



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Διδακτορική Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με Ενεργειακά Αποδοτική Δρομολόγηση
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Νικολιδάκης Στέφανος
Πατρώνυμο	Ανδρέας
Επιβλέπων	Βέργαδος Δημήτρης, Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία Παράδοσης **2015**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ**

για την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος του Τμήματος Πληροφορικής του
Στέφανου Α. Νικολιδάκη

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :

Δημήτριος Βέργαδος
Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

ΜΕΛΗ:

Χρήστος Δουληγέρης
Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

Δέσποινα Πολέμη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πειραιώς

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δημήτριος Βέργαδος
Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

Χρήστος Δουληγέρης
Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

Δέσποινα Πολέμη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Πανεπιστημίου
Πειραιώς

Άγγελος Μιχάλας
Αναπληρωτής Καθηγητής ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας

Παναγιώτης Κοτζανικολάου
Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

Ξενοφών-Διονύσιος Κανδρής
Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Αθήνας

Ιωάννης Αναγνωστόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Στέφανος Νικολιδάκης

Τμήμα Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πειραιά

Copyright Στέφανος Νικολιδάκης, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All Rights Reserved.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην διατριβή αυτή περιγράφεται και αναλύεται το πρόβλημα της κατανάλωσης ενέργειας και η επιρροή του στην επίδοση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Αρχικά, προτείνεται η ταξινόμηση των πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επίσης, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του κάθε πρωτοκόλλου κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ τους, με βάση τις κυριότερες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Στην συνέχεια, προτείνεται το ECHERP, ένα πρωτόκολλο ενεργειακής απόδοσης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το ECHERP μαζί με τον αριθμό των γύρων θεωρεί το τρέχον και το εκτιμώμενο μελλοντικό επίπεδο ενέργειας των κόμβων που μπορεί να είναι επικεφαλής προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Το πρωτόκολλο υπολογίζει την ενέργεια που καταναλώνεται με τη χρήση του αλγορίθμου Gauss, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σε κάθε γύρο.

Ακολουθεί η ανάλυση της αυτοματοποιημένης άρδευσης στη γεωργία και προτείνεται ένα νέο σύστημα για την αποτελεσματική άρδευση χρησιμοποιώντας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το προτεινόμενο σύστημα βασίζεται σε ένα μοντέλο το οποίο εκτελεί την αποτελεσματική διαχείριση της άρδευσης με την εύρεση των κατάλληλων προγραμμάτων για την ορθολογική χρήση του νερού για άρδευση.

Επίσης, προτείνεται το HYCLRP, ένα πρωτόκολλο το οποίο συνδυάζει TDMA και CDMA. Το HYCLRP ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας με την ανάθεση κωδικών λέξεων με μικρότερο μήκος και με την επιλογή ως επικεφαλής των κόμβων που ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές. Αυτό γίνεται με την επιλογή των κόμβων με την υψηλότερη ενέργεια και με την μικρότερη συνολική απόσταση από τους άλλους. Το δίκτυο μοντελοποιείται ως γράφημα και επιλέγει χρώματα για την αποφυγή παρεμβολών. Οι κόμβοι με βάση τα χρώματα του γραφήματος χρησιμοποιούν κωδικές λέξεις που ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Η απόδοση του πρωτοκόλλου αξιολογείται από προσομοιώσεις.

Τέλος, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα επιστημονικά ευρήματα της διατριβής καθώς επίσης και μία σειρά από ανοιχτά ερευνητικά θέματα τα οποία αναδείχθηκαν κατά την εκτέλεση αυτής.

ABSTRACT

In this thesis, the energy consumption and its influence on the performance of wireless sensor networks is described.

Initially, the classification of the proposed routing protocols in wireless sensor networks is presented. Also the strengths and weaknesses of each protocol are emphasized by presenting a comparison which is based on the main parameters that characterize a wireless sensor network.

Then, ECHERP, an energy-efficient protocol for wireless sensor networks, is proposed. ECHERP along with the number of rounds considers the current and the estimated future energy level of nodes, which may result to the maximization of the network lifetime. The protocol calculates the energy consumed by using the Gauss algorithm, in order to minimize the total energy consumption of the network in each round.

Then, the analysis of automated irrigation in agriculture through the use of a new system for efficient irrigation using wireless sensor networks is discussed. The proposed system is based on a model that performs efficient management irrigation by finding appropriate programs for the rational use of water for irrigation.

Also, HYCLRP, a TDMA/CDMA protocol, is proposed. HYCLRP minimizes energy consumption by assigning codewords with shorter lengths and select as head nodes that minimize interference. This is achieved by selecting the node with the highest residual energy and the smallest total distance from the others. The network is modeled as a graph and selects colors to avoid interference. The nodes, based on the colors of the graph, use codewords that minimize energy consumption in the network. The performance of the protocol is evaluated by simulations.

Finally, the most important scientific discoveries of the thesis as well as a series of open research issues that emerged during the execution thereof are presented.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου επίκουρο καθηγητή κ. Δημ. Βέργαδο καθώς και τον καθηγητή κ. Χρήστος Δουληγέρι για την πολύτιμη καθοδήγηση που προσέφεραν στη διάρκεια της διατριβής μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την αναπληρώτρια καθηγήτρια κ. Δέσποινα Πολέμη και την Δρ. κ. Αγγελική Σγώρα για την βοήθεια που μου προσέφεραν κατά την εκπόνηση της διατριβής. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Διονύσιο Κανδρή. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Νικόλαο Πανταζή.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου και την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου που με στηρίζει σε κάθε μου βήμα.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	14
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 Εισαγωγή	14
1.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	15
1.2.1 Μοντέλα Κατανάλωσης Ενέργειας στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	15
1.2.2 Μοτίβα Κίνησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	18
1.2.3 Εφαρμογές.....	18
1.3 Χαρακτηριστικά Πρωτοκόλλων για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	19
1.4 Σκοπός Διατριβής	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	23
Ταξινόμηση Ενεργειακά Αποδοτικών Πρωτοκόλλων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	23
2.1. Εισαγωγή	23
2.2. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	23
2.3. Επιλογή Πρωτοκόλλου στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	26
2.3.1 Εξοικονόμηση Ενέργειας με την Επιλογή της Βέλτιστης Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	29
2.3.2 Ελαχιστοποίηση των Επιβαρύνσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	30
2.3.3 Παράγοντες που Επηρεάζουν τον Σχεδιασμό Πρωτοκόλλων Εξοικονόμησης Ενέργειας.....	30
2.4 Τεχνικές Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	32
2.4.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Δομή του Δικτύου (Network Structure)	32
2.4.2 Πρωτόκολλα Βασισμένα στο Μοντέλο Επικοινωνίας (Communication Model)	33
2.4.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοπολογία (Topology Based).....	33
2.4.4 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Αξιόπιστη Δρομολόγηση (Reliable Routing) 34	
2.4.5 Σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών δρομολόγησης	34
2.5 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Δομή του Δικτύου	36
2.5.1 Επίπεδα Πρωτόκολλα Δρομολόγησης (Flat Protocols)	36

2.5.1.1 Προληπτικά (Pro-active) ή (Table-Driven) Πρωτόκολλα Δρομολόγησης	36
2.5.1.1.1 Το Ασύρματο Πρωτόκολλο Δρομολόγησης (WRP)	36
2.5.1.1.2 Το πρωτόκολλο βασιζόμενο στην Τοπολογία Διάδοσης Αντίστροφου Μονοπατιού (TBRPF)	37
2.5.1.2 Αντιδραστικά (Re-active) ή On-Demand Πρωτόκολλα Δρομολόγησης	38
2.5.1.2.1 Το πρωτόκολλο Προσωρινής Διάταξης (TORA)	39
2.5.1.2.2 Το πρωτόκολλο κουτσομπολιό (Gossiping)	39
2.5.1.2.3 Το πρωτόκολλο Πλημμύρας (Flooding)	40
2.5.1.2.4 Το πρωτόκολλο Φήμης (RR)	40
2.5.1.2.5 Το πρωτόκολλο Ενεργειακής Επίγνωσης Προσωρινής Διάταξης (E-TORA)	41
2.5.1.3 Σύγκριση μεταξύ Προληπτικών και Αντιδραστικών πρωτοκόλλων	42
2.5.1.4 Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης	43
2.5.1.4.1 Το πρωτόκολλο Ζώνης (ZRP)	44
2.5.2 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης	46
2.5.2.1 Το πρωτόκολλο Χαμηλής Ενέργειας Προσαρμοσμένων Συστάδων (LEACH)	46
2.5.2.2 Το πρωτόκολλο Χαμηλής Ενέργειας Κεντρικοποιημένων Συστάδων (LEACH-C)	47
2.5.2.3 Το πρωτόκολλο Ενεργειακής Απόδοσης Συλλογής (PEGASIS)	47
2.5.2.4 Το πρωτόκολλο Ευαίσθητου Ορίου Δικτύου Αισθητήρων (TEEN)	48
2.5.2.5 Το πρωτόκολλο Προσαρμοσμένου Ευαίσθητου Ορίου Δικτύου Αισθητήρων (APTEEN)	48
2.5.2.6 Το πρωτόκολλο Εικονικής Άπληστης Αρχιτεκτονικής Δρομολόγησης (VGA)	48
2.5.2.7 Το πρωτόκολλο Διπλής Διάδοσης Δεδομένων (TTDD)	49
2.5.2.8 Το πρωτόκολλο Ελεγχόμενης Δυναμικής Συσταδοποίησης Σταθμού Βάσης (BCDCP)	49
2.5.2.9 Το πρωτόκολλο Πολλαπλών Βημάτων (MIMO)	50
2.5.2.10 Το πρωτόκολλο Ιεραρχικής Επίγνωσης Ισχύος Δρομολόγησης (HPAR)	50
2.5.2.11 Το πρωτόκολλο Προγραμματισμού Ύπνου/Ξυπνήματος (Sleep/Wake)	51

2.5.3 Σύγκριση Επίπεδων και Ιεραρχικών Πρωτοκόλλων	52
2.6 Πρωτόκολλα Βασισμένα στο Μοντέλο Επικοινωνίας (Communication Model)..	55
2.6.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα στα Ερωτήματα (Query-Based)	55
2.6.1.1 Το πρωτόκολλο Κατευθυνόμενης Διάχυσης (DD).....	55
2.6.1.2 Το πρωτόκολλο COUGAR.....	56
2.6.1.3 Το πρωτόκολλο Ενεργούς Προώθησης Ερωτημάτων (ACQUIRE).....	56
2.6.2 Συνεκτικά και μη-Συνεκτικά πρωτόκολλα (Coherent and Non-Coherent).....	59
2.6.2.1 Το πρωτόκολλο του ενός Νικητή (SWE)	59
2.6.2.2 Το πρωτόκολλο Πολλών Νικητών (MWE).....	60
2.6.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Διαπραγμάτευση (Negotiation-Based)	62
2.6.3.1 Το πρωτόκολλο Επικοινωνίας από άκρο σε άκρο (SPIN-PP).....	62
2.6.3.2 Το πρωτόκολλο SPIN για Εξοικονόμηση Ενέργειας (SPIN-EC)	63
2.6.3.3 Το πρωτόκολλο SPIN για Δίκτυα Εκπομπής (SPIN-BC)	63
2.6.3.4 Το πρωτόκολλο SPIN για Αξιοπιστία (SPIN-RL)	64
2.6.4 Σύγκριση των Βασισμένων στα Ερωτήματα Πρωτοκόλλων με τα Βασισμένα στην Διαπραγμάτευση Πρωτόκολλα και τα Συνεκτικά ή μη Συνεκτικά Πρωτόκολλα	64
2.7 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοπολογία του Δικτύου (Topology Based).....	66
2.7.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Θέση (Location-Based)	66
2.7.1.1 Το πρωτόκολλο Απόστασης Δρομολόγησης για Κινητούς Κόμβους (DREAM)	66
2.7.1.2 Το πρωτόκολλο Επίγνωσης της Θέσης και της Ενέργειας (GEAR)	67
2.7.1.3 Το πρωτόκολλο Γραφικής Ενσωμάτωσης Δρομολόγησης (GEM).....	67
2.7.1.4 Το πρωτόκολλο Σιωπηρής Γεωγραφικής Προώθησης (IGF).....	68
2.7.1.5 Το πρωτόκολλο Ενεργειακής Απόδοσης Τοποθεσίας (SELAR)	68
2.7.1.6 Το πρωτόκολλο Άπληστου Κατανεμημένου Δέντρου (GDSTR)	69
2.7.1.7 Το πρωτόκολλο Ελάχιστης Ενέργειας Τοποθεσίας (MERR).....	70
2.7.1.8 Το πρωτόκολλο Γεωγραφικής Αντιδραστικής Προώθησης (OGF).....	70
2.7.1.9 Το πρωτόκολλο Μερικής Τμηματοποίησης για Αποφυγή Γεωγραφικής Δρομολόγησης (PAGER-M)	71
2.7.1.10 Το πρωτόκολλο Υβριδικής Γεωγραφικής Δρομολόγησης (HGR).....	71

2.7.2 Πρωτόκολλα Βασισμένα σε Κινητούς Πράκτορες (Mobile Agent-based Protocols)	74
2.7.2.1 Το πρωτόκολλο Πολλαπλών Πρακτόρων που βασίζεται στο Σχεδιασμό Διαδρομής (MIP)	75
2.7.2.2 Τα Πρωτόκολλα Ελάχιστης Ενέργειας Διαδρομής για την Επιλογή της Πρώτης Πηγής (IEMF) και Ελάχιστης Ενέργειας Διαδρομής (IEMA)	75
2.7.3 Σύγκριση των Πρωτοκόλλων Βασισμένα στη Θέση με αυτά Βασισμένα σε Κινητούς Πράκτορες	77
2.8 Αξιόπιστα Πρωτόκολλα Δρομολόγησης (Reliable Routing)	78
2.8.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα σε Πολλαπλές Διαδρομές (Multipath Based).....	78
2.8.1.1 Το πρωτόκολλο Δρομολόγησης Αντιδραστικών Άκυκλων Πολλαπλών Διαδρομών (ROAM)	78
2.8.1.2 Το Πρωτόκολλο Ετικέτας Πολλαπλής Δρομολόγησης (LMR)	79
2.8.1.3 Το πρωτόκολλο Μετάδοσης Κλήσης (GRAB)	79
2.8.1.4 Το πρωτόκολλο Ιεραρχικής Πολλαπλής Διαδρομής (HMRP).....	80
2.8.1.5 Το Πρωτόκολλο Βασισμένο σε Συμπλέγματα Πολλαπλής Δρομολόγησης (CBMPR).....	80
2.8.1.6 Το πρωτόκολλο Κατευθυνόμενης Γεωγραφικής Δρομολόγησης (DGR) 81	
2.8.1.7 Το πρωτόκολλο Κατευθυνόμενης Ελεγχόμενης Σύντηξης (DCF).....	82
2.8.1.8 Το Πρωτόκολλο Δρομολόγησης για Δίκτυα με Χαμηλή Ισχύ και Απώλειες (RPL).....	83
2.8.2 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS-Based)	86
2.8.2.1 Το πρωτόκολλο Διαδοχικής Ανάθεσης Δρομολόγησης (SAR)	86
2.8.2.2 Το πρωτόκολλο SPEED	86
2.8.2.3 Το πρωτόκολλο Πολλαπλής Διαδρομής Multi-SPEED (MMSPEED)	87
2.8.2.4 Το Πρωτόκολλο Κινητών Πολυμέσων Γεωγραφικής Δρομολόγησης (MGR)	87
2.8.3 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Βασισμένα σε Πολλαπλές Διαδρομές με Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Ποιότητα Υπηρεσίας	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	93
Προτεινόμενο Σχήμα Δρομολόγησης μέσω Ενεργειακά Ισορροπημένων Συστάδων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	93
3.1 Εισαγωγή	93

3.2 Προτεινόμενο Πρωτόκολλο για Ενεργειακά Αποδοτική Δρομολόγηση στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	94
3.2.1 Περιγραφή του Ενεργειακού Μοντέλου	94
3.2.2 Περιγραφή του ECHERP	94
3.3 Εκτίμηση Επίδοσης του ECHERP	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	105
Προτεινόμενο Σχήμα Εξοικονόμησης Ενέργειας με Αυτοματοποιημένο Έλεγχο της Άρδευσης στη Γεωργία με τη Χρήση Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	105
4.1 Εισαγωγή	105
4.2 Σχετική Βιβλιογραφία	107
4.3 Επισκόπηση Προτεινόμενου Συστήματος	109
4.3.1 Σύστημα Άρδευσης και Λήψης Αποφάσεων	111
4.3.2 Μελέτη Χρήσης	115
4.4 Εκτίμηση Επίδοσης	119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	126
Προτεινόμενο HYCLRP: Ένα Υβριδικό Διαστρωματικό Πρωτόκολλο Δρομολόγησης για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	126
5.1 Εισαγωγή	126
5.2 Σχετική Βιβλιογραφία	127
5.3 Το Πρωτόκολλο HYCLP	129
5.3.1 Το Ενεργειακό Μοντέλο του πρωτοκόλλου	129
5.3.2 Φάση Επιλογής Επικεφαλής Συμπλέγματος	130
5.3.3 Φάση Επιλογής Κώδικα	131
5.3.4 Φάση Δρομολόγησης	134
5.4 Ανάλυση Πολυπλοκότητας	137
5.5 Εκτίμηση Επίδοσης του προτεινόμενου μοντέλου	138
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	145
Συμπεράσματα Διατριβής	145
Αναφορές	149

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Η αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κόμβου.....	15
Σχήμα 2. Τα μοτίβα κίνησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.....	18
Σχήμα 3. Κατηγοριοποίηση Πρωτοκόλλων στα ΑΔΑ.	35
Σχήμα 4. Το TORA προωθεί τα πακέτα σε καθοδική κατεύθυνση [52].	39
Σχήμα 5. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης Φήμης [56].	41
Σχήμα 6. Ένας κόμβος και ένας σταθμός στο πρωτόκολλο TTDD [73].	49
Σχήμα 7. Το πρωτόκολλο MIMO [75].	50
Σχήμα 8. Το ιεραρχικό δέντρο στο πρωτόκολλο Sleep/Wake[77].	52
Σχήμα 9. α) Διάδοση ενδιαφέροντος, β) Αρχικές κλήσεις, γ) Παράδοση δεδομένων κατά μήκος της διαδρομής [85]	56
Σχήμα 10. Η επιλογή κόμβου στο SWE [89].....	60
Σχήμα 11. Το πρωτόκολλο Spin και τα πακέτα ADV, REQ και DATA [92].	62
Σχήμα 12. Το μοντέλο διάδοσης των πακέτων δεδομένων [100].....	69
Σχήμα 13. Η επιλογή της βέλτιστης διαδρομής δρομολόγησης [102].	70
Σχήμα 14. Οι πολλαπλές διαδρομές καθορίζονται με το συμβατικό πρωτόκολλο δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών και με το πρωτόκολλο CBMPR [120].....	81
Σχήμα 15. Το DGR με βάση τη μετάδοση βίντεο μέσω πολλαπλών διαδρομών.....	82
Σχήμα 16. Οι πολλαπλοί κόμβοι στο LLN που συντονίζονται από ένα σκελετό και αποστέλλουν το ίδιο DAGID.....	83
Σχήμα 17. Η αποστολή πακέτων στο πρωτόκολλο Speed [128].	87
Σχήμα 18. Η Στρατηγική Επιλογή θέσης στο MGR.....	88
Σχήμα 19. Το μοντέλο δικτύου που χρησιμοποιείται.....	95
Σχήμα 20. Δημιουργία συστάδων και αποστολή δεδομένων στο ECHERP.	97
Σχήμα 21. Ο ψευδο-κώδικας του αλγόριθμου Gauss που χρησιμοποιείται στο ECHERP.	98
Σχήμα 22. Μέση κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.	100
Σχήμα 23. Αριθμός ενεργών κόμβων σε σύγκριση με τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.	100
Σχήμα 24. Εξάντληση του τελευταίου κόμβου σε γύρους έναντι του N_r , όταν ο σταθμός βάσης βρίσκεται 100 m, 150 m, 200 m, 300 m και 400 m από το κέντρο του πεδίου.....	101
Σχήμα 25. Εξάντληση του πρώτου κόμβου σε γύρους έναντι N_r όταν ο BS, βρίσκεται 100 m, 150 m, 200 m, 300 m και 400 m από το κέντρο του πεδίου.....	101
Σχήμα 26. Η απόσταση του BS από το κέντρο της περιοχής όταν ο τελευταίος κόμβος μένει από ενέργεια σε γύρους, καθώς μεταβάλλεται η αναλογία κόμβων.	102
Σχήμα 27. Η απόσταση του BS από το κέντρο της περιοχής όταν ο πρώτος κόμβος μένει από ενέργεια σε γύρους, καθώς μεταβάλλεται η αναλογία κόμβων.....	102
Σχήμα 28. Γειτονικά αγροτεμάχια που φιλοξενούν διαφορετικά είδη καλλιεργειών.	109
Σχήμα 29. α) Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του WSN, β) Το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου συστήματος λήψης αποφάσεων.	110
Σχήμα 30. Η ποσότητα νερού που απαιτείται με βάση τα ιστορικά $QW_{history}$ και πραγματικά δεδομένα QW_i	116
Σχήμα 31. Η ποσότητα νερού που απαιτείται με βάση το ρυθμό και τα δεδομένα από τους αισθητήρες.....	117

Σχήμα 32. Η ποσότητα του νερού που απαιτείται σε κάθε αγροτεμάχιο, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.	118
Σχήμα 33. Η ποσότητα του νερού που απαιτείται σε κάθε αγροτεμάχιο με βάση την αλλαγή της πραγματικής διάρκειας σε ηλιακό φως.....	119
Σχήμα 34. Αριθμός ενεργών κόμβων προς τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.	121
Σχήμα 35. Μέση κατανάλωση ενέργειας προς τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.	121
Σχήμα 36. Η ποσότητα νερού που απαιτείται ως συνάρτηση του διαστήματος δειγματοληψίας.	122
Σχήμα 37. Διάρκεια ζωής του δικτύου σε συνάρτηση της αναλογίας νερού/διάρκεια.	123
Σχήμα 38. Μέγεθος του δικτύου σε συνάρτηση της αναλογίας νερού/διάρκεια.....	123
Σχήμα 39. Ο ψευδοκώδικας επιλογής επικεφαλής του HYCLRP.....	130
Σχήμα 40. Συστάδα κόμβων: α) κόμβος $n3$ είναι ο επικεφαλής, β) ο κόμβος $n5$ είναι ο επικεφαλής.	131
Σχήμα 41. Κώδικας OVSF: α) δομή του δέντρου, β) δυαδική απεικόνιση των χρωμάτων.	132
Σχήμα 42. Γράφημα παρεμβολής για τις συστάδες: α) $n3$ είναι ο επικεφαλής, β) $n5$ είναι ο επικεφαλής.	133
Σχήμα 43. Ο αλγόριθμος επιλογής κώδικα που χρησιμοποιείται στο HYCLRP [171].	134
Σχήμα 44. Κατώτερου και ανώτερου επιπέδου συστάδες.	134
Σχήμα 45. Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου μοντέλου.....	136
Σχήμα 46. Ενεργοί κόμβοι έναντι του ποσοστού των κόμβων που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιοι επικεφαλής l και του συνολικού αριθμού κόμβων στο σύμπλεγμα. ..	140
Σχήμα 47. Μέση κατανάλωση ενέργειας έναντι του ποσοστού των κόμβων που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιοι επικεφαλής l και του συνολικού αριθμού κόμβων συμπλέγματος.	140
Σχήμα 48. Ενεργοί κόμβοι όταν το ποσοστό των κόμβων που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιοι επικεφαλής είναι ίσο με 30%, ενώ αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου. ..	141
Σχήμα 49. Μέση κατανάλωση ενέργειας όταν το ποσοστό των κόμβων που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιοι επικεφαλής είναι ίσο με 30%, ενώ η αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου.....	141
Σχήμα 50. Ενεργοί κόμβοι σε σύγκριση με τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.	142
Σχήμα 51. Μέση κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.	142
Σχήμα 52. Χρόνος εξάντλησης τελευταίου κόμβου σε γύρους σε συνάρτηση των κόμβων ανώτερου επιπέδου με τους κόμβους κατώτερου επιπέδου όταν ο BS βρίσκεται 100μ, 200μ, 300μ και 400μ από το κέντρο της περιοχής.....	143
Σχήμα 53. Χρόνος εξάντλησης πρώτου κόμβου γύρους σε συνάρτηση των κόμβων ανώτερου επιπέδου με τους κόμβους κατώτερου επιπέδου όταν ο BS βρίσκεται 100μ, 200μ, 300μ και 400μ από το κέντρο της περιοχής.....	144

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων - ΑΔΑ (Wireless Sensor Network - WSN) αποτελείται από ασύρματους κόμβους με περιορισμένες δυνατότητες οι οποίοι μπορεί να είναι κινούμενοι ή στατικοί και οι οποίοι είναι τοποθετημένοι, πολλές φορές τυχαία, σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Η επιλογή της κατάλληλης δρομολόγησης είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αποτελεσματική αποστολή των πακέτων στον προορισμό τους. Στα δίκτυα αυτά, η δρομολόγηση θα πρέπει να εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και κατά συνέπεια τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου [1].

Τα πρώτα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του '70 από τις στρατιωτικές και αμυντικές βιομηχανίες. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιήθηκαν επίσης κατά τη διάρκεια του πολέμου στο Βιετνάμ, προκειμένου να ενισχύσουν τις προσπάθειες εντοπισμού των εχθρών σε απομακρυσμένες περιοχές της ζούγκλας. Ωστόσο, η εφαρμογή τους είχε αρκετά μειονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένων του αριθμού των αισθητήρων που υποστηρίζονται, της ενέργειας που καταναλώνουν και της περιορισμένης επεξεργαστικής ικανότητας του δικτύου.

Από τότε, έχει γίνει αρκετή δουλειά στον τομέα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με αποτέλεσμα την ανάπτυξή τους σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών και συστημάτων με πολύ διαφορετικές απαιτήσεις και χαρακτηριστικά. Παράλληλα, έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας, προκειμένου να επιτύχουν την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων στον προορισμό τους. Για να μπορούν να επιτύχουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας τα πρωτόκολλα αυτά πρέπει να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ανάλογα από την εφαρμογή και την αρχιτεκτονική του δικτύου.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε μια ποικιλία δραστηριοτήτων ή υπηρεσιών της καθημερινής ζωής. Για παράδειγμα, μια εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων μπορεί να είναι η εποπτεία συστημάτων. Στον τομέα αυτό, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναπτύσσονται σε μια περιοχή, προκειμένου να εποπτεύσουν κάποιο φαινόμενο. Μια πρακτική χρήση ενός τέτοιου δικτύου θα μπορούσε να είναι η χρήση αισθητήρων για την ανίχνευση μιας εχθρικής εισβολής. Μια παρόμοια εφαρμογή χρήσης είναι η εποπτεία της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπου τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναπτύσσονται σε διάφορες πόλεις για την εποπτεία της συγκέντρωσης των επικίνδυνων αερίων για τους πολίτες. Επιπλέον, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση δασικών πυρκαγιών. Οι κόμβοι μπορεί να είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των αερίων που παράγονται από φωτιά σε δέντρα ή σε βλάστηση.

