεώρηση ενός ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων ως ένα γενικότερο σύστημα αναμονής και ο υπολογισμός συγκεκριμένων και συνολικών δεικτών απόδοσης, όπως είναι ο μέσος χρόνος αναμονής ενός πακέτου στο σύστημα, θα οδηγήσει σε μια διαφορετική κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των δικτύων αισθητήρων και προβλήματα όπως έλεγχος της πληροφορίας (flow control) θα μπορέσουν να επιλυθούν.

6.1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΑΝΟΧΗ ΣΤΗΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ & ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Τα δίκτυα με ανοχή στην καθυστέρηση - Delay- and Disruption-Tolerant Networking (DTN) -αποτελούν ένα νέο πρότυπο επικοινωνίας το οποίο έχει εφαρμογή σε πληθώρα δικτυακών παραδειγμάτων, τα οποία αντιμετωπίζουν κατά κύριο λόγο προβλήματα συνδεσιμότητας. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί και υλοποιηθεί η χρήση τους σε διαστημικές εφαρμογές / δίκτυα [90] και εν συνεχεία σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα καθώς και σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [91]. Για τη δρομολόγηση των πακέτων, τα δίκτυα αυτά ακολουθούν την προσέγγιση της «αποθήκευσης και προώθησης» (store and forward) η οποία διαφέρει από την τυπικά χρησιμοποιούμενη δρομολόγηση, όπου οι δημιουργούνται από-άκρο-σε-άκρο μονοπάτια επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Η δρομολόγηση ακολουθεί καιροσκοπική τακτική όπου ένας κόμβος μεταδίδει το πακέτο του στον διαθέσιμο γειτονικό του κόμβο, όπου αποθηκεύεται και εν συνεχεία προωθείται με αυτή τη μέθοδο στο δίκτυο, μέχρι να φτάσει στο κέντρο συλλογής. Για σκοπούς εγγυημένης μετάδοσης συνήθως τακτική είναι η πλημμύρα όπου μεταδίδονται πολλά αντίγραφα του αρχικού πακέτου στο δίκτυο, η οποία όμως καταναλώνει επικοινωνιακούς πόρους του δικτύου και τον διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο των κόμβων [92].

Πρόθεση μας είναι η ανάπτυξη ενός αποδοτικού πρωτοκόλλου μετάδοσης δεδομένων το οποίο θα βασίζεται στο πρότυπο πρωτόκολλο επικοινωνίας των δικτύων με ανοχή στην καθυστέρηση. Το πρότυπο αυτό ονομάζεται bundle πρωτόκολλο [93], και ορίζει μια σειρά από συνεχόμενα blocks πληροφορίας ως ένα bundle. Τα bundles δρομολογούνται στο υποκείμενο δίκτυο μέσω μηχανισμών προσωρινής αποθήκευσης και προώθησης. Το προτεινόμενο

πρωτόκολλο θα υλοποιηθεί πάνω από το επίπεδο ζεύξης ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα του και να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των συσκευών των οποίων μετέχουν στο δίκτυο. Μέσω ανάλυσης και μοντελοποίησης θα αναγνωριστούν οι απαιτήσεις και τελικό στόχο αποτελεί η πρότυπη υλοποίηση του σε κόμβους αισθητήρες όπου και θα αξιολογηθεί η αποδοτικότητα του και η εφαρμοσιμότητα του σε ποικίλες εφαρμογές.

Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά (με Κρίση)

- [1] **S. Kafetzoglou**, G. Aristomenopoulos and S. Papavassiliou “Optimization Framework for Energy Efficient Data Gathering in Wireless Sensor Networks” (under submission).
- [2] **S. Kafetzoglou** and S. Papavassiliou, “Energy Efficient Framework for Data Gathering in Wireless Sensor Networks via the Combination of Sleeping MAC and Data Aggregation Strategies”, *International Journal of Sensor Networks*, Special Issue of "Technologies, Architectures and Applications for Green Wireless Sensor Networks", Inderscience Publisher, Vol. 10, No 1-2, 2011.
- [3] **S. Kafetzoglou**, M.Alexandropoulou, and S. Papavassiliou, “A Novel Data Monitoring and Gathering Framework for Resource constrained Underwater Sensor Networks,” *Ad Hoc and Sensor Wireless Networks*, vol. 5, no. 3-4, pp. 313-329, 2008.