Επιπλέον, μια σημαντική περιοχή χρήσης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ο τομέας της υγείας. Στην περιοχή αυτή τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους και να παρέχουν λειτουργίες που θα βοηθήσουν τους ηλικιωμένους που ζουν μόνοι στο σπίτι ή σε άτομα με χρόνιες

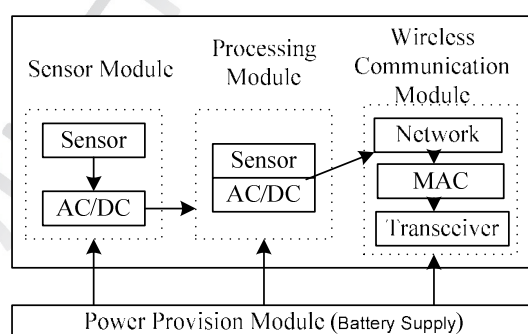
παθήσεις στις καθημερινές τους δραστηριότητες. Στα ενσύρματα συστήματα, η εγκατάσταση αισθητήρων αρκετά συχνά περιορίζεται από το κόστος της καλωδίωσης. Οι απρόσιτες περιοχές, τα περιστρεφόμενα μηχανήματα, οι επικίνδυνες ή περιορισμένης πρόσβασης περιοχές και τα κινητά συστήματα μπορούν πλέον να επικοινωνήσουν με τους ασύρματους αισθητήρες.

Επιπλέον, η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στην γεωργία μπορεί να βοηθήσει τον αγρότη από την αποφυγή της ανάπτυξης καλωδίων σε ένα δύσκολο περιβάλλον. Τα συστήματα τροφοδοσίας νερού μπορεί να ελεγχθούν χρησιμοποιώντας αισθητήρες πίεσης οι οποίοι παρακολουθούν τα επίπεδα του νερού της δεξαμενής, οι αντλίες μπορεί να ελεγχθούν με τη χρήση ασύρματων συσκευών και η χρήση του νερού μπορεί να μετρηθεί και να σταλεί ασύρματα σε ένα κέντρο ελέγχου για αξιολόγηση. Η βιομηχανία νερού μπορεί να ωφεληθεί με την εξοικονόμηση ενέργειας ή τη μετάδοση δεδομένων με τη χρήση αισθητήρων που τροφοδοτούνται με ηλιακούς συλλέκτες ή συστοιχίες μπαταριών.

1.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

1.2.1 Μοντέλα Κατανάλωσης Ενέργειας στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Οι κόμβοι αισθητήρων αποτελούνται από διάφορα τμήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1: μονάδα αισθητήρα, μονάδα επεξεργασίας, ασύρματη μονάδα επικοινωνίας και τροφοδοσία. Αυτά τα στοιχεία λειτουργούν μαζί για να κάνουν τον κόμβο λειτουργικό σε ένα ασύρματο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να αξιολογηθεί η κατανάλωση ενέργειας ενός κόμβου, είναι σημαντικό να μελετηθεί η ενεργειακή κατανάλωση των στοιχείων του.



Σχήμα 1. Η αρχιτεκτονική ενός ασύρματου κόμβου.

Υπάρχουν κάποιες έρευνες που προτείνουν και περιγράφουν διάφορα μοντέλα ενεργειακής απόδοσης για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι περισσότερες από αυτές βασίζονται σε μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων, ενώ την ίδια στιγμή εξετάζεται ο αντίκτυπος του υλικού ενός κόμβου και της ραδιοσυχνότητας. Ωστόσο, σε πραγματικές εφαρμογές θα πρέπει να εξετάζεται η κατανάλωση ενέργειας του κάθε στοιχείου του κόμβου και η επίδραση της ραδιοσυχνότητας.

Ειδικότερα, οι συγγραφείς στο [2] παρουσιάζουν ένα ρεαλιστικό μοντέλο κατανάλωσης ισχύος για συσκευές ΑΔΑ ενσωματώνοντας τα χαρακτηριστικά ενός χαμηλής ενέργειας πομποδέκτη. Η έρευνα αυτή αποδεικνύει ότι για τυπικά χαρακτηριστικά του υλικού και της ραδιοσυχνότητας, όταν υπάρχει δυνατότητα

μεταφοράς δεδομένων χρησιμοποιώντας πολλαπλά βήματα, θα πρέπει αυτή να προτιμάται καθώς καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από ότι η δρομολόγηση ενός βήματος.

Στο [3], παρουσιάζεται ένα ενεργειακά αποδοτικό μοντέλο ειδικά κατασκευασμένο για πραγματική χρήση. Αυτό το μοντέλο του συστήματος επικοινωνίας φαίνεται να είναι σχετικά απλό, χρησιμοποιούνται μόνο δύο καταστάσεις μια το μικροελεγκτή και μια τη ραδιοσυχνότητα. Από την άλλη, στο [4], οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα ενεργειακά αποδοτικό μοντέλο το οποίο χωρίζεται σε ένα σύνολο μηχανών πεπερασμένης κατάστασης που εκπροσωπούν τις καταστάσεις μεταβάσεις του υλικού ενός κόμβου. Με αυτό το μοντέλο και την εφαρμογή του πραγματικού συστήματος μέτρησης ενέργειας, είναι δυνατόν να έχουμε μια πιο λεπτομερή και ακριβή εικόνα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται από το πραγματικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να ρυθμίσουν την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων αυτόματα κατά το χρόνο λειτουργίας. Επιπλέον, στο [5], προτείνεται ένα γενικό μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με βάση την πραγματική αρχιτεκτονική του υλικού. Για να επιτευχθεί αυτό, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν την μετρηθείσα ενεργειακή κατανάλωση των πραγματικών στοιχείων του υλικού και εφαρμόζουν ένα ρεαλιστικό μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό το μοντέλο αντανάκλα την κατανάλωση ενέργειας σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας και κατά τη διάρκεια της μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων των συσκευών. Σε αυτό το μοντέλο η κατανάλωση ενέργειας της επικοινωνίας θεωρείται ότι επηρεάζεται από τη μονάδα λήψης (Rx), τη μονάδα εκπομπής (Tx), το ρυθμιστής τάσης (VR), το ταλαντωτή κρυστάλλου (XOSC), τη γεννήτρια πόλωσης (BG) και το συνθέτη συχνοτήτων (FS).

Ένα άλλο μοντέλο που σχετίζεται με την κατανάλωση ενέργειας του επεξεργαστή του κόμβου (CPU) παρουσιάζεται στο [6]. Είναι ένα μοντέλο πιθανοτήτων που αξιολογεί την κατανάλωση ενέργειας για την CPU των ασύρματων κόμβων. Αυτό το μοντέλο, προκειμένου να αξιολογήσει την κατανάλωση ενέργειας της CPU, υπολογίζει τη δαπάνη ενέργειας στις καταστάσεις αναμονής, ενεργοποίησης, αδράνειας και λειτουργίας της CPU. Το συνολικό ποσό αυτής της κατανάλωσης της CPU μαζί με την διάρκεια είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Μια πιο πρόσφατη προσέγγιση σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων WSN παρουσιάζεται στο [7]. Αναλυτικότερα, η κατανάλωση ενέργειας των ασύρματων κόμβων σύμφωνα με το Σχήμα 1 εξαρτάται από τα στοιχεία του κόμβου και συνοψίζεται στα ακόλουθα:

- *Μονάδα αισθητήρα.* Η κατανάλωση ενέργειας της μονάδας αισθητήρα οφείλεται σε διάφορες λειτουργίες. Αυτές περιλαμβάνουν τη δειγματοληψία σήματος, την μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (AD) και την διαμόρφωση σήματος. Επίσης, η κατανάλωση ενέργειας σχετίζεται με τη λειτουργία ανίχνευσης του κόμβου (περιοδική, ύπνου/αφύπνισης, κλπ.). Για παράδειγμα, σε περιοδική λειτουργία η κατανάλωση ενέργειας E_{sensor} διαμορφώνεται ως $E_{sensor} = E_{on-off} + E_{off-on} + E_{sensor-run}$ (1). Σε αυτή τη σχέση το E_{on-off} είναι η κατανάλωση ενέργειας για την απενεργοποίηση της λειτουργίας του αισθητήρα, το E_{off-on} είναι η κατανάλωση ενέργειας για την ενεργοποίηση της λειτουργίας του αισθητήρα και το $E_{sensor-run}$ είναι η κατανάλωση ενέργειας της λειτουργίας ανίχνευσης που είναι ίση με την τάση

λειτουργίας που πολλαπλασιάζεται με την ενέργεια των αισθητήρων και το χρονικό διάστημα της λειτουργίας ανίχνευσης.

- *Μονάδα Επεξεργασίας.* Οι κύριες λειτουργίες αυτής της μονάδας είναι ο έλεγχος του αισθητήρα, το πρωτόκολλο επικοινωνίας και η επεξεργασία δεδομένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτή η μονάδα υποστηρίζει τρεις καταστάσεις λειτουργίας (απενεργοποιημένη, αδρανής, ενεργή). Η κατανάλωση ενέργειας του επεξεργαστή, E_{cpu} , είναι το άθροισμα της σταθερής κατανάλωσης ενέργειας $E_{cpu-state}$ και της κατανάλωσης ενέργειας για την αποστολή δεδομένων $E_{cpu-change}$. Αν θεωρήσουμε ότι $i = 1, 2, \dots, m$ είναι η κατάσταση λειτουργίας του επεξεργαστή, m είναι ο αριθμός της κατάστασης του επεξεργαστή, $j = 1, 2, \dots, n$, είναι ο τύπος της κατάστασης αποστολής των δεδομένων και n είναι ο αριθμός της κατάστασης αποστολής, τότε $E_{cpu} = E_{cpu-state} + E_{cpu-change} =$

$$\sum_{i=1}^m P_{cpu-state}(i)T_{cpu-state}(i) + \sum_{j=1}^n N_{cpu-change}(j)e_{cpu-change}(j) \quad (2).$$

Σε αυτή τη σχέση, το $P_{cpu-state}(i)$ είναι η ενέργεια της κατάστασης i που μπορεί να βρεθεί στο εγχειρίδιο αναφοράς, το $T_{cpu-state}(i)$ είναι το χρονικό διάστημα στην κατάσταση i το οποίο είναι μια στατιστική μεταβλητή. Το $N_{cpu-change}(j)$ είναι η συχνότητα της μεταβατικής κατάστασης και j είναι η κατανάλωση ενέργειας από ένα χρόνο μεταβατικής κατάστασης j .

- *Ασύρματη Μονάδα Επικοινωνίας.* Η συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά τη μετάδοση, P_T , και κατά την λήψη, P_R , είναι ίσες αντίστοιχα ως $P_T(d) = P_{TB} + P_{TRF} + P_A(d) = P_{T0} + P_A(d)$, (3)

$P_R = P_{RB} + P_{RRF} + P_L = P_{R0}$ (4). Το $P_A(d)$ είναι η κατανάλωση ισχύος του ενισχυτή ισχύος και είναι συνάρτηση της απόστασης μετάδοσης d . Το $P_A(d)$ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την ειδική κατασκευή του υλικού, την κατάσταση πόλωσης DC, τα χαρακτηριστικά του φορτίου, την συχνότητα λειτουργίας P_A και την ισχύ εξόδου P_{Tx} [8]. Το P_{TB} , P_{TRF} , P_{RB} , P_{RRF} και P_L δεν εξαρτώνται από την απόσταση μετάδοσης.

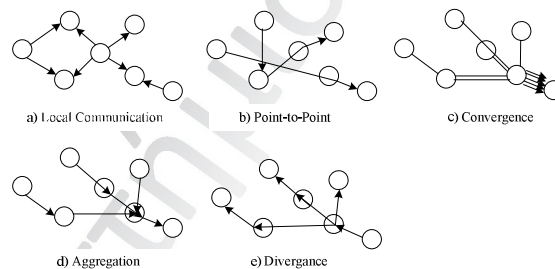
- *Μονάδα Τροφοδοσίας.* Η μονάδα τροφοδοσίας των κόμβων διαφέρει μεταξύ των διαφόρων κατασκευαστών και μοντέλων του κάθε κόμβου. Για παράδειγμα, ένας ασύρματος αισθητήρας LOTUS και ο κόμβος IRIS που αναπτύχθηκαν από την MEMSIC λειτουργούν και οι δύο με δύο μπαταρίες AA, ενώ η κατανάλωση ενέργειας για την λειτουργία λήψης είναι 16mA και για την εκπομπή για τιμή Tx 17dBm, -3dBm, +3 dBm καταναλώνουν 10mA, 13mA και 17mA αντίστοιχα. Από την άλλη, ο κόμβος MICA2, ο οποίος τροφοδοτείται επίσης με δύο μπαταρίες AA, για την εκπομπή με μέγιστη ισχύ καταναλώνει 27mA και έχει μέσο όρο κατανάλωσης για την λήψη 10mA. Επίσης, σε κατάσταση απενεργοποίησης καταναλώνει λιγότερο από 1μΑ. Ένα πραγματικό παράδειγμα εγκατάστασης όπου χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες MICA παρουσιάζεται στο [9]. Σε αυτή την εφαρμογή παρουσιάζεται μια λεπτομερής μελέτη των απαιτήσεων ισχύος του κόμβου MICA για διαφορετικές λειτουργίες.

1.2.2 Μοτίβα Κίνησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν μοναδικά ασύμμετρα μοτίβα κίνησης. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του ότι κατά την λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για τη συλλογή στοιχείων, οι κόμβοι στέλνουν διαρκώς μηνύματα στο σταθμό βάσης, ενώ ο σταθμός βάσης στέλνει μόνο περιστασιακά μηνύματα ελέγχου στους κόμβους.

Επιπλέον, οι διαφορετικές εφαρμογές μπορεί να προκαλέσουν ένα ευρύ φάσμα μοτίβων κίνησης. Η κίνηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να είναι ενός ή πολλαπλών βημάτων. Τα μοτίβα κίνησης πολλαπλών βημάτων μπορούν να διαιρεθούν περαιτέρω, ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων που στέλνουν ή λαμβάνουν, ή εάν το δίκτυο υποστηρίζει επεξεργασία δεδομένων, στα παρακάτω:

- Τοπική Επικοινωνία. Περιλαμβάνει τη μετάδοση της κατάστασης ενός κόμβου στους γείτονές του και τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ δύο κόμβων.
- Σημείο-προς-Σημείο Δρομολόγηση. Ένας κόμβος στέλνει αυθαίρετα ένα πακέτο δεδομένων σε κάποιο άλλο. Ένα παράδειγμα είναι ένα περιβάλλον ασύρματου LAN.
- Σύγκλιση. Τα πακέτα δεδομένων από πολλαπλούς κόμβους δρομολογούνται σε ένα μόνο σταθμό βάσης, όπου γίνεται η συλλογή των δεδομένων.
- Συνάθροιση. Τα πακέτα δεδομένων μπορεί να επεξεργαστούν σε κάποιους κόμβους και η συνολική τιμή στέλνεται προς τον κόμβο και όχι τα πρωτογενή δεδομένα.
- Απόκλιση. Για να στείλει μια εντολή από τη βάση σε άλλους κόμβους.



Σχήμα 2. Τα μοτίβα κίνησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Είναι ενδιαφέρον να ερευνηθούν τα μοτίβα κίνησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, σε συνδυασμό με την κινητικότητα των κόμβων. Η κινητικότητα των κόμβων έχει χρησιμοποιηθεί σε μερικές εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση της υγειονομικής περίθαλψης. Μία από τις πρώτες προσπάθειες για να επιτευχθεί αυτό περιγράφεται στο [10]. Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι μια περιοχή έρευνας που θα συγκεντρώσει μεγάλη προσοχή τα επόμενα χρόνια.

1.2.3 Εφαρμογές

Η έρευνα και η ανάπτυξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έγινε αρχικά για στρατιωτικές εφαρμογές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη συστημάτων ακουστικής παρακολούθησης αεροσκαφών για χαμηλές πτήσεις ή απομακρυσμένων συστημάτων αισθητήρων για το πεδίο της μάχης (REMBASS). Στο [11], παρουσιάζεται ένα WSN που προσφέρει υπηρεσίες επιτηρήσης στο πεδίο της μάχης. Επίσης, στο [12] παρουσιάζεται η εφαρμογή των ΑΔΑ για την ανίχνευση εισβολής και παρακολούθησης στόχων.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσφέρουν έναν σαφώς καθορισμένο και εύκολο τρόπο για την παροχή υπηρεσιών σε πολλούς τομείς

της καθημερινότητας με μεγάλη έμφαση στις υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης [13]. Στο [14], μελετάται ένα σύστημα με αισθητήρες σε έξυπνα σπίτια για την υποστήριξη των ηλικιωμένων και των ατόμων με ειδικές ανάγκες. Επίσης, στο [15], γίνεται η εφαρμογή ενός συστήματος για την έξυπνη παρακολούθηση ενός σπιτιού. Επίσης γίνεται μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη πολυπλοκότερων συστημάτων αισθητήρων για την χρήση τους σε ένα μεγαλύτερο σύνολο εφαρμογών [16-19].

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από μικρό ή μεγάλο αριθμό κόμβων που ονομάζονται κόμβοι αισθητήρες. Αυτοί οι κόμβοι ποικίλλουν σε μέγεθος και λειτουργούν αποτελεσματικά σε διάφορους τομείς. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν τέτοιους κόμβους που είναι ειδικά σχεδιασμένοι ώστε να περιλαμβάνουν ένα μικροελεγκτή που ελέγχει την παρακολούθηση, ένα ράδιο-πομποδέκτη για την παραγωγή ραδιοκυμάτων, διαφορετικούς τύπους ασύρματων συσκευών επικοινωνίας και επίσης είναι εξοπλισμένοι με μία πηγή ενέργειας όπως μια μπαταρία. Το συνολικό δίκτυο λειτουργεί ταυτόχρονα με τη χρήση αισθητήρων διαφορετικών διαστάσεων και με τη χρήση ενός αλγόριθμου δρομολόγησης που εστιάζεται κυρίως στην μεταφορά δεδομένων από την πηγή στον κόμβο προορισμού.

1.3 Χαρακτηριστικά Πρωτοκόλλων για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις επέτρεψαν τη φθηνή μαζική παραγωγή κόμβων αισθητήρων, παρά το σχετικά μικρό μέγεθός τους, που έχουν ιδιαίτερα προηγμένες δυνατότητες ανίχνευσης, επεξεργασίας και επικοινωνίας. Ένα ασύρματο δίκτυο αποτελείται από κόμβους τοποθετημένους σε κάποιο πεδίο, που συνδέονται χωρίς τη χρήση καλωδίων. Σε ένα ασύρματο δίκτυο, οι κόμβοι αισθητήρων ανιχνεύουν το περιβάλλον και αποστέλλουν τα δεδομένα μέσω ασύρματων καναλιών σε άλλους κόμβους και σε ένα σταθμό βάσης (BS). Ο BS συλλέγει τα δεδομένα που διαβιβάζονται σε αυτόν, προκειμένου να τα επεξεργαστεί [20,21]. Μέσα από τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού κόμβων, ένα ασύρματο δίκτυο είναι σε θέση να εκτελέσει ταυτόχρονη αποστολή δεδομένων σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος που βρίσκονται σε μεγάλες εκτάσεις. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρησιμοποίησή τους, υποστηρίζουν μια ολοένα αυξανόμενη ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων της γεωργίας, του ελέγχου κυκλοφορίας, της παρακολούθησης σπιτιών, της πυρανίχνευσης, της παρακολούθησης και αναγνώρισης οικιακού αυτοματισμού, των βιοϊατρικών εφαρμογών, των διαγνώσεων βλαβών μηχανημάτων και της διαχείρισης της ενέργειας [22-24].

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρησιμοποίηση των ασύρματων δικτύων, η χρήση τους περιορίζεται σημαντικά από την διαθέσιμη ενέργεια των κόμβων. Η ενεργειακή δαπάνη των κόμβων λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας, της ανίχνευσης του περιβάλλοντος και της επεξεργασίας των δεδομένων. Ως εκ τούτου, τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποσκοπούν κυρίως στην επίτευξη της εξοικονόμησης ενέργειας. Δεδομένου ότι τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που αναπτύχθηκαν για τα ενσύρματα δίκτυα επιδιώκουν την επίτευξη της υψηλής ποιότητας των υπηρεσιών (QoS), είναι σχεδόν ακατάλληλη η εφαρμογή τους στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Για τους λόγους αυτούς, έχουν προταθεί πολλά πρωτόκολλα για δρομολόγηση δεδομένων σε δίκτυα αισθητήρων [21,25-27].

Όλα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης έχουν τον ίδιο γενικό στόχο που είναι να μοιράσουν στο δίκτυο τις πληροφορίες προσβασιμότητας μεταξύ των κόμβων και το επιτυγχάνουν με διάφορους τρόπους. Έτσι, μπορούν να στείλουν τον πλήρη πίνακα δρομολόγησης σε άλλους δρομολογητές ή να στείλουν μόνο συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με τις συνδέσεις.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης στέλνουν περιοδικά πακέτα για να διατηρήσουν την σύνδεση τους με τους άλλους δρομολογητές ή μπορεί να στείλουν προηγμένες πληροφορίες, όπως την μάσκα του υποδικτύου ή το μήκος προθέματος για τις διαδρομές. Τα περισσότερα πρωτόκολλα ανταλλάσσουν δυναμικές πληροφορίες, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις, οι στατικές πληροφορίες είναι πιο κατάλληλες.

Ωστόσο, οι σημαντικότεροι στόχοι για την ανάπτυξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι οι εξής:

- Βελτίωση της επιβίωσης του δικτύου, της διαθεσιμότητας και των υπηρεσιών.
- Αύξηση του χρόνου ζωής της μπαταρίας του δικτύου αισθητήρων.
- Εγγύηση της συνδεσιμότητας στο πλαίσιο διαφόρων σεναρίων αποστολής.
- Αποτελεσματικός έλεγχος της κατανάλωσης ενέργειας.
- Ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης μεταφοράς κρίσιμων πληροφοριών.
- Μείωση της πολυπλοκότητας.
- Βελτίωση της επίδοσης των δικτύων αισθητήρων.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης διαφέρουν ως προς την επεκτασιμότητα και την απόδοση τους. Πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης έχουν σχεδιαστεί για μικρά δίκτυα. Υπάρχουν πρωτόκολλα δρομολόγησης που λειτουργούν καλύτερα σε ένα στατικό περιβάλλον και προσαρμόζονται δύσκολα όταν συμβαίνουν αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου. Ωστόσο, υπάρχουν κάποια πρωτόκολλα δρομολόγησης που προορίζονται για τη σύνδεση εσωτερικών δικτύων πανεπιστημίων και άλλα για σύνδεση διαφορετικών επιχειρήσεων. Οι παρακάτω ενότητες παρέχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν πολλούς περιορισμούς, όπως περιορισμένη ενέργεια, περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και περιορισμένο εύρος ζώνης των ασύρματων συνδέσεων μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Ένας από τους κύριους στόχους του σχεδιασμού στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι να πραγματοποιούν επικοινωνία δεδομένων, ενώ προσπαθούν να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου και την πρόληψη της υποβάθμισης της συνδεσιμότητας χρησιμοποιώντας τεχνικές διαχείρισης της ενέργειας. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν το σχεδιασμό των πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη του δικτύου, η δυναμική, το μοντέλο παροχής δεδομένων και η ομαδοποίηση των δεδομένων είναι σημαντικά ζητήματα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για το σχεδιασμό του συστήματος. Παράγοντες που επηρεάζουν την δρομολόγηση είναι η κατανάλωση ενέργειας, η επεκτασιμότητα και η ποιότητα.

Ανάλογα με την εφαρμογή και το μέγεθος του δικτύου, λαμβάνονται υπόψη διαφορετικές αρχιτεκτονικές και στόχοι σχεδιασμού για τα δίκτυα αισθητήρων. Είναι σαφές ότι η απόδοση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι στενά συνδεδεμένη με το αρχιτεκτονικό μοντέλο.

1.4 Σκοπός Διατριβής

Η ενεργειακή απόδοση είναι ένα κρίσιμο ζήτημα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα υπάρχοντα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης χρησιμοποιούν συχνά την εναπομένουσα ενέργεια, την ισχύ μετάδοσης, ή την απόσταση για να επιλέξουν τη βέλτιστη διαδρομή. Στη διατριβή αυτή, δίνεται έμφαση στην ενεργειακή βελτιστοποίηση της απόδοσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και στις πολιτικές επιλογής της διαδρομής, προκειμένου να αυξηθεί η διάρκεια ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι νέες αυτές πολιτικές οδηγούν σε σταθερά δίκτυα με λιγότερες διεργασίες ανακάλυψης διαδρομής.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται σε ένα WSN έχουν περιορισμένους πόρους, χαμηλή ταχύτητα επεξεργασίας, χαμηλή χωρητικότητα αποθήκευσης και περιορισμένο εύρος ζώνης επικοινωνίας. Επιπλέον, το δίκτυο πρέπει να λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, αλλά η τροφοδοσία των κόμβων που γίνεται με μπαταρία, περιορίζει τη συνολική λειτουργία του. Για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, τα περισσότερα από τα εξαρτήματα της συσκευής, συμπεριλαμβανομένου του ραδιοδιαύλου, θα πρέπει να απενεργοποιηθούν κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι οι κόμβοι έχουν σημαντικές δυνατότητες επεξεργασίας στο σύνολο τους, αλλά όχι ο καθένας μόνος του. Οι κόμβοι πρέπει να οργανώσουν τη διαχείριση τους και τη διαχείριση του δικτύου όλοι μαζί, και αυτό είναι πολύ πιο δύσκολο από τον έλεγχο διαφορετικών συσκευών. Επιπλέον, οι αλλαγές στο φυσικό περιβάλλον όπου έχει αναπτυχθεί ένα δίκτυο, κάνουν τους κόμβους να έχουν μεγάλες διακυμάνσεις όσον αφορά τη συνδεσιμότητα και επηρεάζουν έτσι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης για την επίλυση του προβλήματος στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης λαμβάνουν υπόψη τα εγγενή χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, μαζί με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και της αρχιτεκτονικής. Ένα υψηλής απόδοσης πρωτόκολλο δρομολόγησης προσφέρει σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και βελτιώνει την διάρκεια ζωής του δικτύου. Η εύρεση και η διατήρηση των διαδρομών δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ένα σημαντικό ζήτημα, δεδομένου ότι οι ενεργειακοί περιορισμοί και οι απροσδόκητες αλλαγές στην κατάσταση των κόμβων (π.χ. αναποτελεσματικότητα ή αποτυχία) δημιουργούν συχνά απρόβλεπτες αλλαγές στην τοπολογία. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που προτείνονται στη βιβλιογραφία για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούν γνωστούς τρόπους δρομολόγησης, κατάλληλους για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση της ενέργειας.