Δημοσιεύσεις σε Κεφάλαια Βιβλίων

- [1] Symeon Papavassiliou, Jin Zhu and Stella Kafetzoglou, “Data Monitoring and Gathering in Sensor Networks”, *The Handbook of Computer Networks*, John-Wiley, Edited by Hossein Bidgoli, Vol. II, Part 3, December 2007.

Πρακτικά Διεθνών Επιστημονικών Συνεδρίων (με Κρίση)

- [1] S. Kafetzoglou, M. Alexandropoulou and S. Papavassiliou, “On the Efficient Data Gathering in Large Scale Autonomous Bandwidth-limited Sensor Networks”, in Proc. IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing, pp. 513-517, May 2008.
- [2] S. Kafetzoglou, M. Grammatikou, and S. Papavassiliou, " Performance Evaluation of a robust data aggregation approach in diverse sensor networking environments" in Proc. of the 3rd International Workshop on Distributed Cooperative laboratories: Instrumenting the GRID, Ischia, Italy, April 2008
- [3] K. Stathis, S. Kafetzoglou, S. Papavassiliou and S. Bromuri, “Sensor Network Grids: QoS Provisioning for Data Gathering via the Integration of Wireless Sensor Nodes and Multi-Agent Systems”, in Proc. of Third International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS 2007), pp. 47-52, June 2007.

- [4] J. Zhu, S. Papavassiliou, S. Kafetzoglou, J. Yang. "On the Modeling of Data Aggregation and Report Delivery in QoS-constrained Sensor networks" in Proc of the 4th annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Pisa, Italy, March 2006
- [5] J. Zhu, S. Papavassiliou, S. Kafetzoglou, J. Yang, " An Efficient QoS-costrained Data Aggregation and Processing Approach in Distributed Wireless Sensor Networks, in Proc of the 11th IEEE Conference Symposium on Computers and Communications, Sardinia, Italy, June 2006.

- [1] K. Martinez, J.K. Hart, R. and Ong, "Environmental Sensor Networks," IEEE Computer Magazine, Vol. 37, No. 8, pp. 50-56, 2004.
- [2] D. Estrin and R. Govindan, "Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks", in Proc. of the ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 263- 270, Seattle, Washington, USA, August 1999.
- [3] C.C.Shen, C. Srisathapornphat, and C. Jaikaeo, "Sensor information networking architecture and applications", IEEE Personal Communications, Vol. 8, pp.52-59, 2001.
- [4] G.J. Pottie, and W.J. Kaiser, " Wireless integrated network sensors", Communications of the ACM, Vol 43, pp.51–58, 2000.
- [5] I. F. Akyildiz., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci," A survey on sensor networks". IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, pp.102—114, 2002.
- [6] J. Hill and D. Culler, "A wireless embedded sensor architecture for system-level optimization", Technical report, Computer Science Department, University of California at Berkeley, 2002.
- [7] B. H. Calhoun, D. C. Daly, N. Verma, D. Finchelstein, D. D. Wentzloff, A. Wang, S.-H. Cho, and A. P. Chandrakasan, "Design Considerations for Ultra-low Energy Wireless Microsensor Nodes", IEEE Transactions on Computers. pp. 727-749. June 2005.
- [8] Πληροφορίες για τους αισθητήρες PC104:
<http://www.isi.edu/scadds/pc104testbed/guideline.html>
- [9] E. Welsh, W. Fish, J. P. Frantz, "Gnomes: A testbed for low power heterogeneous wireless sensor networks", In Proc. of the IEEE International Symposium on Circuits and System, Vol. 4, pp. IV-836, Bangkok, Thailand, May 2003.
- [10] Crossbow notes: <http://bullseye.xbow.com:81/Products/wproductoverview.aspx>
- [11] S. Kumar, and D. Shepherd, "SensIT: Sensor Information Technology for the Warfighter", In Proc. Of the 4th International Conference on Information Fusion, pp.TuC1-3 -TuC1-9 , Montreal, QC, Canada, August 2001.