Στην διατριβή αυτή επεκτείνουμε την ταξινόμηση που προτάθηκε αρχικά από τον Al - Karaki στο [20]. Η έρευνά μας επικεντρώνεται σε ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και μπορεί να δώσει οδηγίες στους αναγνώστες για το πώς να επιλέξουν το καταλληλότερο πρωτόκολλο δρομολόγησης για ενεργειακή απόδοση του δικτύου τους. Επιπλέον, η επισκόπηση αυτή αντανakλά την τρέχουσα κατάσταση για δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνοντας μια ολοκληρωμένη λίστα με πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν προταθεί πρόσφατα. Επίσης, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του κάθε πρωτοκόλλου κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ τους, με βάση τις κυριότερες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (επεκτασιμότητα, πολλαπλή διαδρομή, κινητικότητα, κατανάλωση ενέργειας, δρομολόγηση, είδος περιοδικού μηνύματος, αντοχή και ποιότητα). Έτσι, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις βασικές

κατηγορίες: Δομή του Δικτύου (Network Structure), Μοντέλο Επικοινωνίας (Communication Model), βασισμένα στην Τοπολογία (Topology Based) και βασισμένα στην αξιόπιστη δρομολόγηση (Reliable Routing). Επίσης, η ταξινόμηση που παρουσιάζεται μπορεί να θεωρηθεί ως τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις για ταξινόμηση για τα πρωτόκολλα, αντί για τέσσερις παράλληλες κατηγορίες.

Στη συνέχεια της διατριβής προτείνεται, το ECHERP, ένα πρωτόκολλο ενεργειακής απόδοσης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το ECHERP μαζί με τον αριθμό των γύρων θεωρεί το τρέχον και το εκτιμώμενο μελλοντικό επίπεδο ενέργειας των κόμβων οι οποίοι μπορεί να είναι επικεφαλής προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Το πρωτόκολλο υπολογίζει την ενέργεια που καταναλώνεται με τη χρήση του αλγορίθμου Gauss, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σε κάθε γύρο. Ως εκ τούτου, εκλέγει ως επικεφαλής τον κόμβο που ελαχιστοποιεί τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και όχι τον κόμβο με την υψηλότερη ενέργεια, όπως συνήθως κάνουν πολλά πρωτόκολλα. Το ECHERP υιοθετεί, επίσης, ένα σύστημα δρομολόγησης πολλαπλών βημάτων για να μεταφέρει τα δεδομένα στο σταθμό βάσης. Ως εκ τούτου, το ECHERP επιτυγχάνει σημαντική ενεργειακή επίδοση, όπως φαίνεται από την προσομοίωση, γεγονός που δείχνει ότι υπερτερεί αρκετά από τα άλλα προτεινόμενα πρωτόκολλα.

Επίσης, επικεντρωθήκαμε στο θέμα της αυτοματοποιημένης άρδευσης στη γεωργία και προτείναμε ένα νέο σύστημα για την αποτελεσματική άρδευση χρησιμοποιώντας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το προτεινόμενο σύστημα βασίζεται σε ένα μοντέλο το οποίο εκτελεί την αποτελεσματική διαχείριση της άρδευσης με την εύρεση των κατάλληλων προγραμμάτων για την ορθολογική χρήση του νερού για άρδευση. Το αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης που προτείνεται βασίζεται στη χρήση του πρωτόκολλο δρομολόγησης ECHERP. Η χρήση αυτού του πρωτοκόλλου προσφέρει σημαντική ενεργειακή απόδοση. Η ανάπτυξη των νέων συστημάτων, όπως αυτή που προτείνεται, συνδυάζει αποδοτικά τα μοντέλα άρδευσης μαζί με την ενεργειακά αποδοτική χρήση του δικτύου και δείχνει να είναι μια πολλά υποσχόμενη και αποτελεσματική εφαρμογή της αυτοματοποίησης στον τομέα της γεωργίας.

Τέλος, προτείνεται το HYCLRP ένα πρωτόκολλο TDMA/CDMA. Το HYCLRP ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας με την ανάθεση κωδικών λέξεων με μικρότερο μήκος και επιλέγοντας ως επικεφαλής τους κόμβους που ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές. Αυτό γίνεται με την επιλογή των κόμβων με την υψηλότερη ενέργεια και με την μικρότερη συνολική απόσταση από τους άλλους. Το δίκτυο μοντελοποιείται ως γράφημα και επιλέγει χρώματα για την αποφυγή παρεμβολών. Οι κόμβοι με βάση τα χρώματα του γραφήματος χρησιμοποιούν κωδικές λέξεις που ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Η απόδοση του πρωτοκόλλου αξιολογείται από προσομοιώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ταξινόμηση Ενεργειακά Αποδοτικών Πρωτοκόλλων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

2.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια ενδελεχής έρευνα για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που επιτυγχάνουν εξοικονόμηση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, καθώς και η κατάταξή τους σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: Δομή του Δικτύου (Network Structure), Μοντέλο Επικοινωνίας (Communication Model), βασισμένα στην Τοπολογία (Topology Based) και βασισμένα στην Αξιόπιστη Δρομολόγηση (Reliable Routing). Επικεντρωνόμαστε στις τεχνικές που χρησιμοποιούν αυτά τα πρωτόκολλα προκειμένου να δρομολογήσουν τα πακέτα, λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια που καταναλώνουν και πώς επιτυγχάνουν την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και την επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Επίσης, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του κάθε πρωτοκόλλου και περιγράφεται μια σύγκριση μεταξύ τους, συμπεριλαμβανομένων και ορισμένων παραμέτρων (επεκτασιμότητα, κινητικότητα, κατανάλωση ενέργειας, δρομολόγηση, είδος περιοδικού μηνύματος, ευρωστία). Επίσης, έχει επεκταθεί η ταξινόμηση που αρχικά πρότεινε ο Al-Karaki, προκειμένου να ενισχυθεί το σύνολο των προτεινόμενων δημοσιεύσεων από το 2004 και να υπάρξει μια καλύτερη περιγραφή σε θέματα/δραστηριότητες σε κάθε πρωτόκολλο που απεικονίζουν/ενισχύουν την εξοικονόμηση ενέργειας.

2.2. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός υφιστάμενων εργασιών, καθώς και προσπάθειες που βρίσκονται σε εξέλιξη, για την ανάπτυξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αυτά τα πρωτόκολλα έχουν αναπτυχθεί με βάση τις ανάγκες κάθε εφαρμογής και την αρχιτεκτονική του κάθε δικτύου. Ωστόσο, υπάρχουν παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ο πιο σημαντικός από αυτούς είναι η ενεργειακή απόδοση των πρωτοκόλλων που επηρεάζει άμεσα την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Υπάρχουν αρκετές έρευνες στη βιβλιογραφία σχετικά με πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Στο [29], οι συγγραφείς κάνουν μια εκτενή έρευνα σχετικά με ζητήματα σχεδιασμού και τεχνικές δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επίσης, περιγράφουν τους φυσικούς περιορισμούς των αισθητήρων και τα προτεινόμενα πρωτόκολλα που αφορούν όλα τα στρώματα της στοίβας δικτύου. Επιπλέον, συζητούν τις πιθανές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων. Από την άλλη, στην έρευνα αυτή δεν παρουσιάζεται κάποια ταξινόμηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και ο αριθμός των πρωτοκόλλων που αναλύονται δεν είναι επαρκής, δεδομένου του πεδίου εφαρμογής της έρευνας. Η δική μας έρευνα επικεντρώνεται περισσότερο στην ενεργειακή απόδοση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και παρέχει ταυτόχρονα μια ταξινόμηση των υπαρχόντων πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Επίσης αναλύουμε μια

σειρά από πρωτοκόλλα δρομολόγησης και παρέχουμε οδηγίες σχετικά με την επιλογή του πλέον κατάλληλου πρωτοκόλλου για εκάστοτε υπό μελέτη δίκτυο.

Στο [28], παρουσιάζεται μια έρευνα σχετικά με πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στην έρευνα αυτή οι τεχνικές δρομολόγησης κατατάσσονται, με βάση τη δομή του δικτύου, σε τρεις κατηγορίες: επίπεδη (flat), ιεραρχική (hierarchical) και βασισμένη στην θέση (location). Επιπλέον, τα πρωτόκολλα ταξινομούνται με βάση την πολλαπλή δρομολόγηση (multipath), την δρομολόγηση βασισμένη στο ερώτημα (query), με βάση την διαπραγμάτευση (negotiation) και με βάση την ποιότητα υπηρεσίας (QoS), ανάλογα με τη λειτουργία του πρωτοκόλλου. Στην έρευνα αυτή περιγράφονται 27 πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν αναπτυχθεί για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και έχει δημοσιευθεί το 2004. Επίσης παρουσιάζονται προκλήσεις δρομολόγησης και θέματα σχεδιασμού που πρέπει να εξετάζονται όταν αναπτύσσονται πρωτόκολλα για χρήση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Έτσι, περιγράφονται η περιορισμένη παροχή ενέργειας, η περιορισμένη υπολογιστική ισχύς και το περιορισμένο εύρος ζώνης των ασύρματων συνδέσεων μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Επίσης, οι συγγραφείς προσπαθούν να αναδείξουν τον καλύτερο συνδυασμό μεταξύ της ενέργειας και του φόρτου επικοινωνίας, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνικής δρομολόγησης. Αντίθετα, η έρευνά μας επικεντρώνεται στα ζητήματα της ενεργειακής απόδοσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Παρέχουμε λεπτομερείς και ολοκληρωμένες συγκρίσεις για τα πρωτόκολλα ενεργειακής απόδοσης τα οποία μπορούν να βοηθήσουν τους ερευνητές για το έργο τους. Επίσης, στην παρούσα έρευνα επεκτείνουμε την ταξινόμηση που προτάθηκε αρχικά από τον Al-Karaki προκειμένου να περιγράψουμε όλες τις προτεινόμενες έρευνες μετά το 2004 και να υπάρξει καλύτερη περιγραφή σε θέματα/δραστηριότητες σε κάθε πρωτόκολλο που απεικονίζουν/ενισχύουν την εξοικονόμηση ενέργειας.

Στο [30] οι συγγραφείς αναλύουν κάποια πρωτόκολλα δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων (24 συνολικά) και τα ταξινομούν σε δεδομένο-κεντρικά (data-centric), ιεραρχικά (hierarchical) και βασισμένα στην θέση (location). Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν πρωτόκολλα δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν επικεντρώνονται στις πολιτικές ενεργειακής απόδοσης. Αντίθετα, στην δική μας έρευνα επικεντρωνόμαστε κυρίως σε ενεργειακά πρωτόκολλα δρομολόγησης συζητώντας τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες του κάθε πρωτοκόλλου με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν οδηγίες για το πώς να επιλεγεί το καταλληλότερο πρωτόκολλο δρομολόγησης ενεργειακής απόδοσης σε κάποιο δίκτυο.

Στο [31], οι συγγραφείς παρέχουν μια συστηματική έρευνα της τρέχουσας κατάστασης πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Τα πρωτόκολλα αυτά κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες που λαμβάνουν υπόψη την ενεργειακή κατανάλωση. Τα πρωτόκολλα κατατάσσονται με βάση την ελάχιστη ενέργεια εκπομπής/πολυεκπομπής (MEB/MEM) και την μέγιστη διάρκεια ζωής εκπομπής/πολυεκπομπής MLB/MLM στα ασύρματα δίκτυα. Συνήθως, οι δύο κύριες ενεργειακές παράμετροι που εξετάζονται είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος για την μετάδοση όλων των κόμβων που συμμετέχουν στην πολλαπλή εκπομπή και η μεγιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας μέχρι την εξάντληση της μπαταρίας του πρώτου κόμβου που συμμετέχει στην πολυεκπομπή. Επιπλέον, κάθε κόμβος στο δίκτυο θεωρείται ότι είναι εφοδιασμένος με μία μη κατευθυντική κεραία η οποία είναι υπεύθυνη για την αποστολή και λήψη σημάτων.

Στο [32], παρουσιάζεται μια προσέγγιση με εφαρμογές και σχόλια σχετικά με διαφορετικές πτυχές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Κατατάσσει το προβλήματα σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες: εσωτερική πλατφόρμα και

λειτουργικό σύστημα, στοίβα πρωτοκόλλου επικοινωνίας, και υπηρεσίες δικτύου, εφοδιασμού και ανάπτυξης. Ωστόσο, η έρευνα αυτή δεν συζητά τα ενεργειακά πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν αναπτυχθεί για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ούτε παρέχει μια λεπτομερή σύγκριση αυτών των πρωτοκόλλων.

Στο [33], οι συγγραφείς παρουσιάζουν μια έρευνα που επικεντρώνεται στην κατανάλωση ενέργειας με βάση το υλικό (hardware) ενός τυπικού αισθητήρα. Στην έρευνα αυτή ο αισθητήρας αποτελείται από τέσσερις κύριες συνιστώσες: ένα υποσύστημα ανίχνευσης που περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους αισθητήρες για την συλλογή δεδομένων, ένα υποσύστημα επεξεργασίας που περιλαμβάνει ένα μικροελεγκτή και μνήμη για την τοπική επεξεργασία δεδομένων, ένα υποσύστημα συχνοτήτων για την ασύρματη επικοινωνία δεδομένων και ένα τροφοδοτικό. Επίσης, συζητείται η ανάλυση της αρχιτεκτονικής και της ενέργειας ως λύση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η έρευνα αυτή παρέχει τις βασικές κατευθύνσεις για εξοικονόμηση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η έρευνα είναι επικεντρωμένη στην περιγραφή των χαρακτηριστικών και των πλεονεκτημάτων της ταξινόμησης των συστημάτων για την διατήρηση της ενέργειας. Τα πρωτόκολλα κατατάσσονται σε πρωτόκολλα βασισμένα στον κύκλο εργασιών (duty-cycling), σε αυτά που είναι βασισμένα σε δεδομένα (data-driven) και σε αυτά που βασίζονται στην κινητικότητα (mobility). Επιπλέον, παρέχουν παρατηρήσεις σχετικά με τις διαφορετικές προσεγγίσεις για τη διαχείριση της ενέργειας και τονίζεται ότι η κατανάλωση ενέργειας για την επικοινωνία είναι πολύ μεγαλύτερη από την κατανάλωση ενέργειας για την ανίχνευση ή για την επεξεργασία των δεδομένων. Παρόλα αυτά πολλές πραγματικές εφαρμογές έχουν δείξει ότι η κατανάλωση ενέργειας ανίχνευσης είναι συγκρίσιμη ή ακόμη και μεγαλύτερη από την ενέργεια που απαιτείται για την επικοινωνία. Η έρευνα αυτή καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η φάση ανίχνευσης μπορεί να χρειαστεί μεγάλο χρονικό διάστημα, ιδιαίτερα σε σύγκριση με το χρόνο που απαιτείται για την επικοινωνία, έτσι ώστε η κατανάλωση ενέργειας από τον ίδιο τον αισθητήρα μπορεί να είναι πολύ υψηλή. Επίσης, οι συγγραφείς παρατηρούν αυξανόμενο ενδιαφέρον για την αραιή αρχιτεκτονική του δικτύου αισθητήρων. Η έρευνά μας έχει επικεντρωθεί στα ενεργειακά πρωτόκολλα και μελετάμε τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες του κάθε πρωτοκόλλου που μπορεί να δώσει οδηγίες σχετικά με το καταλληλότερο ενεργειακό αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης ενός δικτύου.

Στο [34], οι συγγραφείς αναλύουν θέματα σχετικά με τον σχεδιασμό και την ταξινόμηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επιπλέον, αναλύονται μερικά πρωτόκολλα δρομολόγησης με βάση τα χαρακτηριστικά τους και τους μηχανισμούς που χρησιμοποιούν για να επεκτείνουν την διάρκεια ζωής του δικτύου χωρίς να παρέχουν λεπτομέρειες σχετικά με κάθε ένα από αυτά τα πρωτόκολλα. Επίσης, οι συγγραφείς δεν κάνουν άμεση σύγκριση των πρωτοκόλλων που παρουσιάζουν.

Στο [35], αναλύονται οι προκλήσεις στο σχεδιασμό MAC (Medium Access Control) πρωτοκόλλων ενεργειακής απόδοσης για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επιπλέον, περιγράφονται μερικά πρωτόκολλα MAC (12 συνολικά) για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τονίζοντας τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες τους, όπου αυτό είναι δυνατόν. Ωστόσο, η έρευνα αυτή δεν συζητά τα ενεργειακά πρωτόκολλα δρομολόγησης που αναπτύχθηκαν για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ούτε παρέχει λεπτομερή σύγκριση των πρωτοκόλλων.

Στο [36], αναλύονται κάποια ενεργειακά πρωτόκολλα δρομολόγησης για ασύρματα πολυμεσικά δίκτυα αισθητήρων. Επίσης, οι συγγραφείς τονίζουν τα θέματα επίδοσης της κάθε στρατηγικής. Υποδεικνύουν ότι οι προκλήσεις του σχεδιασμού των

πρωτοκόλλων δρομολόγησης για ασύρματα πολυμεσικά δίκτυα αισθητήρων ακολουθείται από τα όρια των σημερινών τεχνικών που έχουν σχεδιαστεί για τη μετάδοση δεδομένων που δεν είναι πολυμεσικά. Αυτή η εργασία εξετάζει ορισμένα ζητήματα σχετικά με την ενεργειακή απόδοση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Παρά το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός ερευνών για δίκτυα αισθητήρων, ή για αλγόριθμους δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ([28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35] και [36]), το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια αναλυτική έρευνα με έμφαση στα πρωτόκολλα δρομολόγησης υψηλής ενεργειακής απόδοσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η έρευνά μας επικεντρώνεται σε ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και μπορεί να δώσει οδηγίες στους αναγνώστες για το πώς να επιλέξουν το καταλληλότερο πρωτόκολλο δρομολόγησης για ενεργειακή απόδοση του δικτύου τους. Επιπλέον, η επισκόπηση αυτή αντανακλά την τρέχουσα κατάσταση για δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνοντας μια ολοκληρωμένη λίστα με πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν προταθεί πρόσφατα. Επίσης, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του κάθε πρωτοκόλλου κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ τους, με βάση τις κυριότερες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (επεκτασιμότητα, πολλαπλή διαδρομή, κινητικότητα, κατανάλωση ενέργειας, δρομολόγηση, είδος περιοδικού μηνύματος, αντοχή και ποιότητα).

2.3. Επιλογή Πρωτοκόλλου στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι όχι μόνο να μεταδίδουν τα δεδομένα από μια πηγή σε έναν προορισμό, αλλά επίσης και να αυξάνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρησιμοποίηση ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Ανάλογα με τις εφαρμογές, έχουν εφαρμοστεί διαφορετικές αρχιτεκτονικές και σχέδια στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η απόδοση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης εξαρτάται από την αρχιτεκτονική και το σχεδιασμό του δικτύου, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ωστόσο, η λειτουργία του πρωτοκόλλου μπορεί να επηρεάσει την ενέργεια που δαπανάται για τη μετάδοση των δεδομένων.

Ένας από τους βασικούς στόχους της έρευνας αυτής στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ο σχεδιασμός ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν διάφορες πτυχές λειτουργίας του δικτύου. Το 2000 και το 2002, το έργο PicoRadio [37] στο Berkeley και το έργο μAMPs [38] στο MIT, αντίστοιχα, επικεντρώθηκαν στην μελέτη ενεργειακών ραδιοδιαύλων και τις επιπτώσεις τους σε ισχύ και δικτύωση.

Οι αρχικές προσπάθειες για την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών κόμβων προέρχονται κυρίως από ακαδημαϊκά ιδρύματα. Ωστόσο, την τελευταία δεκαετία, έχει εμφανιστεί μια σειρά από εμπορικές προσπάθειες (πολλές από τις οποίες βασίζονται σε κάποιες από τις παραπάνω ακαδημαϊκές), συμπεριλαμβανομένων των εταιρειών Crossbow, Sensoria, Worldsens, Dust Networks και Ember Corporation. Οι εταιρείες αυτές παρέχουν τη δυνατότητα σε κάποιον να αγοράσει συσκευές έτοιμες για χρήση σε μια ποικιλία σεναρίων εφαρμογής, μαζί με διάφορα εργαλεία διαχείρισης για τον προγραμματισμό, τη συντήρηση, και την απεικόνιση των δεδομένων.

Παράλληλα με την ανάπτυξη του υλικού των κόμβων και προκειμένου να αναπτυχθούν ενεργειακά αποδοτικές λύσεις, έχει γίνει έρευνα στην ανάπτυξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης που απαιτούν λιγότερη ενέργεια, με αποτέλεσμα την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Η πιο απλή ιδέα είναι η μετάβαση του κόμβου σε χαμηλότερη λειτουργία όποτε είναι δυνατόν. Το πρόβλημα είναι ότι ο χρόνος και η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την μετάβαση σε υψηλότερη λειτουργία δεν είναι αμελητέα. Έτσι, απαιτούνται τεχνικές και πρωτόκολλα που θα εξετάσουν την ενεργειακή απόδοση και την μετάδοση πακέτων μέσω ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης και επομένως την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, δαπανάται σε τρεις βασικές δραστηριότητες: τη σάρωση, την επεξεργασία δεδομένων και την επικοινωνία. Όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι σημαντικοί και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη πρωτοκόλλων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επειδή η επικοινωνία των κόμβων είναι το κύριο στοιχείο της κατανάλωσης ενέργειας, η εν εξελίξει έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν τη λιγότερη δυνατή ενέργεια κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας των κόμβων.

Η πιθανή αποστολή των πρωτοκόλλων δεν είναι μόνο να βρουν τη χαμηλότερη ενεργειακή διαδρομή από μια πηγή σε έναν προορισμό, αλλά και τον πιο αποτελεσματικό τρόπο για να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Η συνεχής χρήση της χαμηλής ενεργειακά διαδρομής οδηγεί συχνά σε εξάντληση της ενέργειας των κόμβων κατά μήκος αυτής και μπορεί να οδηγήσει σε διχοτόμηση του δικτύου.

Υπάρχουν κάποιοι όροι που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και εδώ είναι οι πιο σημαντικές [39]:

- *Ενέργεια ανά πακέτο.* Ο όρος αυτός αναφέρεται στην ποσότητα της ενέργειας που δαπανάται κατά την αποστολή ενός πακέτου από μια πηγή σε έναν προορισμό.
- *Ενέργεια και αξιοπιστία.* Ο όρος αυτός αναφέρεται στον τρόπο που επιτυγχάνεται μια ανταλλαγή μεταξύ διαφορετικών απαιτήσεων μιας εφαρμογής. Σε ορισμένες εφαρμογές, τα γεγονότα έκτακτης ανάγκης μπορεί να δικαιολογήσουν μια αύξηση του κόστους της ενέργειας για την επιτάχυνση υποβολής τέτοιων γεγονότων ή για να αυξήσουν την επιτυχία μετάδοσης χρησιμοποιώντας πολλαπλά μονοπάτια.
- *Διάρκεια ζωής του δικτύου.* Δεν υπάρχει κανένας καθολικά αποδεκτός ορισμός για τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Σε πολλές περιπτώσεις, η διάρκεια ζωής του δικτύου αντιστοιχεί στο χρόνο, κατά τον οποίο ο πρώτος κόμβος εξαντλεί την ενέργειά του ή ένα ορισμένο ποσοστό των κόμβων του δικτύου μείνουν από ενέργεια, ή ακόμα όλοι οι κόμβοι μείνουν από ενέργεια. Σε ορισμένες άλλες περιπτώσεις μπορεί να είναι λογικό να μετρηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου από παραμέτρους για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως ο χρόνος, όταν το δίκτυο δεν μπορεί πλέον να αναμεταδώσει το βίντεο. Ωστόσο, η σημασία ενός WSN είναι να μπορεί να είναι σε λειτουργία και να είναι σε θέση να εκτελεί τα καθήκοντά του κατά τη διάρκεια χρήσης του. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, είναι σημαντικό να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου, που σημαίνει να αυξηθεί η βιωσιμότητα του δικτύου ή να παραταθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κόμβων. Η κοινή πρακτική σε δίκτυα είναι να χρησιμοποιούν τις συντομότερες διαδρομές για τη μεταφορά των πακέτων.

Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει τους κόμβους κατά μήκος της συντομότερης διαδρομής σε γρήγορη κατανάλωση της ενέργειας που έχουν διαθέσιμη. Δεδομένου ότι σε ένα WSN κάθε κόμβος πρέπει να λειτουργεί ως συνδεδεμένος κρίκος για να προωθήσει κάποιο μήνυμα, αν κάποιοι κόμβοι μείνουν χωρίς ενέργεια πολύ νωρίτερα είναι πιθανό ότι οι άλλοι κόμβοι δεν θα είναι σε θέση να επικοινωνούν πια. Ως εκ τούτου, το δίκτυο θα αποσυνδεθεί, η κατανάλωση ενέργειας δεν θα είναι ισορροπημένη και η διάρκεια ζωής του δικτύου θα επηρεάζεται σοβαρά. Ένας συνδυασμός μεταξύ της επιλογής της συντομότερης διαδρομής και της επέκτασης της διάρκειας ζωής του δικτύου είναι καταλληλότερη δρομολόγηση για να χρησιμοποιηθεί στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής ενός κόμβου προσδιορίζεται με βάση τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του. Η κύρια κατανάλωση της ενέργειας οφείλεται στην μετάδοση και λήψη δεδομένων μεταξύ των κόμβων και των στοιχείων επεξεργασίας.