- [12] G. Chao and P. Mohapatra, "Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks", in Proc of the 10th International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 129-143, Philadelphia, PA, USA, September 2004.
- [13] K. Chakrabarty, S. S. Iyengar, H. Qi, E. Cho, "Grid Coverage for Surveillance and Target Location in Distributed Sensor Networks", IEEE Transactions on Computers, Vol.51, No. 12, pp. 1448-1453, 2002.
- [14] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk , and D. Culler, "Wireless sensor networks for habitat monitoring", In Proc. of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications. pp. 88-97, Atlanta, Georgia, USA, September 2002.
- [15] Description of the James Reserve project available at:
<http://research.cens.ucla.edu/projects/2006/terrestrial/microclimate/default.htm>
- [16] E. Biagioni, K. and Bridges, "The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species", In Special issue on Distributed Sensor Networks for the International Journal of High Performance Computing Applications, Vol. 16, N. 3, pp. 315-324, August 2002.
- [17] D. Steere, A. Baptista, D. McNamee, C. Pu, and J. Walpole J, " Research challenges in environmental observation and forecasting systems", In Proc. of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking. pp.292 -299. Boston, Massachusetts, USA, August 2000.
- [18] X. T. Dang, S. Frolov, N. Bulusu, W.c. Feng, A. M. Baptista, "Near optimal sensor selection in the columbia river (corie) observation network for data assimilation using genetic algorithms", In Proc. of the 3rd IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. Vol. 4549, pp. 253-266, Santa Fe, New Mexico, USA, June 2007.
- [19] Σύστημα ALERT, available at: <http://www.alertsystems.org/>
- [20] D. Malan, T.Fulford-Jones , M. Welsh , and S. Moulton S, "CodeBlue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care", In Proc. of the International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services / Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems. pp. 12–14. Boston, Massachusetts, USA, June. 2004.
- [21] J. Ko, J. Lim, Y. Chen, E.R. Musaloiu, A. Terzi, G. Masson, T. Gao, W. Destler, L. Selavo, and R. Dutton, "MEDiSN: Medical emergency detection in sensor networks", ACM Transactions in Embedded Computing Systems. Vol. 10,no. 1, pp. 11:1–11:29, 2010,

article 11, 2010.

- [22] L. Schwiebert., S. K. S. Gupta, and J. Weinmann, " Research challenges in wireless networks of biomedical sensors", In *Mobile Computing and Networking*, pp. 151-165, 2001.
- [23] E. Ertin, N. Stohs, S. Kumar, A. Rajj, M. al'Absi, S. Shah, "AutoSense: unobtrusively wearable sensor suite for inferring the onset, causality, and consequences of stress in the field", In *Proc.of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Seattle, Washington, USA, November 2011
- [24] I.A. Essa, "Ubiquitous sensing for smart and aware environments", *IEEE Personal Communications*,pp. 47-49, October 2000.
- [25] J.P. Lynch, and K. J. Koh, "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring", *Shock and Vibration Digest*, Vol. 38, No. 2, pp. 91–128.
- [26] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks", In *Proc. IEEE of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2, 10, Hawaii, USA, January 2000.
- [27] W. Heinzelmann, "Application-Specific protocol architectures for wireless sensor networks", *PhD Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, June 2000.
- [28] L. Eschenauer, and V. D. Gligor. "A key-management scheme for distributed sensor networks." In *Proceedings of the 9th ACM conference on Computer and communications security*, pp. 41-47. ACM, 2002.
- [29] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, "Building efficient wireless sensor networks with low-level naming", In *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, Vol. 35, No. 5, pp. 146-159, October 2001.
- [30] B. Krishnamachari, D. Estrin, S.B. Wicker, "The impact of data aggregation in wireless sensor networks", in *Proc of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 575-578, Vienna, Austria, July 2002.
- [31] J. Tourrilhes, "Packet Frame Grouping: Improving IP multimedia performance over CSMA/CA", in *Proc. of the IEEE International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC)*, 1998, vol. 2, pp 1345-1349, Florence, Italy, October 1998.