- *Μέση κατανάλωση ενέργειας.* Αυτή η μετρική δείχνει τη μέση κατανάλωση της ενέργειας ανά κόμβο με την πάροδο του χρόνου στο δίκτυο, καθώς εκτελεί διάφορες λειτουργίες, όπως τη μετάδοση, λήψη, ανίχνευση και ομαδοποίηση των δεδομένων.
- *Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.* Ένα ενεργειακό πρωτόκολλο πρέπει να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από ότι τα παραδοσιακά πρωτόκολλα. Αυτό σημαίνει ότι ένα πρωτόκολλο που θα λαμβάνει υπόψη το επίπεδο ενέργειας των κόμβων και επιλέγει διαδρομές που μεγιστοποιούν τη διάρκεια ζωής του δικτύου θεωρείται ως ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο.
- *Συνολικός αριθμός κόμβων σε λειτουργία.* Αυτή η μετρική δίνει μια ιδέα για την περιοχή κάλυψης του δικτύου.
- *Συνολικός αριθμός των σημάτων δεδομένων που φτάνουν στο σταθμό βάσης.* Αυτή είναι ισοδύναμη με την ενέργεια που εξοικονομείται από το πρωτόκολλο, αφού δε μεταδίδονται συνεχώς πακέτα δεδομένων τα οποία δεν απαιτούνται.
- *Μέση καθυστέρηση πακέτου.* Αυτή η μετρική υπολογίζεται ως ο μέσος όρος καθυστέρησης μια μονόδρομης μετάδοσης και της λήψης ενός πακέτου δεδομένων στην βάση. Αυτή μετρά τη χρονική ακρίβεια ενός πακέτου.
- *Λόγος Παράδοσης Πακέτων.* Υπολογίζεται ως ο λόγος του αριθμού των διακριτών πακέτων που φτάνουν στην βάση προς τον αριθμό των πακέτων που αποστέλλονται από τον κόμβο. Αυτή υποδηλώνει την αξιοπιστία της παράδοσης των δεδομένων.
- *Χρόνος μέχρι ο πρώτος κόμβος να σβήσει από ενέργεια.* Ο χρόνος αυτός δείχνει τη διάρκεια που όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο είναι ενεργοί. Υπάρχουν πρωτόκολλα στα οποία ο πρώτος κόμβος του δικτύου μένει από ενέργεια νωρίτερα από ότι σε άλλα πρωτόκολλα, αλλά καταφέρνει να κρατήσει το δίκτυο λειτουργικό για περισσότερο χρονικό διάστημα.
- *Ενέργεια που καταναλώνεται ανά γύρο.* Αυτή η μετρική σχετίζεται με το συνολικό ποσό ενέργειας που δαπανάται στη δρομολόγηση μηνυμάτων σε ένα γύρο. Πρόκειται για ένα βραχυπρόθεσμο μέτρο σχεδιασμένο για να παρέχει ενεργειακή απόδοση του κάθε πρωτοκόλλου σε ένα γύρο.
- *Αδράνεια Ακρόασης.* Ένας κόμβος που είναι σε κατάσταση αδράνειας ακρόασης, που δεν στέλνει ή δεν λαμβάνει δεδομένα, μπορεί να εξακολουθεί να καταναλώνει σημαντική ποσότητα ενέργειας. Ως εκ τούτου, αυτός ο κόμβος δεν πρέπει να μείνει σε κατάσταση αναμονής ακρόασης, αλλά θα πρέπει να απενεργοποιηθεί.

- *Μέγεθος πακέτου.* Το μέγεθος πακέτου καθορίζει το χρόνο που διαρκεί η μετάδοση. Ως εκ τούτου, είναι αποτελεσματικό στην κατανάλωση ενέργειας. Το μέγεθος του πακέτου θα πρέπει να μειωθεί με το συνδυασμό διάφορων πακέτων σε ένα μεγάλο πακέτο ή με συμπίεση.
- *Απόσταση.* Η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη μπορεί να επηρεάσει τη ενέργεια που απαιτείται για την αποστολή και λήψη πακέτων. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορεί να επιλέξουν τα συντομότερα μονοπάτια μεταξύ των κόμβων και να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Η επιλογή των ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ένα πραγματικά κρίσιμο ζήτημα. Υπάρχουν διάφορες πολιτικές για την επιλογή της διαδρομής με υψηλή ενεργειακή απόδοση. Η πιο γνωστή πολιτική ονομάζεται “συγκέντρωση κλήσεων”. Αυτή η πολιτική δρομολογεί τα νέα πακέτα σε φορτωμένες συνδέσεις. Το πλεονέκτημα αυτής είναι ότι ευνοεί τα πακέτα υψηλού εύρους ζώνης, αλλά το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι δεν χρησιμοποιεί κάποιες ζεύξεις, μειώνοντας έτσι τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Η πολιτική εξισορρόπησης φορτίου, σε αντίθεση με αυτή, προσπαθεί να διαδώσει το φορτίο ομοιόμορφα μεταξύ των συνδέσεων. Αυτή η πολιτική αποφασίζει να δρομολογεί πακέτα σε μη φορτωμένες διαδρομές.

Μια τρίτη πολιτική, με τίτλο “πολιτική ελάχιστων βημάτων”, δρομολογεί ένα πακέτο στο μονοπάτι ελάχιστων-βημάτων που πληροί τις απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης. Αυτό το είδος της πολιτικής είναι χρήσιμο σε ενεργειακά αποδοτικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Η πολιτική εξισορρόπησης φορτίου είναι μια καλή πολιτική επίδοσης σε όλες τις τοπολογίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η διαφορά μεταξύ της εξισορρόπησης φορτίου και των πολιτικών δρομολόγησης με ελάχιστα βήματα είναι πολύ μικρή.

Επιπλέον, υπάρχουν μοντέλα για δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων. Δύο από αυτά συγκρίνονται στο [40]. Το πρώτο μεγιστοποιεί την ελάχιστη διάρκεια ζωής των κόμβων, ενώ το δεύτερο ελαχιστοποιεί τη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο [40] εξετάζουν την ενέργεια μετάδοσης και την ενέργεια του κυκλώματος που δαπανάται στη μετάδοση, καθώς και την ενέργεια του δέκτη. Η σύγκριση αποκαλύπτει ότι στο πρώτο μοντέλο προτιμάται η δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων, όταν ο λόγος της ενέργειας μετάδοσης προς την ενέργεια του κυκλώματος είναι χαμηλή και στο δεύτερο όταν αυτή η αναλογία είναι υψηλή. Για την εξισορρόπηση του φορτίου, το πρώτο σύστημα περιορίζει το εύρος της δρομολόγησης πολλαπλών βημάτων.

2.3.1 Εξοικονόμηση Ενέργειας με την Επιλογή της Βέλτιστης Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που συνδέονται στενά με το δυναμικό προγραμματισμό μπορεί να βασίζονται σε διαφορετική ανάλυση του δικτύου και αρχές θεωρίας στα συστήματα επικοινωνίας δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων της μέγιστης ροής, της συντομότερης διαδρομής και του ελάχιστου διαστήματος. Τα συστήματα βασισμένα στην συντομότερη διαδρομή δρομολόγησης υπολογίζουν τη συντομότερη διαδρομή από οποιοδήποτε κόμβο προς τον κόμβο προορισμό. Εάν το κόστος, αντί του μήκους, συνδέεται με κάθε σύνδεση, αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν επίσης να υπολογίζουν τις διαδρομές ελάχιστου κόστους. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορεί να είναι κεντρικοποιημένοι ή κατανεμημένοι.

Ο συνήθης τρόπος δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η δρομολόγηση πακέτων στο μονοπάτι ελάχιστου κόστους από την πηγή μέχρι τον προορισμό. Σε περίπτωση που οι κόμβοι παράγουν δεδομένα συνεχώς και το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο, τότε η δρομολόγηση των δεδομένων στις διαδρομές ελάχιστου κόστους μπορεί να υπερφορτώσει τις ασύρματες συνδέσεις προς τον σταθμό βάσης. Ως εκ τούτου, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό του εύρους ζώνης στο ασύρματο κανάλι, διαφορετικά, θα δρομολογούσε τα πακέτων πάνω από συνδέσεις με μεγάλη συμφόρηση. Αυτό θα οδηγούσε σε αύξηση της συμφόρησης, σε αυξημένη καθυστέρηση και σε απώλειες πακέτων, το οποίο με τη σειρά του θα προκαλούσε την αναμετάδοση των πακέτων, και θα αύξανε έτσι την κατανάλωση ενέργειας.

Ο αλγόριθμος Dijkstra, ο οποίος έχει πολυωνυμική πολυπλοκότητα, και ο αλγόριθμος Bellman-Ford, ο οποίος βρίσκει τη διαδρομή με το λιγότερο αριθμό βημάτων είναι οι δύο πολύ γνωστοί και καλά καθορισμένοι αλγόριθμοι δρομολόγησης για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής.

2.3.2 Ελαχιστοποίηση των Επιβαρύνσεων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η επιβάρυνση είναι μια σημαντική συνιστώσα της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους αισθητήρων σε ένα WSN. Η αμέλεια της επιβάρυνσης σε αποφάσεις ενεργειακής δρομολόγησης μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη χρήση της ενέργειας. Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης θα πρέπει να επικεντρωθούν στην ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης για την εξοικονόμηση της ενέργειας που καταναλώνεται, σε κάθε βήμα μετάδοσης δεδομένων μέσω του ασύρματου δικτύου. Η χρήση μικρότερων διαδρομών πολλαπλών βημάτων εμφανίζεται ως μια πιο συμφέρουσα λύση, αν υπολογίζεται η ενέργεια μετάδοσης μόνο ως το κόστος επικοινωνίας.

Ωστόσο, λόγω άλλων δραστηριοτήτων κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους αισθητήρων, όπως, η λήψη έμμεσων μηνυμάτων και η σάρωση καταναλώνεται σημαντική ενέργεια, σε ορισμένα μοντέλα διάχυσης που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία [41, 42, 43]. Ως εκ τούτου, τα πολλαπλά βήματα μετάδοσης δεν είναι μερικές φορές επιθυμητά στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Πρόσφατη έρευνα επικεντρώθηκε στην ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως, την ενέργεια που καταναλώνεται στην σάρωση, υπολογίζοντας τις πληροφορίες που συγκεντρώνονται, την αποστολή μηνυμάτων καθώς και τη μετάδοση δεδομένων σε κάθε βήμα στο δίκτυο.

2.3.3 Παράγοντες που Επηρεάζουν τον Σχεδιασμό Πρωτοκόλλων Εξοικονόμησης Ενέργειας

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, παρά τις αναρίθμητες εφαρμογές τους, έχουν διάφορους περιορισμούς που αφορούν, κυρίως, τα περιορισμένα αποθέματα ενέργειας, την περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ και το περιορισμένο εύρος ζώνης των ασύρματων συνδέσεων μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Ένας από τους πιο σημαντικούς τους στόχους είναι η επικοινωνία δεδομένων ενώ παράλληλα προσπαθούν να συμβάλουν στη μακροβιότητα του δικτύου και να αποκλείσουν την διακοπή σύνδεση με τη χρήση τεχνικών διαχείρισης της ενέργειας. Ο σχεδιασμός των ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα

αισθητήρων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί πρέπει να υπολογιστούν για να μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματική επικοινωνία στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι οι παρακάτω[44]:

- *Τοποθέτηση Κόμβων*: Πρόκειται για μια λειτουργία που επηρεάζει την απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και μπορεί να είναι είτε ντετερμινιστική ή τυχαία.
- *Ετερογένεια Κόμβων*: Η ύπαρξη ενός ετερογενούς συνόλου αισθητήρων δημιουργεί πολλά τεχνικά προβλήματα που σχετίζονται με την δρομολόγηση των δεδομένων τα οποία και πρέπει να ξεπεραστούν.
- *Μοντέλο Αναφοράς Δεδομένων*: Η ανίχνευση των δεδομένων, η μέτρηση και η αναφορά στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εξαρτάται από την εφαρμογή και την κρισιμότητα των δεδομένων. Η αναφορά των στοιχείων μπορεί να είναι με βάση το χρόνο (συνεχής), το γεγονός (event-driven), το ερώτημα ή υβριδική.
- *Κατανάλωση Ενέργειας χωρίς Απώλεια Ακρίβειας*: Σε αυτή την περίπτωση, οι μηχανισμοί ενεργειακής απόδοσης επικοινωνίας και επεξεργασίας δεδομένων είναι περισσότερο από αναγκαία.
- *Επεκτασιμότητα*: Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να είναι επεκτάσιμα ώστε να ανταποκρίνονται σε διάφορα γεγονότα, π.χ. σε μια τεράστια αύξηση των κόμβων αισθητήρων στο δίκτυο.
- *Δυναμική Δικτύου*: Είναι απαραίτητο σε πολλές εφαρμογές να ληφθεί υπόψη η κινητικότητα των κόμβων αισθητήρων, παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες από τις αρχιτεκτονικές που έχουν προταθεί υποθέτουν ότι οι κόμβοι αισθητήρων είναι στατικοί.
- *Ανοχή Σφαλμάτων*: Το συνολικό έργο του δικτύου αισθητήρων δεν πρέπει να επηρεάζεται από την αστοχία κάποιων κόμβων αισθητήρων.
- *Συνδεσιμότητα*: Η συνδεσιμότητα των κόμβων αισθητήρων εξαρτάται από την κατανομή των κόμβων στο χώρο.
- *Μέσο Μετάδοσης*: Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με μετάδοση πληροφορίας με πολλαπλά βήματα, οι κόμβοι συνδέονται μέσω του ασύρματου μέσου. Μια προσέγγιση σχεδιασμού MAC για δίκτυα αισθητήρων είναι η χρήση πρωτοκόλλων TDMA που εξοικονομούν περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με τα πρωτόκολλα CSMA (π.χ. IEEE 802.11).
- *Κάλυψη*: Η περιοχή κάλυψης για κάθε αισθητήρα είναι περιορισμένη σε εύρος και σε ακρίβεια, το δίκτυο δηλαδή μπορεί να καλύψει μόνο ένα περιορισμένο φυσικό χώρο.
- *Ποιότητα Υπηρεσίας*: Τα δεδομένα πρέπει να παραδοθούν μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, σε έναν αριθμό εφαρμογών, η διατήρηση της ενέργειας, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διάρκεια ζωής του δικτύου, θεωρείται σχετικά πιο σημαντική από την ποιότητα των δεδομένων που αποστέλλονται. Ως εκ τούτου, τα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να τηρούν αυτή την απαίτηση.
- *Συνάθροιση Δεδομένων*: Η συνάθροιση δεδομένων είναι ο συνδυασμός δεδομένων από διαφορετικές πηγές, σύμφωνα με μια συγκεκριμένη συνάρτηση συνάθροισης.

2.4 Τεχνικές Δρομολόγησης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να είναι πιο απαιτητική από ότι σε άλλα ασύρματα δίκτυα, όπως τα δίκτυα κατά περίπτωση ή τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας για τους ακόλουθους λόγους:

- Οι κόμβοι αισθητήρων απαιτούν προσεκτική διαχείριση των πόρων τους λόγω των περιορισμών σε διαθέσιμη ενέργεια, επεξεργασία και αποθήκευση.
- Σχεδόν όλες οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων απαιτούν τη ροή των δεδομένων από πολλαπλές πηγές σε ένα συγκεκριμένο σταθμό βάσης.
- Οι απαιτήσεις σχεδιασμού ενός WSN εξαρτώνται από την εφαρμογή, επειδή τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσαρμόζονται στη συγκεκριμένη εφαρμογή.
- Οι κόμβοι στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ως επί το πλείστον σταθεροί στην θέση τους μετά την εγκατάστασή τους, το οποίο οδηγεί σε προβλέψιμες και μη-συχνές τοπολογικές αλλαγές.
- Η συλλογή δεδομένων είναι, υπό κανονικές συνθήκες, με βάση τη θέση, ως εκ τούτου, η γνώση της θέσης των κόμβων αισθητήρων είναι σημαντική. Η θέση των κόμβων αισθητήρων προσδιορίζεται με χρήση μεθόδων όπως ισχύ συχνότητας από μερικά γνωστά σημεία. Προς το παρόν, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS) για το σκοπό αυτό. Συνιστάται να χρησιμοποιούνται λύσεις διαφορετικές από το GPS για τον εντοπισμό θέσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [45].
- Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα τα δεδομένα που συλλέγονται να είναι τα ίδια οπότε είναι απαραίτητο να αξιοποιηθούν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τη βελτίωση της ενέργειας και της αξιοποίησης του εύρους ζώνης.

2.4.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Δομή του Δικτύου (Network Structure)

Η δομή του δικτύου συχνά καθορίζεται από την ομοιομορφία των κόμβων. Οι κόμβοι σε ορισμένα δίκτυα τοποθετούνται ομοιόμορφα, είναι ο ένας ίσος με τον άλλο, ενώ σε άλλα δίκτυα υπάρχει διάκριση μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, το κύριο χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι ο τρόπος που οι κόμβοι συνδέονται και δρομολογούν τις πληροφορίες βασιζόμενοι στην υποκείμενη αρχιτεκτονική. Αυτό δημιουργεί δύο τύπους τοποθέτησης κόμβων, στο ίδιο επίπεδο σύνδεσης και σε ιεραρχίες. Ως εκ τούτου, τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω ως εξής:

- *Επίπεδα Πρωτόκολλα:* Όλοι οι κόμβοι του δικτύου παίζουν τον ίδιο ρόλο. Η επίπεδη αρχιτεκτονική του δικτύου παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της ελάχιστης επιβάρυνσης για τη διατήρηση της διαδρομής μεταξύ των επικοινωνούντων κόμβων.
- *Ιεραρχικά Πρωτόκολλα:* Τα πρωτόκολλα αυτά ακολουθούν μια δομή του δικτύου για την επίτευξη της ενεργειακής απόδοσης, τη σταθερότητα και την

επεκτασιμότητα. Σε αυτή την κατηγορία πρωτοκόλλων, οι κόμβοι του δικτύου οργανώνονται σε συμπλέγματα όπου ο κόμβος με την υψηλότερη στάθμη ενέργειας, για παράδειγμα, αναλαμβάνει το ρόλο του επικεφαλής του συμπλέγματος. Ο επικεφαλής του συμπλέγματος είναι υπεύθυνος για το συντονισμό των δραστηριοτήτων στο πλαίσιο του συμπλέγματος και τη διαβίβαση των πληροφοριών μεταξύ των συμπλεγμάτων. Η ομαδοποίηση των κόμβων έχει τη δυνατότητα να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Έχει υψηλή αναλογία παράδοσης δεδομένων και επεκτασιμότητας και μπορεί να ισορροπήσει την κατανάλωση ενέργειας. Οι κόμβοι γύρω από το σταθμό βάσης ή τον επικεφαλής καταναλώνουν πιο γρήγορα την διαθέσιμη ενέργεια τους από τους άλλους κόμβους. Η αποσύνδεση του δικτύου είναι ένα πρόβλημα, όπου ορισμένα τμήματα του δικτύου μπορεί να γίνουν απρόσιτα. Εάν υπάρχει μόνο ένας κόμβος που συνδέει ένα τμήμα του δικτύου με το υπόλοιπο και αποτυγχάνει, τότε αυτό το τμήμα θα αποκοπεί από το υπόλοιπο τμήμα του δικτύου.

2.4.2 Πρωτόκολλα Βασισμένα στο Μοντέλο Επικοινωνίας (Communication Model)

Το μοντέλο επικοινωνίας σε ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης σχετίζεται με τον τρόπο που ακολουθείται η κύρια λειτουργία του πρωτοκόλλου για τη δρομολόγηση πακέτων στο δίκτυο. Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας μπορεί να παραδώσουν περισσότερα δεδομένα για μία δεδομένη ποσότητα ενέργειας. Επίσης, όσον αφορά το ποσοστό διάδοσης και χρήσης της ενέργειας τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να εκτελέσουν πολύ κοντά στο θεωρητικό βέλτιστο από σημείο-σε-σημείο και σε δίκτυα ανοικτής εκπομπής. Το πρόβλημα με αυτά τα πρωτόκολλα είναι ότι δεν έχουν υψηλή αναλογία παράδοσης για τα δεδομένα που αποστέλλονται σε έναν προορισμό. Έτσι, δεν εγγυώνται την παράδοση των δεδομένων.

Τα πρωτόκολλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- *Πρωτόκολλα βασισμένα στο Ερώτημα (Query-Based)*: Οι κόμβοι προορισμού διαδίδουν ένα ερώτημα για δεδομένα από έναν κόμβο μέσω του δικτύου και ο κόμβος που έχει τα δεδομένα στέλνει, αυτά που ταιριάζουν με το ερώτημα, πίσω στον κόμβο.
- *Συνεκτικά και μη-Συνεκτικά Πρωτόκολλα (Coherent and Non-Coherent-Based)*: Στη συνεκτική δρομολόγηση, τα δεδομένα προωθούνται σε συναθροιστές μετά από μια ελάχιστη επεξεργασία. Στη μη-συνεκτική διαδικασία, οι κόμβοι επεξεργάζονται τοπικά τα ανεπεξέργαστα δεδομένα πριν αποσταλούν σε άλλους κόμβους για περαιτέρω επεξεργασία.
- *Πρωτόκολλα βασισμένα στην διαπραγμάτευση (Negotiation-Based)*: Χρησιμοποιούν τις διαπραγματεύσεις μετά-δεδομένων για να μειωθούν οι περιττές μεταδόσεις στο δίκτυο.

2.4.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοπολογία (Topology Based)

Τα πρωτόκολλα αυτά χρησιμοποιούν την αρχή ότι κάθε κόμβος σε ένα δίκτυο διατηρεί πληροφορίες τοπολογίας και ότι η κύρια διαδικασία της λειτουργίας του πρωτοκόλλου βασίζεται στην τοπολογία του δικτύου. Τα πρωτόκολλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω ως εξής:

- *Πρωτόκολλα βασισμένα στην θέση (Location-based)*: Τα πρωτόκολλα αυτά μπορεί να επωφεληθούν από τις πληροφορίες θέσης, προκειμένου να αναμεταδώσουν τα δεδομένα που έλαβαν μόνο σε ορισμένες περιοχές και όχι σε ολόκληρο το WSN. Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας μπορούν να βρουν μια διαδρομή από μια πηγή σε έναν προορισμό με ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων αισθητήρων. Έχουν περιορισμένη δυνατότητα κλιμάκωσης σε περίπτωση που οι κόμβοι είναι κινητοί. Επίσης, ένας κόμβος πρέπει να γνωρίζει ή να μάθει για τις θέσεις των άλλων κόμβων.
- *Πρωτόκολλα βασισμένα σε κινητούς πράκτορες (Mobile Agent-based)*: Τα συστήματα κινητών πρακτόρων έχουν ως κύριο συστατικό ένα κινητό μέσο, το οποίο μετακινείται μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου για να εκτελέσει μια εργασία αυτόνομα και έξυπνα, με βάση τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Τα πρωτόκολλα αυτά μπορεί να παρέχουν στο δίκτυο επιπλέον ευελιξία, καθώς και νέες δυνατότητες σε αντίθεση με τις συμβατικές λειτουργίες του WSN που βασίζονται στο μοντέλο πελάτη-εξυπηρετητή.

2.4.4 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Αξιόπιστη Δρομολόγηση (Reliable Routing)

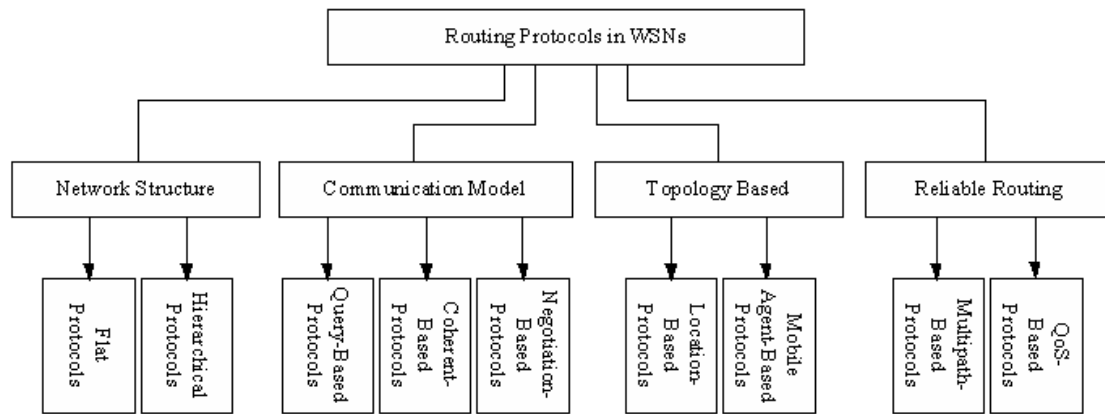
Τα πρωτόκολλα αυτά είναι πιο ανθεκτικά σε προβληματικές διαδρομές είτε με την εύρεση εναλλακτικών διαδρομών ή πληρώνοντας ορισμένες παραμέτρους QoS, όπως η καθυστέρηση, η ενέργεια, και το εύρος ζώνης. Οι κόμβοι του δικτύου μπορεί να υποφέρουν το φόρτο της διατήρησης με χρήση πινάκων δρομολόγησης και μετρήσεων QoS σε κάθε κόμβο αισθητήρα. Τα πρωτόκολλα αυτά ταξινομούνται ως εξής:

- *Πρωτόκολλα βασισμένα σε πολλαπλές διαδρομές (Multipath-Based)*: Επιτυγχάνουν την εξισορρόπηση του φορτίου και είναι πιο ανθεκτικά σε προβληματικές διαδρομές.
- *Πρωτόκολλα βασισμένα στην ποιότητα υπηρεσίας (QoS-based)*: Το δίκτυο θα πρέπει να ισορροπήσει μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της ποιότητας της υπηρεσίας. Κάθε φορά που ο σταθμός βάσης θέλει δεδομένα από τους κόμβους στο δίκτυο, η μετάδοση θα πρέπει να καλύψει συγκεκριμένα επίπεδα ποιότητας.

2.4.5 Σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών δρομολόγησης

Το κύριο χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που βασίζονται στην δομή του δικτύου είναι ο τρόπος που οι κόμβοι συνδέονται και ασκούν επιρροή για την δρομολόγηση των πληροφοριών. Για παράδειγμα, σε μια ιεραρχική δομή οι κόμβοι του χαμηλότερου επιπέδου μεταφέρουν την πληροφορία στο ανώτερο επίπεδο, με αποτέλεσμα την ισορροπημένη ενεργειακή δομή του δικτύου.

Ωστόσο, στο μοντέλο επικοινωνίας, το κύριο χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων είναι ο τρόπος που εκτελείται μια απόφαση δρομολόγησης, χωρίς να βασίζεται κυρίως στη δομή του δικτύου. Έτσι, για παράδειγμα μια καλά καθορισμένη τεχνική θεωρείται η διαπραγματεύση μεταξύ των κόμβων πριν από τη μεταφορά των δεδομένων, για τη δρομολόγηση της πληροφορίας από την πηγή προς τον προορισμό.



Σχήμα 3. Κατηγοριοποίηση Πρωτοκόλλων στα ΑΔΑ.