- [32] Y. Xiao, "Packing Mechanisms for the IEEE 802.11n Wireless LANs", in Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference, Vol.5, pp. 3275-3279, Dallas, Texas USA, December 2004.
- [33] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed Diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks", In Proc. Of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.56-67, Boston, Massachusetts, USA, August 2000
- [34] I. Solis, and K.Obraczka. "In-network aggregation trade-offs for data collection in wireless sensor networks." International Journal of Sensor Networks, vol.1, no. 3, pp. 200-212, 2006.
- [35] W.R Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks", In Proc. IEEE of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 10, Maui, Hawaii, January 2000.
- [36] T. Pham, E.J. Kim, and M. Moh, "On data aggregation quality and energy efficiency of wireless sensor network protocols - Extended Summary", In Proc. Of IEEE First International Conference on Broadband Networks, pp. 730-732, San Jose, California, USA, October 2004.
- [37] W. Choi, P. Shah, and S.K. Das, "A framework for energy-saving data gathering using two-phase clustering in wireless sensor networks", In Proc. IEEE First annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 203-212, Boston, Massachusetts, USA, August 2004.
- [38] K. Dasgupta, K. Kalpakis, and P. Namjoshi, "An efficient clustering-based heuristic for data gathering and aggregation in sensor networks", In Proc. IEEE Wireless Communications and Networking, vol. 3, pp. 1948 – 1953, March 2003.
- [39] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K.M. Sivalingam, "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 13, pp. 924 – 935, 2002.
- [40] K. Du, J. Wu, and D. Zhou, "Chain-based protocols for data broadcasting and data gathering in the sensor networks", In Proc. of IEEE International Parallel and Distributed

Processing Symposium, Nice, France, April 2003.

- [41] N. Thepvilojanapong, Y. Tobe, and K. Sezaki, "On the construction of efficient data gathering tree in wireless sensor networks", IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp. 648 - 651, Kobe, Japan, May 2005.
- [42] H.Ö. Tan, and I. Körpeo, "Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks", ACM SIGMOD Record, Vol. 32, No. 4, pp. 66-71, 2003.
- [43] R.C. Prim, "Shortest connection networks and some generalizations", Bell System Technical Journal, Vol. 36, pp. 1389-1401, 1957.
- [44] T. He, B. Blum, J. Stankovic, and T. Abdelzaher, "AIDA: Adaptive application independent data aggregation in wireless sensor networks", ACM Transactions on Embedded Computing Systems, Vol.3, pp. 426–457, 2004.
- [45] P. Rickenbach, and R. Wattenhofer, "Gathering correlated data in sensor networks", In Proc of the 2004 joint workshop on Foundations of Mobile Computing, pp.60 – 66, Philadelphia, PA, USA, October 2004.
- [46] J. Chou, D. Petrovic, and K. Ramchandran, "A distributed and adaptive signal processing approach to reducing energy consumption in sensor networks", In Proc. 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications, Vol.2, pp. 1054–1062, San Francisco, California, USA, April 2003.
- [47] C. Tang, C.S. Raghavendra, and V.K. Prasanna, "An energy efficient adaptive distributed source coding scheme in wireless sensor networks", IEEE International Conference on Communications, Vol. 1, pp. 732-737, Alaska, USA, May 2003.
- [48] Y. Yao, and J. Gehrke, "The cougar approach to in-network query processing in sensor networks", ACM SIGMOD Record, Vol. 31, No. 3, pp. 9–18, 2002.
- [49] P. Seshadri, M. Livny, and R. Ramakrishnan, "SEQ: A Model for Sequence Databases", In Proc. 11th IEEE International Conference on Data Engineering, pp. 232-239, Taipei, Taiwan, March 1995.
- [50] S. Madden, M. Franklin, J. Hellerstein and W. Hong, "TinyDB: An Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks", In ACM Transactions on Database Systems (TODS), Vol. 30, No. 1, pp. 122 – 173, March 2005.

- [51] S.R. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, and W. Hong, "TAG: A tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks", ACM SIGOPS Operating Systems Review, Vol. 36, no. SI, pp. 131-146, 2002.
- [52] M.A. Sharaf, J. Beaver, A. Labrinidis, and P. K. Chrysanthis, "Balancing energy efficiency and quality of aggregate data in Sensor Networks", The International Journal on Very Large Data Bases, Vol. 13, pp. 384 – 403, 2004.
- [53] M. Watfa, W. Daher, and H. Al Azar. "A sensor network data aggregation technique." International Journal of Computer Theory and Engineering Vol. 1, No. 1, April 2009.
- [54] A. Manjeshwar, Q.A. Zeng, and D.P. Agrawal, "An analytical model for information retrieval in wireless sensor networks using enhanced APTEEN protocol", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 13, pp. 1290–1302, 2002.
- [55] A. Boulis, G. Saurabh, and M. B. Srivastava. "Aggregation in sensor networks: an energy–accuracy trade-off", Ad hoc networks, Vol.1, No. 2, pp. 317-331, 2003.
- [56] B. Yahya, and J. Ben-Othman. "Towards a classification of energy aware MAC protocols for wireless sensor networks." Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 9, No. 12, pp. 1572-1607, 2009.
- [57] S. Singh, and C. S. Raghavendra. "PAMAS—power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks." ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 28, No. 3, pp. 5-26, 1998.
- [58] K. Jamieson, H. Balakrishnan, YC. Tay "Sift: a MAC protocol for event-driven wireless sensor networks", MIT Laboratory for Computer Science, Technical Report, 894, 2003.
- [59] J. Ansari, X. Zhang, P. Mähönen, "Traffic aware medium access control protocol for wireless sensor networks", in Proc. of 7th ACM international symposium on Mobility management and wireless access, Tenerife, Canary Islands, October 2009.
- [60] X. Shi, G. Stromberg, "SyncWUF: an ultra-low-power MAC protocol for wireless sensor networks" IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 6, pp. 115–125, 2007.
- [61] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium access control with co-ordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 12, No. 3, pp. 493–506, 2004

- [62] G. Lu, B. Krishnamachari, C.S. Raghavendra, "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks", in Proc of 18th Parallel and Distributed Processing Symposium, Santa Fe, New Mexico, USA, April 2004.
- [63] TV. Dam, K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks", in Proc.of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, CA, USA, November 2003.
- [64] L. van Hoesel, P. Havinga, "A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks", in Proc. of the 1st International Workshop on Networked Sensing Systems, Tokyo, Japan, June 2004.
- [65] L. Bao and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "A New Approach to Channel Access Scheduling for Ad Hoc Networks," in Proc. of the 7th International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 210–21, Rome, Italy, July 2001.
- [66] K. Arisha, M. Youssef, M. Younis, "Energy-Aware TDMA-Based MAC for Sensor Networks", IEEE IMPACCT, pp. 21-40, 2002.
- [67] A. El-Hoiydi, "Spatial TDMA and CSMA with preamble sampling for low power ad hoc wireless sensor networks", In Proc. of the IEEE 7th International Symposium on Computers and Communications, pp. 685 - 692, Taormina, Italy, July 2002
- [68] A. El-Hoiydi, and J-D. Decotignie. "WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks." In Proc. of the IEEE 9th International Symposium on Computers and Communications, Vol. 1, pp. 244-251., Alexandria, Egypt, July 2004.
- [69] V. Rajendran, K. Obraczka, and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks", in Proc. of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp:181 - 192, Los Angeles, California, November 2003.
- [70] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, M.L. Sichitiu, "Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", in Proc. of the ACM SenSys Conference, pp. 90-101, San Diego, CA, November 2005,
- [71] C.K. Huang, Y.C. G.Y. Chang, and J.P. Sheu. "Load-Balanced Trees for Data Collection in Wireless Sensor Networks", in Proc. IEEE International Conference on Parallel Processing Workshops, pp. 474-479, Pittsburgh, PA, USA, September 2012.