Επιπλέον, υπάρχουν κάποια πρωτόκολλα που εκτός από το μοντέλο επικοινωνίας που χρησιμοποιούν για τη μετάδοση δεδομένων, λαμβάνουν υπόψη και την τοπολογία του δικτύου. Λειτουργούν χωρίς πίνακες δρομολόγησης, κατά τακτά χρονικά διαστήματα μεταδίδουν μηνύματα HELLO για να μπορούν οι γείτονες να γνωρίζουν τις θέσεις τους.

Κάποια από τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν πράκτορες για να μεταφέρουν τα δεδομένα και να μειώσουν τις ενεργειακές δαπάνες των κόμβων. Τέλος, υπάρχει μια κατηγορία πρωτοκόλλων που εκτός της ενεργειακής απόδοσης τείνουν να παρέχουν αξιόπιστη δρομολόγηση δεδομένων. Αυτό το επιτυγχάνουν, είτε με την παροχή πολλαπλών διαδρομών από την πηγή στον προορισμό ή από την εφαρμογή QoS για την κύρια δραστηριότητα δρομολόγησης τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ορισμένα από τα πρωτόκολλα που περιγράφονται παρακάτω, μπορεί να ανήκουν σε μία ή περισσότερες από τις ανωτέρω κατηγορίες δρομολόγησης, αλλά περιγράφονται μόνο μία φορά στην κατηγορία που ταιριάζουν κυρίως.

Οι Πίνακες 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 και 10 συνοψίζουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε πρωτοκόλλου που περιγράφεται στην εργασία. Επιπλέον, για κάθε πρωτόκολλο περιγράφονται ορισμένοι παράμετροι που μπορεί να είναι χρήσιμοι για τον αναγνώστη. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- *Επεκτασιμότητα.* Η επεκτασιμότητα αναφέρεται στην ικανότητα του πρωτοκόλλου να χειριστεί αυξανόμενες ποσότητες εργασιών με ευέλικτο τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι η επίδοση του πρωτοκόλλου θα είναι σταθερή για μικρά και μεγάλα δίκτυα.
- *Κινητικότητα.* Η κινητικότητα αναφέρεται στην ικανότητα του πρωτοκόλλου να προσαρμοστεί σε περίπτωση που οι κόμβοι είναι κινητοί.
- *Μετρικές Διαδρομής.* Η μετρική διαδρομής αναφέρεται στη μορφή της δρομολόγησης που προσπαθεί να στείλει πακέτα δεδομένων μέσω ενός δικτύου κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η διαδρομή για την αποστολή από κόμβο στον παραλήπτη είναι η πιο αποτελεσματική. Έτσι, αυτή η διαδρομή μπορεί να είναι η συντομότερη διαδρομή, η οποία ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους, ή το μονοπάτι που μεγιστοποιεί τη διάρκεια ζωής του δικτύου και λαμβάνει υπόψη το υπόλοιπο της ενέργειας των κόμβων.
- *Τύπος Περιοδικού Μηνύματος.* Ο τύπος περιοδικού μηνύματος είναι τα μηνύματα που ανταλλάσσουν οι κόμβοι, προκειμένου να γνωρίζουν τους κόμβους που είναι ενεργοί στο δίκτυο.

- *Ευρωστία*. Ένα πρωτόκολλο που εκτελείται καλά σε όλες τις συνθήκες, για παράδειγμα σε ξαφνικές αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου, θεωρείται ως εύρωστο πρωτόκολλο.

2.5 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Δομή του Δικτύου

2.5.1 Επίπεδα Πρωτόκολλα Δρομολόγησης (Flat Protocols)

Σε γενικές γραμμές, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για επίπεδα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να ταξινομηθούν, σύμφωνα με τη στρατηγική δρομολόγησης, σε τρεις βασικές κατηγορίες: Προληπτικά (Pro-active), Αντιδραστικά (Re-active) και Υβριδικά (Hybrid) [46]. Αυτά τα πρωτόκολλα διαφέρουν μεταξύ τους και δεν παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά, αν και έχουν σχεδιαστεί για το ίδιο τύπο δικτύου.

Σύμφωνα με μια άλλη ταξινόμηση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για επίπεδα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να ταξινομηθούν ως βασισμένα σε πίνακες (Table-driven) και αρχικοποιημένα από την πηγή (Source-initiated). Οι παρακάτω ενότητες περιγράφουν αυτά τα πρωτόκολλα και τα ταξινομούν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους.

2.5.1.1 Προληπτικά (Pro-active) ή (Table-Driven) Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Τα προληπτικά πρωτόκολλα λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με τα ενσύρματα δίκτυα: με βάση την περιοδική ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης μεταξύ των διαφόρων κόμβων, κάθε κόμβος δημιουργεί το δικό του πίνακα δρομολόγησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρει ένα μονοπάτι για ένα προορισμό. Κάθε κόμβος πρέπει να διατηρεί ένα ή ίσως και περισσότερους πίνακες, αποθηκεύοντας πληροφορίες δρομολόγησης. Μπορούν επίσης να ανταποκριθούν σε οποιοσδήποτε αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου με την αποστολή ενημερώσεων σε όλο το ασύρματο δίκτυο διατηρώντας έτσι μια συνεκτική εικόνα του δικτύου. Ως εκ τούτου, όταν απαιτείται μια διαδρομή προς κάποιο προορισμό από έναν κόμβο ή ένα πακέτο πρέπει, η διαδρομή να είναι ήδη γνωστή και δεν υπάρχει καμία επιπλέον καθυστέρηση λόγω ανακάλυψης της διαδρομής. Ωστόσο, η διατήρηση και ενημέρωση των πληροφοριών, μπορεί να απαιτεί αρκετό εύρος ζώνης και επιπλέον ισχύς μπαταρίας, η οποία περιορίζεται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι πληροφορίες μπορεί να μην είναι ενημερωμένες. Παρακάτω περιγράφονται κάποια από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

2.5.1.1.1 Το Ασύρματο Πρωτόκολλο Δρομολόγησης (WRP)

Το πρωτόκολλο WRP είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, που κληρονομεί τις ιδιότητες του κατανεμημένου αλγορίθμου Bellman-Ford [47]. Το WRP διατηρεί μια ενημερωμένη άποψη του δικτύου, χρησιμοποιώντας μια σειρά από πίνακες. Οι πίνακες που διατηρούνται από έναν κόμβο είναι οι ακόλουθοι: Πίνακας Απόστασης (Distance Table), Πίνακας Δρομολόγησης (Routing Table), Πίνακας Κόστους Συνδέσεων (Link Cost Table) και Πίνακας Αναμετάδοσης Μηνύματος (Message Retransmission List).

Κάθε εγγραφή του Message Retransmission List περιέχει τα ακόλουθα:

- Έναν αύξοντα αριθμό του μηνύματος ενημέρωσης.
- Έναν μετρητή αναμετάδοσης.
- Μια αναγνώριση με μία καταχώρηση ανά γείτονα.
- Μια λίστα με τις ενημερώσεις που αποστέλλονται στο μήνυμα ενημέρωσης. Οι κινητοί κόμβοι ενημερώνουν τους υπόλοιπους για τυχόν αλλαγές μέσω μηνυμάτων ενημέρωσης.

Ένα μήνυμα ενημέρωσης μεταδίδεται μόνο μεταξύ των γειτονικών κόμβων και περιέχει μια λίστα ενημερωμένων εκδόσεων (όπως τον προορισμό, την απόσταση μέχρι τον προορισμό, και τον προηγούμενο κόμβο του προορισμού) και μια λίστα απαντήσεων στην οποία εμφανίζονται οι κινητοί κόμβοι που πρέπει να αναγνωρίσει τις ενημερώσεις. Σε περίπτωση απώλειας της σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων, οι κόμβοι μεταδίδουν μηνύματα ενημέρωσης για τους γείτονές τους. Μετά, οι γείτονες αλλάζουν τις καταχωρήσεις στον πίνακα απόστασης και ελέγχουν για νέα μονοπάτια ανάμεσα σε άλλους κόμβους. Τυχόν νέα μονοπάτια αναμεταδίδονται πίσω στους αρχικούς κόμβους, έτσι ώστε να μπορεί να ενημερώσει τους πίνακες αναλόγως.

Στο WRP, κάθε κόμβος επικεντρώνεται στην διενέργεια ελέγχων συνέπειας των πληροφοριών προκατόχου που αναφέρθηκαν από τους γείτονές του. Αυτό μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις καταστάσεις βρόγχων και μπορεί να προσφέρει ταχύτερη εύρεση διαδρομής, όταν συμβαίνει αποτυχία σύνδεσης. Σε γενικές γραμμές, το WRP έχει ταχεία εύρεση διαδρομής και περιλαμβάνει λίγες ενημερώσεις του πίνακα. Αλλά απαιτεί μεγάλη μνήμη και μεγάλη επεξεργαστική δύναμη από τους κόμβους του δικτύου, λόγω της πολυπλοκότητας της συντήρησης των πολλαπλών πινάκων. Έτσι, προσφέρει περιορισμένη επεκτασιμότητα και δεν είναι κατάλληλο για μεγάλα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

2.5.1.1.2 Το πρωτόκολλο βασισμένο στην Τοπολογία Διάδοσης Αντίστροφου Μονοπατιού (TBRPF)

Το πρωτόκολλο TBRPF μεταδίδει μόνο τις διαφορές μεταξύ της προηγούμενης κατάστασης και της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου [48, 49]. Αυτό οδηγεί σε μικρότερα μηνύματα δρομολόγησης, που μπορεί να αποσταλούν πιο συχνά. Αυτό σημαίνει ότι οι πίνακες δρομολόγησης των κόμβων είναι περισσότερο ενημερωμένοι. Το πρωτόκολλο TBRPF εφαρμόζει την έννοια της προώθησης αντίστροφης διαδρομής για τη μετάδοση της ενημέρωσης προς την αντίθετη κατεύθυνση κατά μήκος του γεννητικού δένδρου που σχηματίζεται από τις διαδρομές ελάχιστου βήματος από όλους τους κόμβους αισθητήρων με την πηγή της ενημέρωσης. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται μέσω αυτών των δέντρων εκπομπής μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσει τις διαδρομές ελάχιστου βήματος που αποτελούν τα ίδια τα δέντρα. Δεδομένου ότι οι διαδρομές ελάχιστου βήματος έχουν υπολογιστεί, κάθε κόμβος πηγή εκπομπής ενημέρωσης για εξερχόμενες συνδέσεις κατά μήκος ενός δέντρου ελάχιστου βήματος δρομολογούνται προς την πηγή και δημιουργείται ένα ξεχωριστό δέντρο εκπομπής για κάθε πηγή.

Το TBRPF αποθηκεύει τις ακόλουθες πληροφορίες σε κάθε κόμβο του δικτύου:

- Έναν πίνακα τοπολογίας, που αποτελείται από όλες τις ενεργές συνδέσεις που αποθηκεύονται στον κόμβο.

- Μια λίστα των γειτονικών κόμβων.
- Για κάθε κόμβο: ένα γονέα, μια λίστα με τα παιδιά του και τον αύξοντα αριθμό της πλέον πρόσφατης ενημέρωσης.

Η κύρια ιδέα στο TBRPF είναι να μεταδίδει τις ενημερώσεις τοπολογίας σε αντίστροφη κατεύθυνση. Εν τω μεταξύ, η τροποποίηση βασίζεται στις νέες πληροφορίες τοπολογίας, οι οποίες λήφθηκαν κατά μήκος του δέντρου. Η μετάδοση ενημερωμένης που δημιουργήθηκε σε μια πηγή είναι αποδεκτή από έναν άλλο κόμβο αν λαμβάνεται από τον πατέρα του κόμβου και αν έχει μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας από την αντίστοιχη καταχώρηση στον πίνακα τοπολογίας. Ο πίνακας τοπολογίας ενημερώνεται και στη συνέχεια διαβιβάζεται σε όλα τα παιδιά του κόμβου μόνο εάν η ενημέρωση είναι αποδεκτή.

Οι ιδιότητες του πρωτοκόλλου TBRPF είναι:

- Πρόκειται για προληπτικό πρωτόκολλο.
- Χρησιμοποιεί το ελάχιστο βήμα που εκτείνεται σε δέντρο για να μεταδώσει τις ενημερώσεις.
- Το δέντρο ελάχιστου βήματος εκτείνεται από τις ρίζες με βάση τις ενημερώσεις της πηγής.
- Το δέντρο ελάχιστου βήματος διατηρείται με πληροφορίες που λαμβάνονται από το ίδιο το δέντρο.
- Κάθε κόμβος είναι εφοδιασμένος με όλες τις πληροφορίες τοπολογίας.
- Είναι δυνατές πολλαπλές διαδρομές προς τους προορισμούς.

Οι περιοδικές ενημερώσεις της τοπολογίας στέλνονται λιγότερο συχνά από ότι σε άλλα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας. Αυτές οι ενημερώσεις είναι μεγάλα μηνύματα που εξασφαλίζουν ότι κάθε κόμβος τελικά μπορεί να μάθει όλη την τοπολογία. Το TBRPF δεν είναι κατάλληλο για δίκτυα με χαμηλή κινητικότητα (π.χ. σταθερά δίκτυα αισθητήρων που τροφοδοτούνται από μπαταρία). Η έλλειψη βρόχου ελευθερίας προκαλεί την απώλεια πακέτων και σπατάλη του εύρους ζώνης.

2.5.1.2 Αντιδραστικά (Re-active) ή On-Demand Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

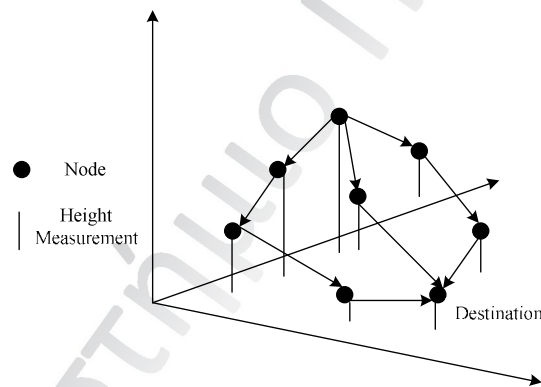
Μια διαφορετική προσέγγιση από τα προληπτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι η πηγή να ξεκινήσει την δρομολόγηση κατά απαίτηση. Σε αντίθεση με τα προληπτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα αντιδραστικά ξεκινούν την διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής μόνο όταν χρειάζεται [50]. Όταν απαιτείται μια διαδρομή από μια πηγή σε έναν προορισμό, θα ξεκινήσει ένα είδος συνολικής διαδικασίας αναζήτησης. Αυτή η εργασία δεν απαιτεί τις συνεχείς ενημερώσεις που πρέπει να αποστέλλονται μέσω του δικτύου, όπως στα προληπτικά πρωτόκολλα, αλλά αυτή η διαδικασία προκαλεί καθυστερήσεις, δεδομένου ότι οι απαιτούμενες διαδρομές δεν είναι διαθέσιμες από πριν και πρέπει να βρεθούν. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι επιθυμητές διαδρομές είναι ακόμη στη μνήμη cache που διατηρείται από τους κόμβους αισθητήρων. Όταν συμβαίνει αυτό, δεν υπάρχει καμία πρόσθετη καθυστέρηση, δεδομένου ότι η διαδρομή δεν πρέπει να ανακαλυφθεί. Η όλη διαδικασία ολοκληρώνεται όταν βρεθεί η διαδρομή ή όταν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί διαδρομής έχουν εξεταστεί.

Παρακάτω, αναφέρονται ορισμένα από τα υφιστάμενα κατά απαίτηση πρωτόκολλα δρομολόγησης.

2.5.1.2.1 Το πρωτόκολλο Προσωρινής Διάταξης (TORA)

Ο αλγόριθμος TORA είναι ένας εξαιρετικά προσαρμοστικός χωρίς βρόχο καταναμημένος αλγόριθμος δρομολόγησης [51]. Βασίζεται στην έννοια της αντιστροφής συνδέσμου. Στον TORA, κάθε κόμβος i γνωρίζει το δικό του ύψος και το ύψος του κάθε άμεσα συνδεδεμένου γείτονα j [52]. Έτσι, τα μηνύματα ελέγχου εντοπίζονται σε ένα πολύ μικρό σύνολο κόμβων στην εμφάνιση μιας τοπολογικής αλλαγής, προκειμένου αυτό το πρωτόκολλο να παρέχει ενεργειακή απόδοση. Χαρακτηρίζει κάθε σύνδεσμο ως ανοδικό ή καθοδικό με βάση το αν το ύψος του γείτονά του είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από τη δικό του. Σε κάθε κόμβο έχει ανατεθεί ύψος με βάση τη θέση του σε σχέση με τον προορισμό. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο δεδομένων, το προωθεί πάντοτε στην καθοδική κατεύθυνση (Σχήμα 4). Έτσι τα πακέτα βρίσκουν το δρόμο τους προς τον προορισμό από τους κόμβους που βρίσκονται μακριά από τον τόπο προορισμού σε κόμβους που βρίσκονται κοντά σε αυτό.

Το κύριο πλεονέκτημα του TORA είναι ότι σχεδιάστηκε για να ελαχιστοποιήσει την επιβάρυνση της επικοινωνίας που συνδέεται με την προσαρμογή των τοπολογικών αλλαγών και, επομένως, την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, υποστηρίζει πολλαπλές διαδρομές και πολυεκπομπή. Ωστόσο, ο TORA δεν περιλαμβάνει πολυεκπομπή στην βασική λειτουργία του.



Σχήμα 4. Το TORA προωθεί τα πακέτα σε καθοδική κατεύθυνση [52].

2.5.1.2.2 Το πρωτόκολλο κουτσομπολιό (Gossiping)

Το κουτσομπολιό και η μετάδοση είναι τα δύο προβλήματα της διάδοσης των πληροφοριών που περιγράφονται για μια ομάδα ατόμων που συνδέονται μέσω ενός δικτύου επικοινωνίας [53]. Στο κουτσομπολιό, κάθε άτομο στο δίκτυο γνωρίζει μια μοναδική πληροφορία και πρέπει να την κοινοποιήσει σε όλους τους άλλους. Στη μετάδοση, ένα άτομο έχει ένα στοιχείο των πληροφοριών που πρέπει να κοινοποιήσει σε όλους τους άλλους. Στην πραγματικότητα, το κουτσομπολιό είναι ένα παράγωγο των πλημμύρων (flooding) όπου οι κόμβοι δεν μεταδίδουν, αλλά στέλνουν τα εισερχόμενα πακέτα σε ένα τυχαία επιλεγμένο γείτονα. Αν και αυτή η προσέγγιση αποφεύγει το πρόβλημα της κατάρρευσης έχοντας ένα αντίγραφο του μηνύματος σε κάθε κόμβο, παίρνει πολύ χρόνο για να διαδώσει το μήνυμα σε όλους τους κόμβους αισθητήρων στο δίκτυο.

2.5.1.2.3 Το πρωτόκολλο Πλημμύρας (Flooding)

Οι πλημμύρες είναι μια παλιά και πολύ απλή τεχνική η οποία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [54]. Στις πλημμύρες, τα αντίγραφα των πακέτων αποστέλλονται από κάθε σύνδεσμο, εκτός από αυτόν από τον οποίο έφτασαν τα πακέτα. Αυτή η διαδικασία παράγει ένα τεράστιο ποσό περιττής κίνησης. Οι πλημμύρες είναι μια εξαιρετικά ισχυρή τεχνική, αλλά εφ' όσον υπάρχει μια διαδρομή από την πηγή στον προορισμό της παράδοσης του πακέτου.

Οι πλημμύρες είναι μια αντιδραστική τεχνική και δεν απαιτεί δαπανηρή συντήρηση της τοπολογίας και σύνθετους αλγόριθμους ανακάλυψης της διαδρομής.

Ωστόσο, έχει αρκετά μειονεκτήματα:

- *Κατάρρευση:* Η κατάρρευση είναι μια κατάσταση όπου διπλά μηνύματα μεταδίδονται στον ίδιο κόμβο.
- *Επικάλυψη:* Εάν δύο κόμβοι μοιράζονται την ίδια περιοχή σάρωσης και οι δύο μπορεί να ανιχνεύσουν τις ίδιες τιμές ταυτόχρονα. Ως αποτέλεσμα, οι γείτονες κόμβοι να λαμβάνουν διπλά μηνύματα.
- *Διαθεσιμότητα Πόρων:* Το πρωτόκολλο πλημμύρας δεν λαμβάνει υπόψη το σύνολο των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων. Ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο πρέπει να λαμβάνει υπόψη το ποσό της ενέργειας που είναι διαθέσιμο στους κόμβους.

Οι πλημμύρες έχουν δύο πολύ ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά που προκύπτουν από το γεγονός ότι έχουν δοκιμάσει όλες τις πιθανές διαδρομές:

- Εφ' όσον υπάρχει μια διαδρομή από την πηγή στον προορισμό, η παράδοση του πακέτου είναι εγγυημένη.
- Ένα αντίγραφο του πακέτου θα φτάσει από τη συντομότερη δυνατή διαδρομή.

Οι πλημμύρες είναι μια εξαιρετικά ισχυρή τεχνική και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για ένα "πεδίο μάχης". Η δεύτερη ιδιότητα θα μπορούσε να είναι χρήσιμη για την «εκμάθηση της διαδρομής».

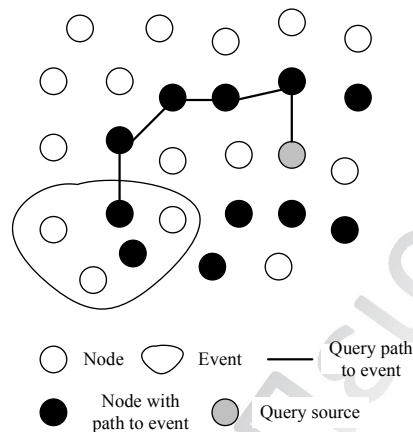
Επιπλέον, οι πλημμύρες καταναλώνουν πολλή ενέργεια, για κάθε πακέτο δεδομένων, όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται στην περιοχή εκπομπής θα λάβουν πακέτα που θα τα διαβιβάσουν στους γείτονές τους. Έτσι, αυτοί απαιτούν ένα μεγάλο ποσό ενέργειας που προκαλεί απαγορευτικά μικρή διάρκεια ζωής του δικτύου.

Υπάρχουν κάποια πρωτόκολλα που έχουν αναπτυχθεί που χρησιμοποιούν τις πλημμύρες ως μέρος της δρομολόγησής τους [55].

2.5.1.2.4 Το πρωτόκολλο Φήμης (RR)

Η δρομολόγηση φήμης είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των πλημμύρων και των ειδοποιήσεων [56]. Η κύρια ιδέα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι δημιουργεί μονοπάτια που οδηγούν σε κάθε συμβάν (Σχήμα 5), σε αντίθεση με τις πλημμύρες που δημιουργούν ένα πεδίο διαδρομών σε ολόκληρο το δίκτυο. Έτσι, σε περίπτωση που δημιουργείται ένα ερώτημα, μπορεί το ερώτημα αυτό να αποσταλεί σε ένα τυχαίο μονοπάτι μέχρι να βρει το συμβάν, αντί των πλημμύρων που στέλνονται σε όλο το δίκτυο.

Η δρομολόγηση φήμης μπορεί να είναι μια καλή μέθοδος για την παράδοση ερωτημάτων σε μεγάλα δίκτυα, σύμφωνα με ένα ευρύ φάσμα συνθηκών (χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις από εναλλακτικές λύσεις). Είναι σχεδιασμένη να είναι προσαρμόσιμη σε διαφορετικές εφαρμογές και υποστηρίζει διάφορα ερωτήματα σε ανάλογες εκδηλώσεις, με υψηλά ποσοστά επιτυχούς παράδοσης και επισκευής διαδρομής. Επιπλέον, είναι σε θέση να χειριστεί την αποτυχία κόμβων, υποβαθμίζοντας το ρυθμό παράδοσης γραμμικά με τον αριθμό των αποτυχημένων κόμβων.



Σχήμα 5. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης Φήμης [56].

2.5.1.2.5 Το πρωτόκολλο Ενεργειακής Επίγνωσης Προσωρινής Διάταξης (E-TORA)

Το E-TORA είναι μια βελτίωση του TORA που κύριος στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων [57]. Το κλασικό TORA επιλέγει τις διαδρομές με τα λιγότερα βήματα όσο η τοπολογία του δικτύου δεν αλλάζει. Αυτό μπορεί να προκαλέσει βαρύ φορτίο στους κόμβους που βρίσκονται στην κύρια διαδρομή. Επίσης, αν ορισμένες διαδρομές περιλαμβάνουν κατ'επανάληψη τον ίδιο κόμβο, ο κόμβος αυτός θα ξεμείνει από ενέργεια πολύ νωρίτερα από ότι οι άλλοι κόμβοι. Έτσι, η χρήση των κόμβων στη βραδύτερη διαδρομή χωρίς να εξεταστεί η ενέργεια που διαθέτουν οδηγεί στην μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Έτσι, προτάθηκε το E-TORA στο [57] για να λύσει αυτό το πρόβλημα. Το E-TORA λαμβάνει υπόψη το επίπεδο της ενέργειας του κάθε κόμβου και αποφεύγει τη χρήση των κόμβων με χαμηλή ενέργεια. Επιπλέον, γίνεται εξισορρόπηση της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων προκειμένου να αποφευχθεί η εξάντληση της ενέργειας τους νωρίτερα εάν χρησιμοποιούνται πολύ συχνά.

Σε περίπτωση που ένας κόμβος χωρίς κατευθυνόμενους συνδέσμους και με μια σημαία διαδρομής απαιτεί μια διαδρομή προς τον προορισμό, μεταδίδει ένα πακέτο QUERY και θέτει τη σημαία διαδρομής που απαιτείται. Όταν ένας κόμβος i λαμβάνει ένα QUERY αντιδρά ως εξής:

- Αν ο κόμβος i δεν έχει καθοδικούς δεσμούς και η σημαία διαδρομής που απαιτείται είναι un-set, επανεκπέμπει το πακέτο QUERY και θέτει τη σημαία διαδρομής.

- Αν ο κόμβος I δεν έχει καθοδικές συνδέσεις και η σημαία διαδρομή-που απαιτείται καθορίζεται, το QUERY το πακέτο απορρίπτεται.