- [72] T.S. Chen, H.W. Tsai, and C.P. Chu. "Gathering-load-balanced tree protocol for wireless sensor networks", in Proc. IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, vol. 2, pp. 8-13, Taichung, Taiwan, June 2006.
- [73] NS source code: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-build.html>
- [74] <http://www.allaboutbatteries.com/Energy-tables.html>
- [75] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, and Y. Li. "Research challenges and applications for underwater sensor networking", in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Vol. 1, pp. 228-235, Las Vegas, NV, USA, April 2006.
- [76] M. Stojanovic, "Acoustic (underwater) communications", in: J.G. Proakis (Ed.), Encyclopedia of Telecommunications, Wiley, New York, 2003.
- [77] D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, «The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry», IEEE Journal of Oceanic Engineering, OE-25(5):4–27, January 2000.
- [78] 802.1D IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Media Access Control (MAC) Bridges". IEEE. 2004. p. 154. Retrieved April 2010.
- [79] B. Sun, S.X. Gao, and Z.P. Jiang. "Optimal Selection of Aggregation Nodes in Sensor Networks with Time Delay Constraint", In Proc. of the IEEE 4th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, pp. 169-176, Wuhan, China, December 2008.
- [80] U. Roedig, A. Barroso, and C. J. Sreenan, "Determination of aggregation points in wireless sensor networks" in Proc. IEEE Euromicro Conference, pp. 503-510, Rennes, France, August 2004.
- [81] D. P. Bertsekas, Nonlinear Programming, Belmont, MA: Athena Scientific, 1999
- [82] D.P. Palomar, M. Chiang, A tutorial on decomposition methods for network utility maximization, IEEE Journal on Selected Areas in Com., vol.24, no.8, 1439-1451, (2006).
- [83] D. P. Bertsekas, A. Nedic, and A. Ozdaglar, Convex Analysis and Optimization, Belmont, MA: Athena Scientific, 2003
- [84] M. Chiang, S. H. Low, A. R. Calderbank, and J. C. Doyle, "Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architectures," IEEE Proceedings, vol. 95, no. 1, pp. 255–312, January 2007.

- [85] N. Gatsis, A. Ribeiro, G. B. Giannakis, "A Class of Convergent Algorithms for Resource Allocation in Wireless Fading Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 9, No. 5, May 2010.
- [86] Matlab available at: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [87] D.P. Bertsekas, R.G. Gallager, and P. Humblet, "Data networks", Vol. 2. Englewood Cliffs: Prentice-hall, 1987.
- [88] M. Schwartz, "Telecommunication networks: protocols, modeling and analysis", Vol. 7. Reading: Addison-Wesley, 1987.
- [89] L. Kleinrock, "Queueing systems : Theory", Vol. 1,. Wiley-interscience, 1975.
- [90] A. Voyiatzis, "A Survey of Delay-and Disruption-Tolerant Networking Applications." Journal of Internet Engineering, Vol. 5, No. 1, 2012.
- [91] K. Nichols, M. Holbrook, R. Lee Pitts, K. Gifford, A. Jenkins, and S. Kuzminsky. "DTN implementation and utilization options on the international space station." In SpaceOps 2010 Conference" Delivering on the dream", Huntsville, Alabama, Springer, April 2010.
- [92] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets", In Proc. of ACM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, pp. 27-34, Karlsruhe, Germany, August 2003.
- [93] RFC 5050 - Bundle Protocol Specification, November 2007