Έτσι, το E-TORA λαμβάνει υπόψη την ενέργεια των κόμβων, προκειμένου να χρησιμοποιήσει τους κόμβους με την περισσότερη ενέργεια και να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

2.5.1.3 Σύγκριση μεταξύ Προληπτικών και Αντιδραστικών πρωτοκόλλων

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των προληπτικών και αντιδραστικών πρωτοκόλλων μπορεί να συνοψιστούν ως εξής [58, 59]:

- Τα προληπτικά πρωτόκολλα απαιτούν πολλές πληροφορίες δρομολόγησης και διατηρούν πληροφορίες ανεξάρτητα από την ανάγκη για επικοινωνία. Τα αντιδραστικά πρωτόκολλα απαιτούν λιγότερη ποσότητα πληροφορίας δρομολόγησης για κάθε κόμβο και επομένως επιτυγχάνουν λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.
- Στα προληπτικά πρωτόκολλα δεν υπάρχει καθυστέρηση στην ανακάλυψη διαδρομής, έτσι είναι κατάλληλα για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Στα αντιδραστικά πρωτόκολλα υπάρχει καθυστέρηση λόγω της διαδικασίας ανακάλυψης διαδρομής, η οποία ονομάζεται καθυστέρηση απόκτησης διαδρομής και δεν είναι κατάλληλα για επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.
- Τα προληπτικά πρωτόκολλα σπαταλούν εύρος ζώνης και ενέργειας στις περιοδικές ενημερώσεις σε σύγκριση με τα αντιδραστικά πρωτόκολλα που δεν απαιτούν περιοδική ενημέρωση και έτσι εξοικονομούν ενέργεια και εύρος ζώνης κατά τη διάρκεια της περιόδου αδράνειας.
- Τα προληπτικά πρωτόκολλα ενημερώνουν τις διαδρομές και τους πίνακες δρομολόγησης συνεχώς. Στα αντιδραστικά πρωτόκολλα μια διαδρομή θα βρεθεί μόνο όταν ζητηθεί.
- Τα προληπτικά πρωτόκολλα χρειάζεται να αποκτήσουν και να διατηρήσουν τις πληροφορίες δρομολόγησης για όλους τους κόμβους σε ένα δίκτυο. Απαιτούν μεγάλη χωρητικότητα για να κρατήσουν τις πληροφορίες του δικτύου. Στα αντιδραστικά πρωτόκολλα οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν χρειάζεται να λαμβάνουν αποφάσεις δρομολόγησης. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη να έχουν πληροφορίες σχετικά με τους κόμβους.
- Τα προληπτικά πρωτόκολλα στέλνουν μηνύματα ενημέρωσης σε όλο το δίκτυο περιοδικά ή όταν αλλάζει η τοπολογία του. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη να στείλουν μήνυμα ενημέρωσης, όταν αλλάζει η τοπολογία στην περίπτωση των αντιδραστικών πρωτοκόλλων.
- Τα προληπτικά πρωτόκολλα είναι καλά βαριά φορτία, αλλά όχι αρκετά καλά για ελαφριά φορτία, ενώ τα αντιδραστικά πρωτόκολλα είναι καλά για ελαφριά φορτία και καταρρέουν κατά τη διάρκεια μεγάλων φορτίων.
- Τα προληπτικά πρωτόκολλα δεν χρησιμοποιούνται σε εκρηκτική κίνηση αλλά τα αντιδραστικά πρωτόκολλα μπορεί να χρησιμοποιηθούν, καθώς υπάρχει συμφόρηση κατά τη διάρκεια της υψηλής δραστηριότητας.
- Εάν αλλάζουν συχνά οι πληροφορίες δρομολόγησης, τότε τα προληπτικά πρωτόκολλα δεν θα ασκήσουν καμία επίδραση στην παράδοση των πακέτων, αλλά με τα αντιδραστικά πρωτόκολλα εάν οι πληροφορίες δρομολόγησης αλλάζουν συχνά και απαιτούνται ανακαλύψεις διαδρομής τότε μπορεί να

οδηγήσει σε ένα μεγάλο όγκο μηνυμάτων, δεδομένου ότι οι ανακτήσεις διαδρομής απαιτούν μια εκπομπή μηνύματος στο δίκτυο.

Στον Πίνακα 1, παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των προληπτικών και αντιδραστικών πρωτοκόλλων.

	<i>Προληπτικά Πρωτόκολλα</i>	<i>Αντιδραστικά Πρωτόκολλα</i>
<i>Πρωτόκολλα που βασίζονται στην ζήτηση</i>		X
<i>Ενημερώνουν συνέχεια τις διαθέσιμες διαδρομές</i>	X	
<i>Καθυστέρηση απόκτησης διαδρομής</i>		X
<i>Περιοδική ενημέρωση</i>	X	
<i>Αποθηκεύουν τις πληροφορίες δρομολόγησης για όλους τους κόμβους</i>	X	
<i>Αποστολή μηνυμάτων ενημέρωσης όταν γίνει τοπολογική αλλαγή</i>		X
<i>Κατάλληλο για βαρύ φορτίο</i>	X	
<i>Κατάλληλο για εκρηκτική κίνηση</i>		X
<i>Υπερφόρτωση του δικτύου από τα μηνύματα ενημέρωσης κατάστασης</i>	X	

Πίνακας 1. Σύγκριση προληπτικών και αντιδραστικών πρωτοκόλλων.

Η διαθεσιμότητα των πληροφοριών δρομολόγησης είναι ένα βασικό πλεονέκτημα των προληπτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης, επειδή μπορεί να γίνει ταχύτερη απόφαση δρομολόγησης και κατά συνέπεια λιγότερη καθυστέρηση στη διαδικασία εύρεσης διαδρομής από ότι στην περίπτωση των αντιδραστικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης [60]. Από την άλλη πλευρά, αυτό το σημαντικό πλεονέκτημα απαιτεί περιοδικές ενημερώσεις δρομολόγησης για να έχουν οι πίνακες δρομολόγησης την απαραίτητη πληροφορία, που δημιουργούν υψηλότερο κόστος σηματοδοσίας. Επιπλέον, αυτό κάνει τους κόμβους του δικτύου να ξοδεύουν περισσότερη ενέργεια από τα περιοδικά μηνύματα ενημέρωσής τους. Ωστόσο, για άλλες λειτουργίες, όπως η αναδιαμόρφωση μετά από αποτυχία σύνδεσης, υπάρχουν διαφορές μεταξύ των πρωτοκόλλων της κάθε κατηγορίας. Για παράδειγμα, το TORA είναι ένα αντιδραστικό πρωτόκολλο δρομολόγησης. Την ίδια στιγμή, το TORA χρησιμοποιεί τοπικά συστήματα συντήρησης διαδρομής που μειώνουν τη σηματοδοσία.

2.5.1.4 Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Τα υβριδικά πρωτόκολλα συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των προληπτικών και των αντιδραστικών. Έτσι χρησιμοποιούν τοπικά την προληπτική δρομολόγηση και μεταξύ των τοπικών δρομολογήσεων την αντιδραστική δρομολόγηση. Αυτό βασίζεται εν μέρει στις ακόλουθες υποθέσεις: α) η περισσότερη επικοινωνία στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων λαμβάνει χώρα μεταξύ των κόμβων που βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλο, και β) μεταβολές στην τοπολογία είναι σημαντικές μόνο εάν συμβεί κάποιο γεγονός στην περιοχή του κόμβου. Όταν αποτύχει ένας σύνδεσμος ή ένας κόμβος εξαφανιστεί σε κάποιο σημείο του δικτύου, επηρεάζει μόνον τις τοπικές γειτονιές, οι κόμβοι στην άλλη πλευρά του δικτύου δεν επηρεάζονται.

2.5.1.4.1 Το πρωτόκολλο Ζώνης (ZRP)

Το ZRP είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο δρομολόγησης που συνδυάζει όχι μόνο τα πλεονεκτήματα των προληπτικών πρωτοκόλλων, αλλά και τα πλεονεκτήματα των αντιδραστικών πρωτοκόλλων σε ένα υβριδικό σύστημα [61]. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, το δίκτυο διαιρείται σε ζώνες και οι ζώνες προληπτικά διατηρούν την τοπολογία της ζώνης, όμως, δεν υπάρχει περιοδική ανταλλαγή της πιθανής αλλαγής στην τοπολογία σε όλο το δίκτυο. Οι γειτονικοί κόμβοι ενημερώνονται μόνο ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Εάν υπάρχει ανάγκη να αναζητήσει ένα συγκεκριμένο κόμβο, τότε ξεκινά το ερώτημα διαδρομής και μεταδίδεται στους γειτονικούς κόμβους. Όποτε αλλάξει η κατάσταση σύνδεσης ενός κόμβου αισθητήρα, θα σταλεί μια ειδοποίηση μέχρι την ακτίνα της ζώνης. Ως εκ τούτου, ένας κόμβος ξέρει πάντα πώς να προσεγγίσει έναν άλλο κόμβο στην ίδια ζώνη. Αυτό επίσης περιορίζει τον αριθμό των ενημερώσεων από αλλαγή σε μια κατάσταση σύνδεσης. Από την άλλη πλευρά, η δρομολόγηση μεταξύ διαφορετικών ζωνών χρησιμοποιεί ένα σύστημα, όταν ένας κόμβος χρειάζεται μια διαδρομή προς έναν κόμβο εκτός της ζώνης του. Εκτελεί ένα αίτημα διαδρομής αποστέλλοντας ένα RREQ σε κάθε κόμβο στα "σύνορα" της ζώνης του. Κατά την παραλαβή ενός τέτοιου πακέτου από τον κόμβο στα σύνορα ζώνης, ο κόμβος αυτός ελέγχει πρώτα τον πίνακα δρομολόγησης του για την ύπαρξη μιας διαδρομής προς το αιτούμενο κόμβο προορισμού. Αν υπάρχει μια τέτοια διαδρομή αποστέλλεται απάντηση διαδρομής. Αλλιώς, εκτελεί μια άλλη αίτηση διαδρομής στη ζώνη του. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί μια διαδρομή.

Το κύριο πλεονέκτημα του ZRP είναι ότι απαιτεί μικρή ποσότητα πληροφοριών δρομολόγησης σε κάθε κόμβο, έτσι παράγει πολύ λιγότερη κίνηση δρομολόγησης από μια προληπτική ή αντιδραστική δρομολόγηση [62]. Ωστόσο, έχει καθυστερήσεις που οφείλονται σε πολλά άχρηστα πακέτα ελέγχου που αποστέλλονται στο δίκτυο. Ως εκ τούτου, το φορτίο του δικτύου αυξάνεται με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του δικτύου.

Στον Πίνακα 2, παρουσιάζεται η σύγκριση των επίπεδων πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Τα πρωτόκολλα TBRPD, TORA, Gossiping, E-TORA και ZRP είναι αποτελεσματικά στην περίπτωση που οι κόμβοι κινούνται. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα TBRPF, RR και ZRP είναι εύρωστα, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι χρησιμοποιούν περιοδικά μηνύματα για να ανακαλύψουν τους ενεργούς κόμβους του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, τα πρωτόκολλα E-TORA και ZRP δεν χρησιμοποιούν τη συντομότερη διαδρομή όπως τα άλλα πρωτόκολλα, αλλά επιλέγουν την καλύτερη διαδρομή με βάση την ενέργεια των κόμβων. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα TORA, Φήμης, RR και E-TORA είναι επεκτάσιμα.

Τέλος, στα επίπεδα πρωτόκολλα μπορεί εν μέρει να συμπεριληφθούν μερικά πρωτόκολλα, τα οποία ταξινομούνται και περιγράφονται αναλυτικά στις κατηγορίες παρακάτω. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι: OGF και HGR.

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Επεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Εύρεση Διαδρομής	Τύπος Περιοδικού Μηνύματος	Ευρωστία
WRP	Εξαλείφει καταστάσεις βρόγχων και παρέχει ταχύτερη σύγκλιση διαδρομής όταν παρουσιαστεί βλάβη	Δεν είναι κατάλληλο για δυναμικό, αλλά και για μεγάλο ασύρματο δίκτυο	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Ελάχιστο μονοπάτι	Αποστολή πίνακα	Χαμηλή
TBRPF	Οι περιοδικές ενημερώσεις τοπολογίας είναι λιγότερες από ότι σε άλλα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας	Δεν είναι κατάλληλο για δίκτυα με χαμηλή κινητικότητα	Περιορισμένη	Καλή	Ελάχιστο μονοπάτι	Αποστολή μηνύματος	Καλή
TORA	Ελαχιστοποιεί την εναέρια επικοινωνία, υποστηρίζει πολλαπλές διαδρομές και multicast	Δεν ενσωματώνει multicast στη βασική του λειτουργία	Καλή	Καλή	Ελάχιστο μονοπάτι	Αποστολή μηνύματος	Χαμηλή
Gossiping	Αποφεύγει το πρόβλημα της κατάρρευσης και λειτουργεί με πολύ λίγη ή καθόλου δομή του δικτύου	Παίρνει πολύ χρόνο για να διαδώσει το μήνυμα σε όλους τους κόμβους αισθητήρων στο δίκτυο	Καλή	Καλή	Τυχαία	Κανένα	Καλή
Flooding	Είναι απλό και εύρωστο	Μπορεί να μεταδοθεί διπλά μηνύματα στον ίδιο κόμβο	Περιορισμένη	Χαμηλή	Ελάχιστο μονοπάτι	Κανένα	Καλή
RR	Είναι σε θέση να χειριστεί την αποτυχία σε κάποιο κόμβο	Μπορεί να παραδώσει διπλά μηνύματα στον ίδιο κόμβο	Καλή	Χαμηλή	Ελάχιστο μονοπάτι	Αποστολή μηνύματος	Καλή
E-TORA	Ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας και οδηγεί στην ισορροπημένη κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους	Δεν ενσωματώνει multicast στη βασική του λειτουργία	Καλή	Καλή	Καλύτερο	Αποστολή μηνύματος	Χαμηλή
ZRP	Παράγει χαμηλή κίνηση για δρομολόγηση	Υπερβολική καθυστέρηση	Περιορισμένη	Καλή	Καλύτερο	Αποστολή μηνύματος	Καλή

Πίνακας 2. Σύγκριση των επίπεδων πρωτοκόλλων.

2.5.2 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Αντίθετα με τα επίπεδα πρωτόκολλα, όπου κάθε κόμβος έχει μια μοναδική διεύθυνση και όλοι οι κόμβοι είναι γείτονες, στα ιεραρχικά πρωτόκολλα οι κόμβοι ομαδοποιούνται σε συμπλέγματα. Κάθε σύμπλεγμα έχει έναν επικεφαλής η εκλογή του οποίου βασίζεται σε διαφορετικούς αλγόριθμους εκλογής. Ο επικεφαλής χρησιμοποιείται για την επικοινωνία σε υψηλότερο επίπεδο, μειώνοντας την κίνηση. Η ομαδοποίηση μπορεί να επεκταθεί σε περισσότερα από δύο επίπεδα, ακολουθώντας τις ίδιες έννοιες της επικοινωνίας σε κάθε επίπεδο. Η χρήση της ιεραρχικής δρομολόγησης έχει πολλά πλεονεκτήματα, καθώς μειώνει το μέγεθος των πινάκων δρομολόγησης και προσφέρει καλύτερη επεκτασιμότητα.

2.5.2.1 Το πρωτόκολλο Χαμηλής Ενέργειας Προσαρμοσμένων Συστάδων (LEACH)

Το πρωτόκολλο LEACH είναι ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο στο οποίο οι περισσότεροι κόμβοι μεταδίδουν τα δεδομένα στους επικεφαλής κόμβους [63, 64].

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου LEACH αποτελείται από δύο φάσεις:

- *Φάση εγκατάστασης.* Στην φάση εγκατάστασης, πρώτα οργανώνονται οι συστάδες και επιλέγονται οι επικεφαλής. Οι επικεφαλής συγκεντρώνουν, συμπιέζουν και διαβιβάζουν τα δεδομένα στο σταθμό βάσης. Κάθε κόμβος καθορίζει αν θα γίνει επικεφαλής, σε αυτό το γύρο, με τη χρήση ενός αλγορίθμου. Εάν ένας κόμβος γίνει επικεφαλής για μία φορά, δεν μπορεί να γίνει επικεφαλής πάλι για P γύρους, όπου P είναι το επιθυμητό ποσοστό των επικεφαλής. Αυτή η περιστροφή στην επιλογή επικεφαλής οδηγεί σε ισορροπημένη κατανάλωση ενέργειας σε όλους τους κόμβους και συνεπώς σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του δικτύου.
- *Σταθερή φάση.* Στη σταθερή φάση, τα δεδομένα αποστέλλονται στο σταθμό βάσης. Η διάρκεια της σταθερής φάσης είναι μεγαλύτερη σε διάρκεια από την φάση εγκατάστασης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πολυπλοκότητα. Επιπλέον, κάθε κόμβος που δεν είναι επικεφαλής επιλέγει τον πλησιέστερο επικεφαλής για να στείλει τα δεδομένα του. Μετά από αυτό ο επικεφαλής δημιουργεί ένα χρονοπρογραμματισμό για κάθε κόμβο για να διαβιβάζουν τα δεδομένα τους στον επικεφαλής.

Το κύριο πλεονέκτημα του LEACH είναι ότι ξεπερνά τα συμβατικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, από την άποψη της εξοικονόμησης ενέργειας, της ευκολίας της διαμόρφωσης, και της διάρκειας ζωής του συστήματος/ποιότητας του δικτύου [65]. Ωστόσο, το LEACH χρησιμοποιεί δρομολόγηση ενός βήματος όπου κάθε κόμβος μπορεί να μεταδώσει απευθείας στον επικεφαλής και στον σταθμό βάσης. Ως εκ τούτου, δεν συνιστάται για δίκτυα που καλύπτουν μεγάλες περιοχές. Επιπλέον, η δυναμική ομαδοποίηση οδηγεί σε επιπλέον επιβάρυνση, π.χ. για την αλλαγή του επικεφαλής, τις διαφημίσεις κλπ., η οποία μπορεί να μειώσει το κέρδος στην κατανάλωση ενέργειας.

2.5.2.2 Το πρωτόκολλο Χαμηλής Ενέργειας Κεντροποιημένων Συστάδων (LEACH-C)

Το LEACH-C χρησιμοποιεί το σταθμό βάσης για το σχηματισμό συστάδων, σε αντίθεση με το LEACH όπου οι κόμβοι οι ίδιοι οργανώνονται σε συστάδες [66]. Αρχικά στο LEACH-C, ο σταθμός βάσης (BS) λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη θέση και το επίπεδο της ενέργειας του κάθε κόμβου στο δίκτυο. Μετά από αυτό ο BS βρίσκει ένα προκαθορισμένο αριθμό με επικεφαλής και ρυθμίζει τις παραμέτρους του δικτύου σε ομάδες. Οι ομάδες συστάδας επιλέγονται ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ενέργεια που απαιτείται από τους κόμβους για να μεταδίδουν τα δεδομένα τους στους αντίστοιχους επικεφαλής τους.

Οι βελτιώσεις αυτού του αλγορίθμου σε σύγκριση με το LEACH είναι οι ακόλουθες:

- Ο BS χρησιμοποιεί την γνώση του δικτύου για την οργάνωση των συστάδων που απαιτούν τη λιγότερη ενέργεια για τη μετάδοση των δεδομένων.
- Σε αντίθεση με το LEACH, όπου ο αριθμός των επικεφαλής ποικίλλει από γύρο σε γύρο λόγω της έλλειψης συντονισμού μεταξύ των κόμβων, στο LEACH-C ο αριθμός των επικεφαλής συστάδας σε κάθε γύρο ισούται με μία προκαθορισμένη βέλτιστη τιμή.

2.5.2.3 Το πρωτόκολλο Ενεργειακής Απόδοσης Συλλογής (PEGASIS)

Το πρωτόκολλο PEGASIS είναι ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στην αλυσίδα και αποτελεί βελτίωση του LEACH [67]. Στο PEGASIS κάθε κόμβος επικοινωνεί μόνο με ένα κοντινό γείτονα, προκειμένου να στείλει και να λάβει δεδομένα. Σε κάθε γύρο μεταδίδει τα δεδομένα στο σταθμό βάσης, μειώνοντας έτσι την ποσότητα της ενέργειας που δαπανάται σε κάθε γύρο. Οι κόμβοι οργανώνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίσουν μια αλυσίδα, η οποία μπορεί να επιτευχθεί είτε από τους ίδιους τους κόμβους αισθητήρων, χρησιμοποιώντας ένα άπληστο αλγόριθμο ξεκινώντας από κάποιο κόμβο, ή μπορεί ο BS μπορεί να υπολογίσει αυτή την αλυσίδα και να ενημερώσει τους κόμβους.

Στο [67] εκτελείται προσομοίωση σε ένα δίκτυο που έχει 100 τυχαία τοποθετημένους κόμβους. Ο BS τοποθετείται σε μία απομακρυσμένη απόσταση από τους κόμβους. Έτσι, για μια τοπολογία 50m x 50m, ο BS βρίσκεται στη θέση (25, 150) έτσι ώστε να είναι τουλάχιστον 100m μακριά από το πλησιέστερο κόμβο. Για την κατασκευή της αλυσίδας, είναι δεδομένο ότι όλοι οι κόμβοι έχουν γνώση του δικτύου και ότι χρησιμοποιείται ένας άπληστος αλγόριθμος. Έτσι, η κατασκευή της αλυσίδας θα ξεκινήσει από τον απομακρυσμένο κόμβο στον κοντινό. Εάν ένας κόμβος εξαντλήσει την διαθέσιμη ενέργεια, η αλυσίδα ανακατασκευάζεται με τον ίδιο τρόπο για να παρακάμψει το κόμβο.

Σε γενικές γραμμές, το πρωτόκολλο PEGASIS παρουσιάζει δύο ή περισσότερες φορές καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με το πρωτόκολλο LEACH [68, 69]. Ωστόσο, το πρωτόκολλο PEGASIS προκαλεί την μετάδοση περιττών δεδομένων από τους κόμβους στην αλυσίδα. Σε αντίθεση με το LEACH, η απόσταση μετάδοσης για την πλειονότητα των κόμβων είναι μειωμένη στο PEGASIS. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το PEGASIS επιτυγχάνει βελτίωση κατά ένα παράγοντα 2 σε σύγκριση με το πρωτόκολλο LEACH για τοπολογία δικτύου 50m x 50m και βελτίωση κατά ένα παράγοντα 3 για μέγεθος 100m x 100m. Το πρωτόκολλο PEGASIS, ωστόσο, έχει ένα κρίσιμο πρόβλημα, που είναι η περιττή μετάδοση των δεδομένων. Η αιτία αυτού του προβλήματος είναι ότι δεν υπολογίζεται η τοποθεσία

του σταθμού βάσης για την ενέργεια των κόμβων, όταν ένας από τους κόμβους επιλέγεται ως επικεφαλής.

2.5.2.4 Το πρωτόκολλο Ευαίσθητου Ορίου Δικτύου Αισθητήρων (TEEN)

Το TEEN είναι ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο σχεδιασμένο για συνθήκες, οι οποίες περιλαμβάνουν αιφνίδιες αλλαγές σε χαρακτηριστικά όπως η θερμοκρασία [70]. Η ανταπόκριση ενός πρωτοκόλλου στο χρόνο για κρίσιμες εφαρμογές είναι σημαντική, στις οποίες το δίκτυο λειτουργεί σε αντιδραστική λειτουργία. Η αρχιτεκτονική του δικτύου αισθητήρων στο TEEN βασίζεται σε μια ιεραρχική ομαδοποίηση των κόμβων.

Σε αυτό το πρωτόκολλο ο επικεφαλής εκπέμπει προς τα μέλη του ένα άνω αυστηρό όριο (Hard Threshold) και ένα κάτω ήπιο όριο (Soft Threshold). Το Hard Threshold είναι μια τιμή κατωφλίου πέρα από την οποία, ο κόμβος πρέπει να ενεργοποιεί τον πομπό του και να αναφέρει το γεγονός αυτό στον επικεφαλής του συμπλέγματος. Το Soft Threshold είναι το μια μικρή αλλαγή στην αξία της μέτρησης του αισθητήρα η οποία ενεργοποιεί τον πομπό και μεταδίδει. Οι κόμβοι ανιχνεύουν το περιβάλλον τους συνεχώς. Την πρώτη φορά που μια παράμετρος από τα μετρήσιμα χαρακτηριστικά φτάνει σε Hard Threshold, ο κόμβος στέλνει τα δεδομένα που ανιχνεύονται. Η ανιχνευμένη τιμή αποθηκεύεται σε μία εσωτερική μεταβλητή στον κόμβο, που ονομάζεται ανιχνευμένη τιμή (Sensed Value).

Το κύριο πλεονέκτημα του TEEN είναι ότι λειτουργεί καλά σε συνθήκες με αιφνίδιες αλλαγές στις τιμές του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία. Από την άλλη πλευρά, σε μεγάλα δίκτυα και όταν ο αριθμός των επιπέδων στην ιεραρχία είναι μικρός, το TEEN τείνει να καταναλώνει πολύ ενέργεια, λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ των μεταδόσεων. Επιπλέον, όταν ο αριθμός των επιπέδων αυξάνεται, οι μεταδόσεις γίνονται μικρότερες.

2.5.2.5 Το πρωτόκολλο Προσαρμοσμένου Ευαίσθητου Ορίου Δικτύου Αισθητήρων (APTEEN)

Το APTEEN αποτελεί βελτίωση του TEEN και στοχεύει τόσο στην καταγραφή της περιοδικής συλλογής δεδομένων όσο και στο να αντιδρά σε χρονικά κρίσιμα γεγονότα [71]. Μόλις ο σταθμός βάσης σχηματίσει τις συστάδες, οι επικεφαλής μεταδίδουν τα χαρακτηριστικά, τις τιμές κατωφλίου και το χρονοδιάγραμμα μετάδοσης σε όλους τους κόμβους. Μετά από αυτό οι επικεφαλής εκτελούν την συνάθροιση δεδομένων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας.

Το κύριο πλεονέκτημα του APTEEN, σε σύγκριση με το TEEN είναι ότι οι κόμβοι καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Ωστόσο, τα κύρια μειονεκτήματα του APTEEN είναι η πολυπλοκότητά του και το ότι οδηγεί σε μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις.

2.5.2.6 Το πρωτόκολλο Εικονικής Άπληστης Αρχιτεκτονικής Δρομολόγησης (VGA)

Το VGA συνδυάζει την συνάθροιση δεδομένων με την επεξεργασία δεδομένων από το δίκτυο για την επίτευξη ενεργειακής απόδοσης και τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου [72]. Το πρωτόκολλο αυτό αποτελείται από δύο φάσεις, την ομαδοποίηση και την δρομολόγηση των στοιχείων. Στη φάση της ομαδοποίησης, οι αισθητήρες τοποθετούνται σε σταθερή τοπολογία, καθώς οι περισσότερες από τις

εφαρμογές απαιτούν οι αισθητήρες να είναι σε σταθερή θέση. Μέσα σε κάθε ομάδα ο επικεφαλής εκτελεί την συνάθροιση των δεδομένων που συλλέγει από τους κόμβους. Στη φάση της συνάθροισης των δεδομένων, εφαρμόζεται κάποια ευριστική τεχνική η οποία μπορεί να δώσει μια απλή, αποτελεσματική και σχεδόν βέλτιστη λύση. Οι κόμβοι σχηματίζουν ομάδες οι οποίες μπορεί να είναι επικαλυπτόμενες. Έτσι, η ανάγνωση των μελών σε μια ομάδα μπορούν να συσχετιστεί.

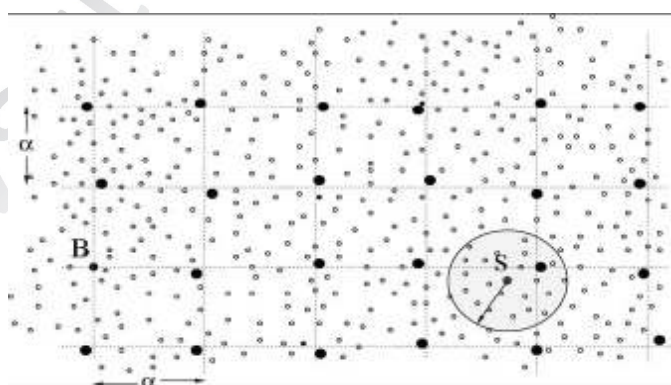
Το κύριο πλεονέκτημα του πρωτοκόλλου αυτού είναι ότι μπορεί να επιτύχει ενεργειακή απόδοση και μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου, αλλά το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής των τοπικών επικεφαλής είναι ένα NP πρόβλημα.

2.5.2.7 Το πρωτόκολλο Διπλής Διάδοσης Δεδομένων (TTDD)

Το TTDD υποθέτει ότι οι κόμβοι του δικτύου είναι σταθεροί, έχουν γνώση της γεωγραφικής τους θέσης και επιτρέπεται να αλλάζουν τη θέση τους δυναμικά [73]. Κατά τη διάρκεια που ανιχνεύεται ένα συμβάν από κοντινούς αισθητήρες, ένας από αυτούς γίνεται η πηγή που θα δημιουργήσει αναφορές δεδομένων. Μετά από αυτό φτιάχνεται η εικονική δομή πλέγματος, που ξεκινάει από τον κόμβο πηγή και η ίδια επιλέγει τον ίδιο ως σημείο έναρξης ενός πλέγματος. Στέλνει ένα μήνυμα αναγγελίας δεδομένων σε τέσσερα διαφορετικά γειτονικά σημεία χρησιμοποιώντας την άπληστη γεωγραφική προώθηση. Το μήνυμα αυτό σταματά μόνο όταν φτάσει σε έναν κόμβο που είναι πιο κοντά στο σημείο διέλευσης. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου το μήνυμα φθάσει στο όριο του δικτύου.

Στο Σχήμα 6, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για την κατασκευή του πλέγματος. Στην περίπτωση αυτή, θεωρούνται μία πηγή B και ένας σταθμός βάσης S και ένα διδιάστατο πεδίο. Η πηγή B διαιρεί το πεδίο σε ένα πλέγμα με κυψέλες. Κάθε κυψέλη είναι ένα τετράγωνο με διαστάσεις $\alpha\alpha$. Η ίδια η πηγή είναι ένα σημείο διέλευσης του δικτύου. Η πηγή διαδίδει τις ανακοινώσεις των στοιχείων για την επίτευξη όλων των άλλων σημείων διέλευσης.

Το TTDD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλούς κινητούς σταθμούς βάσης σε ένα πεδίο σταθερών κόμβων αισθητήρων. Το κύριο μειονέκτημά του είναι ότι κάθε κόμβος πηγή χτίζει μια εικονική δομή πλέγματος των σημείων διάδοσης για την παροχή δεδομένων σε κινητούς σταθμούς.



Σχήμα 6. Ένας κόμβος και ένας σταθμός στο πρωτόκολλο TTDD [73].

2.5.2.8 Το πρωτόκολλο Ελεγχόμενης Δυναμικής Συσταδοποίησης Σταθμού Βάσης (BCDCP)

Το BCDCP δημιουργεί συστάδες με βάση το ότι θα είναι εξισορροπημένες [74]. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, ο σταθμός βάσης, πριν από τον καθορισμό της

διαδρομής δρομολόγησης, λαμβάνει πληροφορίες για την τρέχουσα κατάσταση ενέργειας από όλους τους κόμβους του δικτύου. Με βάση αυτή την πληροφορία, ο σταθμός βάσης υπολογίζει πρώτα το μέσο επίπεδο της ενέργειας όλων των κόμβων. Στη συνέχεια, επιλέγει ένα σύνολο κόμβων των οποίων τα επίπεδα ενέργειας είναι πάνω από τη μέση τιμή.

Επιπροσθέτως, σε κάθε συστάδα, ο επικεφαλής εξυπηρετεί ένα αριθμό κόμβων περίπου ίσο για κάθε συστάδα, προκειμένου να επιτευχθούν τα ακόλουθα:

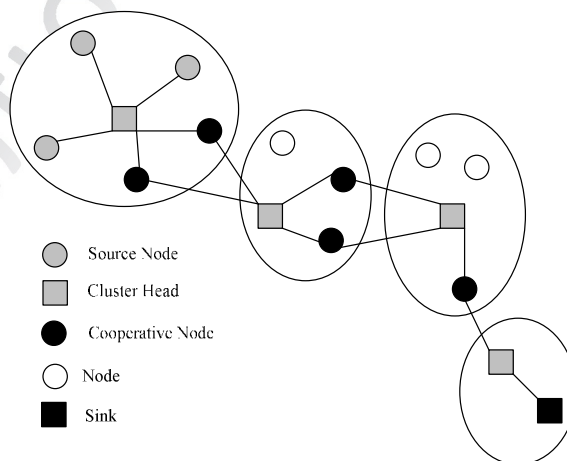
- αποφυγή της υπερφόρτωσης του επικεφαλής,
- ομοιόμορφη τοποθέτηση των επικεφαλής σε ολόκληρο το πεδίο, και
- χρησιμοποίηση της αρχιτεκτονικής δρομολόγησης από επικεφαλής σε επικεφαλής για να μεταφερθούν τα δεδομένα προς τον σταθμό βάσης.

Επίσης, στο BCDCP ο σταθμός βάσης θεωρείται ότι είναι ένας υψηλής ενέργειας κόμβος με υψηλά ενεργειακά αποθέματα.

2.5.2.9 Το πρωτόκολλο Πολλαπλών Βημάτων (MIMO)

Στο MIMO τα δεδομένα συλλέγονται από πολλαπλούς κόμβους και διαδίδονται σε ένα απομακρυσμένο σταθμό βάσης μέσω πολλαπλών βημάτων [75]. Οι κόμβοι των αισθητήρων οργανώνονται σε συστάδες όπως στο Σχήμα 7. Ο επικεφαλής μεταδίδει τα δεδομένα σε κόμβους που ανήκουν στο συγκεκριμένο σύμπλεγμα. Στη συνέχεια, οι κόμβοι του συμπλέγματος κωδικοποιούν και διαβιβάζουν τα δεδομένα στον επικεφαλής στο επόμενο βήμα, σύμφωνα με την ορθογώνια κώδικα Space-Time Block [75].

Προκειμένου να βελτιωθεί η εξοικονόμηση ενέργειας, το πολυβηματικό εικονικό MIMO προτείνει η μέση εξασθένιση του καναλιού ανάμεσα σε κάθε κόμβο συμπλέγματος και τον επικεφαλής μπορεί να εκτιμηθεί κατά τον σχηματισμό των συστάδων, ώστε να χρησιμοποιεί ίση αναλογία σήματος προς θόρυβο για την κατανομή της ισχύος εκπομπής λόγω φασματικής απόδοσης και απλότητας.



Σχήμα 7. Το πρωτόκολλο MIMO [75].

2.5.2.10 Το πρωτόκολλο Ιεραρχικής Επίγνωσης Ισχύος Δρομολόγησης (HPAR)

Το HPAR είναι ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης που χωρίζει το δίκτυο σε ομάδες που ονομάζονται ζώνες [76]. Κάθε ζώνη είναι μια ομάδα από

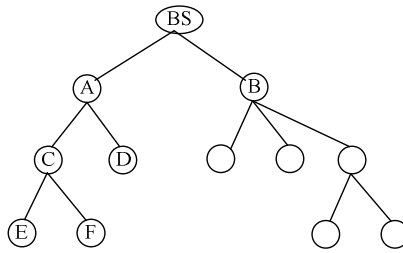
κόμβους που βρίσκεται γεωγραφικά κοντά και αντιμετωπίζονται ως μια οντότητα. Έτσι, το πρώτο βήμα αυτού του πρωτοκόλλου είναι η δημιουργία των ζωνών. Το επόμενο βήμα είναι η λειτουργία του συστήματος δρομολόγησης προκειμένου να αποφασίσει πώς θα δρομολογείται ένα μήνυμα σε άλλες ζώνες ιεραρχικά έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κόμβων του δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός μηνύματος που δρομολογείται κατά μήκος μιας διαδρομής με την μέγιστη ισχύ πάνω από την ελάχιστη εναπομένουσα ενέργεια. Το μονοπάτι αυτό ονομάζεται max-min διαδρομή. Η κύρια ιδέα μιας τέτοιας απόφασης είναι ότι είναι δυνατό ένα μονοπάτι με υψηλή εναπομένουσα ενέργεια κόμβων να έχει περισσότερη κατανάλωση ενέργειας από την διαδρομή ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης. Το πρωτόκολλο αυτό παρουσιάζει έναν αλγόριθμο προσέγγισης που ονομάζεται αλγόριθμος max-min ZPmin. Ο αλγόριθμος αυτός βρίσκει πρώτα μια διαδρομή με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο Dijkstra. Στη συνέχεια βρίσκει μια δεύτερη διαδρομή που μεγιστοποιεί την ελάχιστη εναπομένουσα ενέργεια στο δίκτυο. Το πρωτόκολλο αυτό μετά προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τα δύο κριτήρια.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι λαμβάνει υπόψη τόσο την ισχύ μετάδοσης όσο και την ελάχιστη ισχύ της μπαταρίας των κόμβων στη διαδρομή. Επιπλέον, κάνει χρήση των ζωνών για να ανταποκριθεί στον μεγάλο αριθμό των κόμβων. Από την άλλη πλευρά, η ανακάλυψη της εκτίμησης της ενέργειας μπορεί να οδηγήσει στην υπερφόρτωση του δικτύου.

2.5.2.11 Το πρωτόκολλο Προγραμματισμού Ύπνου/Ξυπνήματος (Sleep/Wake)

Το πρωτόκολλο sleep/wake εξοικονομεί ενέργεια, καθώς βάζει το ραδιοπομπό σε λειτουργία sleep κατά τη διάρκεια αδράνειας και τον ενεργοποιεί πριν από τη μετάδοση/λήψη του μηνύματος [77]. Το σημαντικό μέρος αυτού του πρωτοκόλλου είναι ο συγχρονισμός μεταξύ του αποστολέα και του δέκτη, έτσι ώστε να μπορούν να ξυπνήσουν ταυτόχρονα για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Τα υφιστάμενα συστήματα συγχρονισμού επιτυγχάνουν ακριβή συγχρονισμό αμέσως μετά την ανταλλαγή των μηνυμάτων συγχρονισμού, αν και εξακολουθεί να υπάρχει ένα τυχαίο σφάλμα συγχρονισμού, λόγω του μη-ντετερμινιστικού παράγοντα του συστήματος. Αυτά τα λάθη έχουν ως συνέπεια τη διαφορά του ρολογιού με το χρόνο να συγκρίσιμη με τον πραγματικό χρόνο μετάδοσης του μηνύματος. Έτσι, στο [77] προτείνεται ένας βέλτιστος αλγόριθμος χρόνο-προγραμματισμού. Ο αλγόριθμος αυτός επιτυγχάνει την μετάδοση ενός μηνύματος με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.

Το πρωτόκολλο αυτό είναι οργανωμένο σε ιεραρχική δομή και κάθε ομάδα αποτελείται από ένα μόνο επικεφαλής. Το πιο σημαντικό ζήτημα, σε αυτό το πρωτόκολλο, είναι ότι μόνο ένα μέλος του συμπλέγματος μπορεί να είναι και επικεφαλής. Στο Σχήμα 8, ο C είναι ο επικεφαλής του E, αλλά είναι και μέλος του A. Οι κόμβοι μέλη συγχρονίζονται στο διάστημα συγχρονισμού και στο διάστημα μετάδοσης κάθε κόμβος μέλος μεταδίδει με χρήση πρωτοκόλλου TDMA και στέλνει ένα μήνυμα στον επικεφαλής κάθε T δευτερόλεπτα.



Σχήμα 8. Το ιεραρχικό δέντρο στο πρωτόκολλο Sleep/Wake[77].

Επιπλέον, υπάρχουν και άλλα ιεραρχικά πρωτόκολλα εκτός από το ανωτέρω που έχουν προταθεί για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [78, 79, 80, 81, 82].

Στον Πίνακα 3, περιγράφεται η σύγκριση των ιεραρχικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Έτσι, για παράδειγμα τα πρωτόκολλα LEACH, LEACH-C, PEGASIS, TEEN, APTEEN, VGA, MIMO και Sleep/Wake είναι πιο ισχυρά από ότι τα άλλα της κατηγορίας αυτής. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα PEGASIS, VGA και TTDD χρησιμοποιούν πολιτική άπληστης διαδρομής για την επιλογή των κόμβων επίτευξης της ενεργειακής απόδοσης. Επίσης, τα LEACH, LEACH-C, PEGASIS, TEEN, APTEEN, VGA, MIMO και Sleep/Wake είναι πιο επεκτάσιμα από τα άλλα πρωτόκολλα.

Τέλος, σε ιεραρχικά πρωτόκολλα μπορεί εν μέρει να συμπεριληφθούν μερικά πρωτόκολλα, που ταξινομούνται και περιγράφονται αναλυτικά στις κατηγορίες παρακάτω. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι τα GEM, HMRP και CBMPR.

2.5.3 Σύγκριση Επίπεδων και Ιεραρχικών Πρωτοκόλλων

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης στο [47] δείχνουν ότι το WRP παρέχει βελτίωση κατά 50% περίπου σε σχέση με το Bellman-Ford. Ένα πρωτόκολλο που μειώνει την πολυπλοκότητα σε σύγκριση με το WRP είναι το TORA. Στο TORA, ο πρώτος κόμβος στο δίκτυο εξαντλείται από ενέργεια στο 205sec και όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο στο 800sec. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης στο [83], δείχνουν ότι το TORA έχει χειρότερο δείκτη παράδοσης και λιγότερη καθυστέρηση, που κυμαίνεται από 0,0025 έως 0,00125 δευτερόλεπτα, σε σύγκριση με το WRP.

Ωστόσο, το E-TORA σε σύγκριση με το TORA μπορεί να ισορροπήσει αποτελεσματικότερα την κατανάλωση ενέργειας κάθε κόμβου και να αυξήσει τη διάρκεια ζωής του δικτύου [57]. Επιπλέον, ο πρώτος κόμβος στο δίκτυο λειτουργεί μέχρι το 210° sec.

Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα προσομοίωσης στο [54] δείχνουν ότι το πρωτόκολλο Flooding έχει ποσοστό παράδοσης έως 100% και η καθυστέρηση κυμαίνεται από 100ms έως 180ms. Ωστόσο, το TBRPF επιτυγχάνει μείωση έως 98% του κόστους της επικοινωνίας σε ένα δίκτυο 20 κόμβων και το ZRP μπορεί να μειώσει έως και 95% τα πακέτα ελέγχου σε σύγκριση με το Flooding.

Ένα από τα πιο δημοφιλή πρωτόκολλα, το Gossiping, απαιτεί πολύ λίγη ή καμία δομή για λειτουργία [53]. Αυτό το καθιστά ιδανικό σε δυναμικά συστήματα, όπου οι αλλαγές της τοπολογίας είναι συνηθισμένες. Ως εκ τούτου, φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ικανό να λειτουργεί στα ασύρματα αυτό-οργανωμένα δίκτυα.

Ένα άλλο πρωτόκολλο, το RR παραδίδει το 98,1% όλων των μηνυμάτων, με μέσο κόστος 92 hops ανά ερώτημα ή περίπου το 1/40 από το Flooding και επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση σε σύγκριση με το Flooding [56]. Εάν ο αριθμός των μηνυμάτων ανά συμβάν είναι λιγότερα από δέκα, είναι καλύτερο ένα μικρότερο κόστος εγκατάστασης από ένα μικρότερο ανά μήνυμα αποστολής.

Ένα πρωτόκολλο που είναι πολύ δημοφιλές, το LEACH, μπορεί να μειώσει τον συνολικό αριθμό των μεταδόσεων, σε σύγκριση με αυτό της άμεσης επικοινωνίας. Επιπλέον, ο πρώτος κόμβος στο δίκτυο λειτουργεί μέχρι το 230sec και όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο μέχρι το 700sec. Ωστόσο, το LEACH -C υπερτερεί του LEACH στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης. Ο πρώτος κόμβος στο δίκτυο λειτουργεί μέχρι το 525sec και όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο μέχρι το 600sec. Επιπλέον, το PEGASIS αποδίδει καλύτερα από το LEACH κατά περίπου 100% έως 300%, όταν 1%, 20%, 50% και 100% των κόμβων μένουν από ενέργεια για διαφορετικά μεγέθη δικτύου και τοπολογίες [68, 69].

Επίσης, το TEEN υπερτερεί των LEACH και LEACH-C όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση [70]. Ο πρώτος κόμβος στο δίκτυο λειτουργεί μέχρι το 600sec και όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο μέχρι το 2000sec. Επίσης, η απόδοση του APTEEN βρίσκεται μεταξύ των TEEN και LEACH όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τη διάρκεια ζωής του δικτύου [71]. Το TEEN μεταδίδει μόνο κρίσιμα δεδομένα, ενώ μετράει συνεχώς τις παραμέτρους του περιβάλλοντος. Το APTEEN σε σχέση με το TEEN εφαρμόζει την περιοδική μετάδοση δεδομένων.

Επιπλέον, το BCDCP έχει μια πιο επιθυμητή καμπύλη ενεργειακής δαπάνης από τα LEACH, LEACH-C και PEGASIS [74]. Επίσης το BCDCP μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και βελτιώνει την διάρκεια ζωής του δικτύου σε σχέση με τα LEACH, LEACH-C και PEGASIS. Επιπλέον, ο πρώτος κόμβος στο δίκτυο λειτουργεί μέχρι το 820sec και όλοι οι κόμβοι μέχρι το 900sec.

Επίσης το TTDD αυξάνει την ενέργεια σταδιακά, καθώς ο αριθμός των κόμβων [73]. Επιπλέον, η καθυστέρηση κυμαίνεται από 20msec σε 80msec και η αναλογία παράδοσης μπορεί να είναι έως 90%. Εάν υπάρχουν 1 ή 2 πηγές, το DD καταναλώνει λιγότερη ενέργεια, αλλά αν υπάρχουν περισσότερα από 2 πηγές, το TTDD καταναλώνει πολύ λιγότερη ενέργεια.

Το MIMO, υπερτερεί από το LEACH όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Ο πρώτος κόμβος στο δίκτυο λειτουργεί μέχρι το 700sec [75].

Το HPAR αποδίδει καλύτερα από το 80% του βέλτιστου για το 92% των πειραμάτων και από το 90% του βέλτιστου για το 53% των πειραμάτων και το sleep/wake μπορεί να επιτύχει τουλάχιστον το 73% της βέλτιστης απόδοσης [76].

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Ελεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Εύρεση Διαδρομής	Τύπος Περιοδικού Μηνύματος	Ευρωστία
LEACH	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ad-hoc, κατανεμημένο πρωτόκολλο	Δεν είναι κατάλληλο για δίκτυα που αναπτύσσονται σε μεγάλες περιοχές και η δυναμική ομαδοποίηση φέρνει επιπλέον επιβάρυνση	Καλή	Σταθερός σταθμός	Ελάχιστο μονοπάτι	Κανένα	Χαμηλή
LEACH-C	Η ενέργεια για την μετάδοση δεδομένων είναι μικρότερη από το LEACH	Επιβάρυνση	Καλή	Σταθερός σταθμός	Καλύτερη	Κανένα	Καλή
PEGASIS	Η απόσταση μετάδοσης για τους α περισσότερους κόμβους μειώνεται	Δεν υπολογίζεται η θέση του σταθμού βάσης για την ενέργεια των κόμβων, όταν ένας από τους κόμβους επιλέγεται ως επικεφαλής	Καλή	Σταθερός σταθμός	Άπληστη	Κανένα	Χαμηλή
TEEN	Λειτουργεί καλά υπό τις συνθήκες, όπως αφνίδες αλλαγές σε χαρακτηριστικά ανίχνευσης όπως θερμοκρασία	Μεγάλη κατανάλωση ενέργειας σε περίπτωση μεγάλων δικτύων	Καλή	Σταθερός σταθμός	Καλύτερη	Κανένα	Καλή
APTEEN	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας	Μεγάλη καθυστέρηση	Καλή	Σταθερός σταθμός	Καλύτερη	Αποστολή μηνύματος	Καλή
VGA	Μπορεί να επιτύχει ενεργειακή απόδοση και μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου	Το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής των τοπικών συναθροιστών είναι NP-hard	Καλή	Όχι	Άπληστη	Κανένα	Καλή
TTDD	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλούς κινητούς σταθμούς σε ένα πεδίο των σταθερών κόμβων	Ο κόμβος πηγή χτίζει μια εικονική δομή πλέγματος των σημείων διάδοσης για την μεταφορά των δεδομένων στους κινητούς σταθμούς	Χαμηλή	Όχι	Άπληστη	Κανένα	Χαμηλή
BCDCP	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας	Το κέρδος απόδοσης μειώνεται καθώς η περιοχή του κόμβου γίνεται μικρή	Περιορισμένη	Όχι	Καλύτερη	Κανένα	Καλή
MIMO	Η εξοικονόμηση ενέργειας και παροχή QoS	Μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την ανεπαρκή επίδοση συστήματος	Καλή	Όχι	Καλύτερη	Κανένα	Περιορισμένη
HPAR	Λαμβάνει υπόψη τόσο την ισχύ εκπομπής όσο και την ελάχιστη ισχύ της μπαταρίας του κόμβου	Ο υπολογισμός της ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε επιβάρυνση του δικτύου	Χαμηλή	Όχι	Καλύτερη	Κανένα	Καλή
Sleep/Wake	Προσδιορίζει το σημείο συμφόρησης και επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου	Ο συγχρονισμός και ο προγραμματισμός επηρεάζουν τη συνολική επίδοση του συστήματος	Καλή	Όχι	Καλύτερη	Κανένα	Περιορισμένη

Πίνακας 3. Σύγκριση των ιεραρχικών πρωτοκόλλων.

2.6 Πρωτόκολλα Βασισμένα στο Μοντέλο Επικοινωνίας (Communication Model)

2.6.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα στα Ερωτήματα (Query-Based)

Στα πρωτόκολλα βασισμένα στα ερωτήματα, οι κόμβοι προορισμού διαδίδουν ένα ερώτημα για τα δεδομένα από έναν κόμβο του δικτύου και ο κόμβος που έχει αυτά τα δεδομένα στέλνει τα δεδομένα που ταιριάζουν με το ερώτημα πίσω στον κόμβο ο οποίος έχει ξεκινήσει το ερώτημα [84]. Αυτά τα ερωτήματα περιγράφονται συνήθως σε φυσική γλώσσα ή σε γλώσσες υψηλού επιπέδου. Για παράδειγμα, ο πελάτης C1 μπορεί να υποβάλει ένα ερώτημα στον κόμβο N1 και να ρωτήσει: υπάρχουν οχήματα που κινούνται στη μάχη στην περιοχή 1; Όλοι οι κόμβοι που έχουν στους πίνακες τους δεδομένα που ταιριάζουν με αυτό το ερώτημα τα στέλνουν στον κόμβο. Σε αυτό τον τύπο δρομολόγησης, ο σταθμός βάσης στέλνει μηνύματα ενδιαφέροντος στους αισθητήρες. Καθώς το μήνυμα διαδίδεται σε όλο το δίκτυο αισθητήρων, έχει συσταθεί η διαδρομή από την πηγή στην βάση. Όταν η πηγή έχει τα δεδομένα ενδιαφέροντος, η πηγή στέλνει τα δεδομένα κατά μήκος αυτής της πορείας ενδιαφέροντος. Για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας, γίνεται συνάθροιση των δεδομένων κατά την αποστολή.

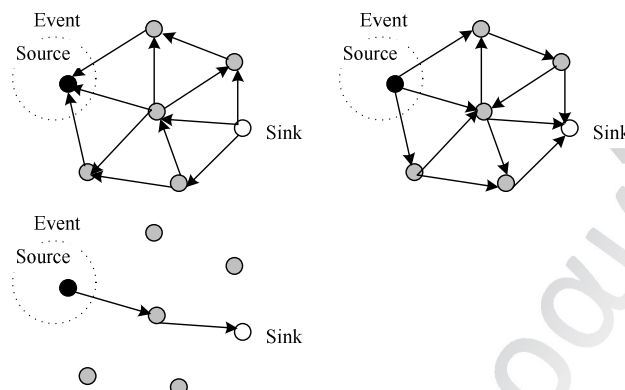
2.6.1.1 Το πρωτόκολλο Κατευθυνόμενης Διάχυσης (DD)

Στο DD όλοι οι κόμβοι έχουν επίγνωση της εφαρμογής [85]. Το DD μπορεί να επιλέξει εμπειρικά καλές διαδρομές και να χρησιμοποιήσει τις τεχνικές της γρήγορης μνήμης και της επεξεργασίας δεδομένων στο δίκτυο, προκειμένου να επιτύχει την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Το DD αποτελείται από διάφορα στοιχεία [85], όπως φαίνεται στο Σχήμα 9:

- *Ονομασία.* Οι εργασίες ονοματοδοτούνται χρησιμοποιώντας μια λίστα από ζεύγη χαρακτηριστικών. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να είναι το είδος των δεδομένων, το χρονικό διάστημα από τη διαβίβαση των στοιχείων, η διάρκεια κ.λπ.
- *Συμφέροντα και Κλήσεις.* Η περιγραφή των εργασιών καθορίζει πως τα δεδομένα ταιριάζουν με τα χαρακτηριστικά. Τα στοιχεία αυτά, που αποστέλλονται ως απάντηση στα ερωτήματα, ονοματίζονται χρησιμοποιώντας ένα παρόμοιο σχήμα ονοματοδοσίας. Οι κλήσεις δημιουργούνται στο πλαίσιο του δικτύου και έχουν σχεδιαστεί για να συντάσσουν “γεγονότα”, για παράδειγμα, στοιχεία που ταιριάζουν με τις απαιτήσεις ερωτημάτων. Κάθε κόμβος στο δίκτυο διατηρεί μνήμη cache. Κάθε στοιχείο στη μνήμη αντιστοιχεί σε ένα ξεχωριστό ερώτημα. Επίσης, η είσοδος ερωτημάτων περιέχει διάφορα πεδία κλήσης μέχρι ένα ανά γείτονα.
- *Διάδοση Δεδομένων.* Σε περίπτωση που ένας κόμβος αισθητήρας ανιχνεύει ένα στόχο, ψάχνει για τα δεδομένα στη μνήμη που αντιστοιχούν στο ερώτημα. Έτσι, εάν διαπιστώσει κάποια αντιστοιχία, υπολογίζει το υψηλότερο ποσοστό των ερωτημάτων που ζήτησε μεταξύ όλων των εξερχόμενων κλήσεων.
- *Ενίσχυση.* Οι εκδηλώσεις αρχίζουν να ρέουν προς τους δημιουργούς των συμφερόντων κατά μήκος πολλαπλών διαδρομών. Το δίκτυο αισθητήρων ενισχύει ένα, ή μικρό αριθμό από αυτά τα μονοπάτια.

Η αξιολόγηση και τα αποτελέσματα απόδοσης στο [85] δείχνουν ότι το DD έχει τη δυνατότητα για σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κόμβων και για παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Ακόμη και με την επιλογή μιας σχετικά μη βέλτιστης διαδρομής, υπερτερεί ένα ιδεατό παραδοσιακό σύστημα διάδοσης δεδομένων όπως η πολυεκπομπή. Επιπλέον, το DD είναι σταθερό.



Σχήμα 9. α) Διάδοση ενδιαφέροντος, β) Αρχικές κλήσεις, γ) Παράδοση δεδομένων κατά μήκος της διαδρομής [85]

2.6.1.2 Το πρωτόκολλο COUGAR

Το COUGAR βλέπει το δίκτυο ως ένα τεράστιο καταναμημένο σύστημα βάσεων δεδομένων [86]. Η βασική ιδέα είναι ότι χρησιμοποιεί δηλωτικά ερωτήματα προκειμένου να εξαγάγει την επεξεργασία ερωτήσεων από τις λειτουργίες του στρώματος δικτύου, όπως η επιλογή των σχετικών αισθητήρων. Το COUGAR χρησιμοποιεί συνάθροιση δεδομένων στο δίκτυο για μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Η συμπίεση υποστηρίζεται από ένα επιπλέον στρώμα ερωτημάτων. Αυτό το στρώμα βρίσκεται μεταξύ του επιπέδου δικτύου και εφαρμογής. Το COUGAR ενσωματώνει την αρχιτεκτονική του συστήματος της βάσης δεδομένων του αισθητήρα, όπου οι κόμβοι αισθητήρων επιλέγουν έναν επικεφαλής για την εκτέλεση της συνάθροισης και διαβιβάζουν τα δεδομένα στο σταθμό. Ο σταθμός είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία ενός σχεδίου ερωτήματος, το οποίο προσδιορίζει τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τη ροή των δεδομένων και δικτύου υπολογισμού για το εισερχόμενο ερώτημα και το στέλνει στους σχετικούς κόμβους. Το σχέδιο ερωτήματος περιγράφει επίσης την διαδικασία επιλογής του επικεφαλής για το ερώτημα. Η αρχιτεκτονική αυτή παρέχει στο δίκτυο την ικανότητα υπολογισμού και μπορεί να προσφέρει ενεργειακή απόδοση σε περιπτώσεις όπου τα παραγόμενα δεδομένα είναι τεράστια [87]. Το COUGAR παρέχει ανεξάρτητες μεθόδους στο επίπεδο δικτύου για την περιγραφή των δεδομένων του ερωτήματος.

Το κύριο πλεονέκτημα του COUGAR είναι ότι παρέχει ενεργειακή απόδοση όταν τα δεδομένα που παράγονται είναι τεράστια. Από την άλλη πλευρά, τα κύρια μειονεκτήματα του COUGAR είναι η επιβάρυνση του πρόσθετου στρώματος ερωτήματος για την κατανάλωση και την αποθήκευση, η πολυπλοκότητα του συγχρονισμού στο δίκτυο δεδομένων υπολογισμού και δυναμική διατήρηση των κόμβων επικεφαλής για να εμποδιστεί η αποτυχία ενός κόμβου.

2.6.1.3 Το πρωτόκολλο Ενεργούς Προώθησης Ερωτημάτων (ACQUIRE)

Το ACQUIRE είναι ένα πρωτόκολλο παρόμοιο με το COUGAR [88]. Το ACQUIRE βλέπει το δίκτυο ως μια καταναμημένη βάση δεδομένων, όπου τα σύνθετα ερωτήματα

μπορούν να διαιρεθούν περαιτέρω σε πολλά επιμέρους ερωτήματα. Ο σταθμός βάσης στέλνει ένα ερώτημα, το οποίο στη συνέχεια διαβιβάζεται από κάθε κόμβο που λαμβάνει το ερώτημα. Κατά τη διάρκεια αποστολής του ερωτήματος, κάθε κόμβος προσπαθεί να ανταποκριθεί στο ερώτημα εν μέρει με τη χρήση αποθηκευμένων πληροφοριών και στη συνέχεια το προωθεί σε ένα άλλο κόμβο. Εάν οι αποθηκευμένες πληροφορίες δεν είναι ενημερωμένες, οι κόμβοι συλλέγουν πληροφορίες από τους γείτονές τους. Μόλις το ερώτημα έχει επιλυθεί πλήρως, η απάντηση στέλνεται πίσω είτε μέσω της αντίστροφης διαδρομής ή μέσω της συντομότερης προς το σταθμό διδρομής. Ως εκ τούτου, το ACQUIRE μπορεί να διαχειριστεί πολύπλοκα ερωτήματα, επιτρέποντας σε πολλούς κόμβους να αποστείλουν τις απαντήσεις τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το DD δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύνθετα ερωτήματα σχετικά με ζητήματα ενέργειας γιατί χρησιμοποιεί ερωτήματα που βασίζονται στη Πλημμύρα για συνεχή και συνολικά ερωτήματα.

Το ACQUIRE είναι ιδανικό για σύνθετα ερωτήματα που μπορεί να απαντηθούν από πολλούς κόμβους. Παρέχει αποτελεσματικές απαντήσεις σε ερωτήματα ρυθμίζοντας την επιλογή των κόμβων.

Στον Πίνακα 4, περιγράφεται η σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα σε ερωτήματα. Έτσι, τα πρωτόκολλα DD και COUGAR επιλέγουν τη διαδρομή με τη λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, ενώ το ACQUIRE επιλέγει τη συντομότερη διαδρομή, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, τα DD και COUGAR μπορούν να υποστηρίξουν κάποια κινητικότητα των κόμβων. Επίσης, το DD είναι πιο επεκτάσιμο από τα COUGAR και ACQUIRE.

Τέλος, στα πρωτόκολλα βασισμένα στα ερωτήματα μπορούν εν μέρει να συμπεριληφθούν μερικά πρωτόκολλα, τα οποία ταξινομούνται και περιγράφονται αναλυτικά στις παρακάτω κατηγορίες. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι τα RR, SPIN-PP, SPIN-EK, SPIN-BN και SPIN-RL.

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Επεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Εύρεση Διαδρομής	Τύπος Περιοδικού Μηνύματος	Ευρωστία
DD	Επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου	Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνεχή παροχή δεδομένων	Καλή	Περιορισμένη	Καλύτερη	Ερωτήματα	Χαμηλή
COUGAR	Παρέχει υψηλή ενεργειακή απόδοση, όταν παράγονται πολλά δεδομένα	Επιβάρυνση, πολυπλοκότητα του συγχρονισμού των δεδομένων στο δίκτυο	Περιορισμένη	Όχι	Καλύτερη	Ερωτήματα	Χαμηλή
ACQUIRE	Είναι ιδανικό για μοναδιαία ερωτήματα και σύνθετα ερωτήματα τα οποία μπορεί να παρέχονται από πολλούς κόμβους	Πλημμύρα	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Ελάχιστο μονοπάτι	Ερωτήματα	Χαμηλή

Πίνακας 4. Σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα σε ερώτημα.

2.6.2 Συνεκτικά και μη-Συνεκτικά πρωτόκολλα (Coherent and Non-Coherent)

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται σε επίπεδο κόμβου. Οι κόμβοι κάνουν μια συλλογική προσπάθεια για την επεξεργασία των δεδομένων εντός του δικτύου. Ένας μηχανισμός δρομολόγησης που κινεί τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων, προτείνεται στο [89]. Ο μηχανισμός αυτός χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- *Συνεκτική επεξεργασία δεδομένων δρομολόγησης:* Αυτή η κατηγορία είναι ένας μηχανισμός ενεργειακής απόδοσης, όπου μόνο η ελάχιστη επεξεργασία γίνεται από τον κόμβο. Η χρονοσήμανση και η απαλοιφή των διπλότυπων μηνυμάτων είναι από τα καθήκοντα που επιτυγχάνονται από την ελάχιστη επεξεργασία. Μετά την ελάχιστη επεξεργασία, τα δεδομένα διαβιβάζονται στους συναθροιστές.
- *Μη Συνεκτική επεξεργασία δρομολόγησης [90]:* Σε αυτή την κατηγορία οι κόμβοι του δικτύου επεξεργάζονται τοπικά τα δεδομένα και στη συνέχεια τα στέλνουν σε άλλους κόμβους για περαιτέρω επεξεργασία. Οι κόμβοι που εκτελούν την περαιτέρω επεξεργασία ονομάζονται συναθροιστές. Υπάρχουν τρεις φάσεις της επεξεργασίας των δεδομένων: (α) η ανίχνευση δεδομένων, η συλλογή δεδομένων και προεπεξεργασία, (β) η δήλωση του μέλους, και (γ) η εκλογή του κεντρικού κόμβου. Στο στάδιο ανίχνευσης δεδομένων, ανιχνεύεται ένα συμβάν. Οι πληροφορίες συλλέγονται και γίνεται η απαραίτητη προεπεξεργασία. Στη φάση της δήλωσης των μελών, ο κόμβος επιλέγει να συμμετάσχει σε μια συνεταιριστική λειτουργία και δηλώνει την πρόθεσή του αυτή σε όλους τους γείτονες. Στην εκλογή κόμβου, επιλέγεται ένας κεντρικός κόμβος για να εκτελέσει μια εκλεπτυσμένη επεξεργασία πληροφοριών.

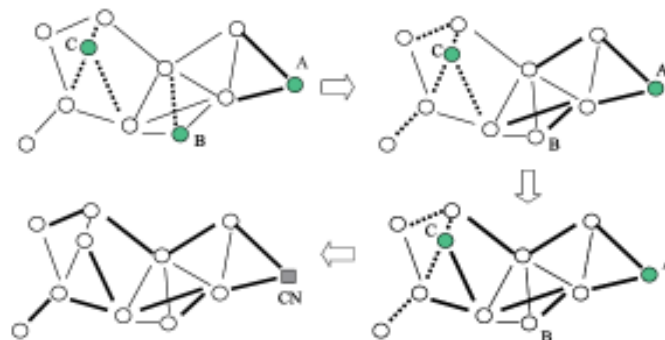
2.6.2.1 Το πρωτόκολλο του ενός Νικητή (SWE)

Στο SWE, εκλέγεται ένας κόμβος συνάθροισης για να επιτελέσει τη σύνθετη επεξεργασία [91]. Αυτός ο κόμβος είναι ο κεντρικός κόμβος και επιλέγεται με βάση τα ενεργειακά αποθέματα και την υπολογιστική ικανότητα του κόμβου. Για την επιλογή του κεντρικού κόμβου κάθε κόμβος μεταδίδει ένα μήνυμα και ανακοινώνει τον εαυτό του ως υποψήφιο κόμβο. Σε απάντηση προς την πρώτη ομάδα των μηνυμάτων επιλογής, οι κόμβοι που τα έχουν ήδη λάβει θα αρχίσουν τη σύγκριση των προτεινόμενων υποψηφίων κόμβων με τον εαυτό τους και θα στείλουν την δεύτερη παρτίδα μηνυμάτων επιλογής που έχουν το αποτέλεσμα αυτής της αρχικής σύγκρισης. Η δεύτερη παρτίδα του μηνύματος θα δημιουργήσει μια περαιτέρω ανταλλαγή μηνυμάτων. Το μήνυμα που παρουσιάζει τον καλύτερο υποψήφιο καταγράφεται στο μητρώο και, στη συνέχεια, μπορεί να διαβιβαστεί σε όλους τους γείτονες, διαφορετικά το μήνυμα απορρίπτεται.

Στο Σχήμα 10, παρουσιάζεται η συνεχής ανταλλαγή, η διαβίβαση και η απόρριψη των μηνυμάτων επιλογής, για να δείξει πώς οι πληροφορίες των επιλεγμένων υποψηφίων αποστέλλονται στο δίκτυο. Μαζί με αυτή τη διαδικασία διάχυσης, αυξάνεται σταδιακά ένα δέντρο που εκτείνεται από τις ρίζες προς τον επιλεγμένο υποψήφιο μέχρι να καλύψει πλήρως το δίκτυο.

2.6.2.2 Το πρωτόκολλο Πολλών Νικητών (MWE)

Στο MWE, προτείνεται μια επέκταση του SWE [91]. Όταν όλοι οι κόμβοι είναι πηγές και στέλνουν τα δεδομένα τους στον κεντρικό κόμβο καταναλώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Ως εκ τούτου, αυτή η διαδικασία έχει υψηλό κόστος. Το κόστος της ενέργειας μπορεί να είναι χαμηλότερο μόνο αν υπάρχει ένα όριο στον αριθμό των πηγών που μπορεί να στείλουν τα δεδομένα τους στον κεντρικό κόμβο συναθροιστή. Αντί να διατηρεί ένα μητρώο με τον καλύτερο μόνο υποψηφίο κόμβο, κάθε κόμβος κρατάει ένα αρχείο με έως n κόμβους υποψηφίων. Η διαδικασία του MWE κάνει κάθε αισθητήρα στο δίκτυο να έχει μια σειρά από μονοπάτια ελάχιστης ενέργειας σε κάθε κόμβο. Μετά από αυτό, χρησιμοποιείται το SWE για να βρει τον κόμβο που αποδίδει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Αυτός ο κόμβος μπορεί στη συνέχεια να χρησιμεύσει ως ο κεντρικός κόμβος για τη συνεκτική επεξεργασία.



Σχήμα 10. Η επιλογή κόμβου στο SWE [89].

Στον Πίνακα 5, παρουσιάζεται η σύγκριση των συνεκτικών και των μη συνεκτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Το SWE είναι πιο επεκτάσιμο από το MWE, ενώ το MWE υπολογίζει μια σειρά από μονοπάτια ελάχιστης ενέργειας σε κάθε κόμβο.

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Επεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Εύρεση Διαδρομής	Τύπος Περιοδικού Μηνύματος	Ευρωστία
<i>SWE</i>	Κτίζει ένα δέντρο ελάχιστων βημάτων που επεκτείνεται	Πρόκειται για ένα σύνθετο πρωτόκολλο	Καλή	Όχι	Σύντομη	Αποστολή μηνύματος	Χαμηλή
<i>MWE</i>	Κάθε κόμβος στο δίκτυο έχει μια σειρά από διαδρομές ελάχιστης ενέργειας σε κάθε κόμβο πηγής	Μεγάλη καθυστέρηση και χαμηλή επεκτασιμότητα	Χαμηλή	Όχι	Σύντομη	Αποστολή μηνύματος	Χαμηλή

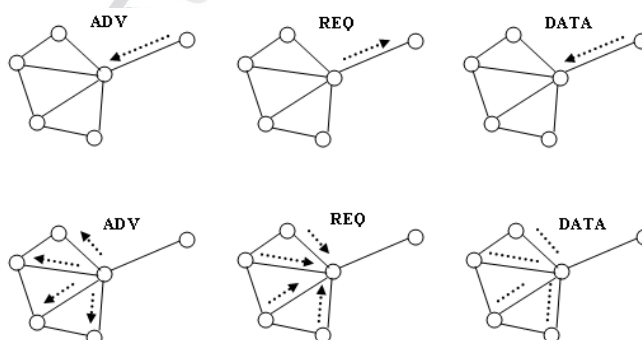
Πίνακας 5. Σύγκριση συνεκτικών και μη συνεκτικών πρωτοκόλλων.

2.6.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Διαπραγμάτευση (Negotiation-Based)

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία είναι βασισμένα στην διαπραγμάτευση (SPIN) αποτελούν μια ομάδα πρώιμων έργων για κεντρικοποιημένη δρομολόγηση. Η οικογένεια των πρωτοκόλλων SPIN βασίζεται σε δύο βασικές ιδέες [92].

- Πρώτον, για να λειτουργεί αποτελεσματικά και να εξοικονομεί ενέργεια το πρωτόκολλο, οι κόμβοι πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους σχετικά με τα δεδομένα που έχουν ήδη και τα δεδομένα που πρέπει να λάβουν.
- Δεύτερον, οι κόμβοι σε ένα δίκτυο πρέπει να παρακολουθούν και να προσαρμόζονται σε αλλαγές στους ενεργειακούς πόρους τους ώστε να παρατείνουν τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

Η κύρια ιδέα του SPIN είναι ο χαρακτηρισμός των δεδομένων χρησιμοποιώντας περιγραφείς υψηλού επιπέδου ή μετά-δεδομένα [93]. Χρησιμοποιούν μετά-δεδομένα για τη μείωση των περιττών μεταδόσεων στο δίκτυο. Ως εκ τούτου, αν ένας κόμβος έχει κάποια δεδομένα, πρώτα απ' όλα, τα διαφημίζει με την αποστολή ενός πακέτου διαφήμισης (ADV) στους άλλους κόμβους και αν κάποιος κόμβος που λάβει το διαφημιζόμενο πακέτο ενδιαφέρεται για τα δεδομένα τότε στέλνει ένα πακέτο αιτήματος (REQ) και κατά τη λήψη του πακέτου αίτησης (DATA) ο κόμβος στέλνει τα πραγματικά δεδομένα (Σχήμα 11). Έτσι το SPIN είναι ένα πρωτόκολλο τριών σταδίων, ADV, REQ και DATA. Το SPIN παρέχει επεκτασιμότητα με την έννοια ότι κάθε κόμβος πρέπει να γνωρίζει μόνο τους γείτονές του, έτσι ώστε, οποιεσδήποτε αλλαγές στην τοπολογία να είναι τοπικές. Το πρόβλημα με το SPIN είναι ότι δεν εγγυάται την παράδοση των δεδομένων, όταν ένας ενδιαφερόμενος κόμβος είναι πολύ μακριά από τον διαφημιζόμενο, οι ενδιαφερόμενοι κόμβοι δεν θα πάρουν όλα τα δεδομένα, εάν οι κόμβοι μεταξύ αυτών των δύο κόμβων δεν ενδιαφέρονται για τα δεδομένα.



Σχήμα 11. Το πρωτόκολλο Spin και τα πακέτα ADV, REQ και DATA [92].

Στην οικογένεια με τα πρωτόκολλα SPIN ανήκουν τα ακόλουθα:

2.6.3.1 Το πρωτόκολλο Επικοινωνίας από άκρο σε άκρο (SPIN-PP)

Το πρωτόκολλο αυτό έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί άριστα σε μια από-άκρο-σε-άκρο επικοινωνία [94]. Στο SPIN-PP, δύο κόμβοι μπορούν να έχουν αποκλειστική επικοινωνία μεταξύ τους χωρίς καμία παρέμβαση από τους άλλους κόμβους. Έτσι, το κόστος της επικοινωνίας ενός κόμβου να επικοινωνεί με n κόμβους είναι n φορές πιο

ακριβό από την επικοινωνία με έναν κόμβο. Αυτό το πρωτόκολλο είναι ένα απλό πρωτόκολλο τριπλής χειραψίας και το κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι η ενέργεια δεν θεωρείται εμπόδιο για την επικοινωνία. Όταν ένας κόμβος έχει κάποια νέα δεδομένα, τα διαφημίζει χρησιμοποιώντας μηνύματα ADV με τους γείτονές του. Μόλις ένας γειτονικός κόμβος λάβει αυτή τη διαφήμιση, ελέγχει τα μετά-δεδομένα για να δει αν έχει ήδη τα στοιχεία δεδομένων ή όχι. Αν δεν τα έχει, στέλνει ένα μήνυμα REQ ζητώντας πίσω το στοιχείο δεδομένων. Ο αρχικός κόμβος που θα λάβει το μήνυμα REQ θα στείλει τα μηνύματα DATA που περιέχουν τα δεδομένα που λείπουν στον κόμβο.

Τα πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου αυτού είναι η απλότητά του, η αποφυγή κατάρρευσης και το ελάχιστο κόστος εκκίνησης. Τα μειονεκτήματά του είναι ότι δεν εγγυάται την παράδοση των δεδομένων και ότι καταναλώνει περιττή ενέργεια.

2.6.3.2 Το πρωτόκολλο SPIN για Εξοικονόμηση Ενέργειας (SPIN-EC)

Σε αυτό το πρωτόκολλο, οι κόμβοι του δικτύου επικοινωνούν χρησιμοποιώντας το ίδιο πρωτόκολλο τριπλής χειραψίας όπως στο SPIN-PP, αλλά λαμβάνεται υπόψη η ενεργειακή κατανάλωση για την μεταφορά των δεδομένων [94]. Εάν ένας κόμβος λάβει μια διαφήμιση, δεν θα στείλει μήνυμα REQ αν δεν έχει αρκετή ενέργεια για να μεταδώσει το μήνυμα REQ και να λάβει το αντίστοιχο μήνυμα DATA.

Οι ιδιότητες του SPIN-EC μπορεί να συνοψιστούν ως εξής [95]:

- Προσθέτει ένα μηχανισμό ενεργειακής διατήρησης στο πρωτόκολλο SPIN-PP.
- Όταν η ενέργεια είναι άφθονη, το SPIN-EC ενεργεί ως πρωτόκολλο SPIN-PP.
- Κάθε φορά που η ενέργεια έρχεται κοντά στο όριο χαμηλής ενέργειας, προσαρμόζεται με τη μείωση της συμμετοχής του.
- Ο κόμβος θα συμμετάσχει στο πλήρες πρωτόκολλο, εάν έχει αρκετή ενέργεια για να ολοκληρώσει το πρωτόκολλο, χωρίς να φθάσει κάτω από κάποιο όριο.
- Δεν εμποδίζει τους κόμβους από τη λήψη μηνυμάτων, όπως ADV ή REQ κάτω από το όριο χαμηλής ενέργειας, αλλά εμποδίζει τους κόμβους να χειριστούν ένα μήνυμα DATA κάτω από κάποιο όριο.

2.6.3.3 Το πρωτόκολλο SPIN για Δίκτυα Εκπομπής (SPIN-BC)

Το πρωτόκολλο αυτό έχει σχεδιαστεί για δίκτυα εκπομπής στα οποία οι κόμβοι χρησιμοποιούν ένα ενιαίο κοινόχρηστο κανάλι για να επικοινωνούν [94]. Σε αυτό το πρωτόκολλο, ένας κόμβος στέλνει ένα μήνυμα και το παραλαμβάνουν όλοι οι άλλοι κόμβοι μέσα σε ένα ορισμένο εύρος του αποστολέα. Ένας κόμβος ο οποίος έχει λάβει ένα μήνυμα ADV δεν αντιδρά άμεσα με ένα μήνυμα REQ, αλλά περιμένει για κάποιο χρονικό διάστημα πριν από την αποστολή του μηνύματος REQ. Σε περίπτωση που ένας διαφορετικός κόμβος λάβει το μήνυμα REQ, ακυρώνει το δικό του αίτημα, προκειμένου να αποφεύγονται περιττές αιτήσεις για το ίδιο μήνυμα. Αφού ο κόμβος λάβει ένα μήνυμα REQ, στέλνει το μήνυμα δεδομένων μόνο μια φορά γιατί είναι ένα δίκτυο εκπομπής, ακόμη και αν έχει πολλαπλές αιτήσεις για το ίδιο μήνυμα.

Το SPIN-BC είναι καλύτερο από το SPIN-PP για δίκτυα εκπομπής, χρησιμοποιώντας φθηνή, ένας-προς-πολλούς επικοινωνία, πράγμα που σημαίνει ότι όλα τα μηνύματα αποστέλλονται σε μια διεύθυνση εκπομπής και επεξεργασίας από όλους τους κόμβους που βρίσκονται εντός της εμβέλειας μετάδοσης του αποστολέα.

2.6.3.4 Το πρωτόκολλο SPIN για Αξιοπιστία (SPIN-RL)

Το πρωτόκολλο αυτό κάνει δύο αλλαγές στο πρωτόκολλο SPIN-BC [94]. Κατ' αρχάς κάθε κόμβος SPIN-RL, παρακολουθεί ποιες διαφημίσεις ακούει και από ποιο κόμβο και αν δεν λάβει τα δεδομένα μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, στέλνει την αίτηση ξανά. Το σημαντικό σημείο του πρωτοκόλλου αυτού είναι ότι οι κόμβοι έχουν ένα όριο σχετικά με τη συχνότητα με την οποία ξαναστέλνουν τα μηνύματα δεδομένων. Αφού ένας κόμβος έχει στείλει ένα μήνυμα δεδομένων, θα περιμένει για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα πριν ανταποκριθεί σε άλλες αιτήσεις για το ίδιο μήνυμα δεδομένων.

Το SPIN-RL είναι μια αξιόπιστη έκδοση του SPIN-BC το οποίο διαδίδει τα δεδομένα μέσω ενός δικτύου μετάδοσης, ακόμη και στις περιπτώσεις που ένα δίκτυο χάνει πακέτα ή έχει ασύμμετρη επικοινωνία.

Στον Πίνακα 6, παρουσιάζεται η σύγκριση των πρωτοκόλλων που βασίζονται στην διαπραγμάτευση. Τα πρωτόκολλα SPIN-PP, SPIN-EC, SPIN-BC και SPIN-RL υποστηρίζουν κινητικότητα των κόμβων, ενώ όλα αυτά τα πρωτόκολλα επικοινωνούν με τους γείτονές τους μόνο σε περίπτωση που έχουν δεδομένα προς αποστολή, για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που δαπανάται σε περιοδικά μηνύματα. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα SPIN-PP, SPIN-EC, SPIN-BC και SPIN-RL είναι επεκτάσιμα και εύρωστα και η απόδοσή τους είναι ίδια για διαφορετικά μεγέθη δικτύου.

Τέλος, στα πρωτόκολλα βασισμένα στην διαπραγμάτευση μπορούν εν μέρει να συμπεριληφθούν μερικά πρωτόκολλα, τα οποία ταξινομούνται και περιγράφονται αναλυτικά στις κατηγορίες παρακάτω. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι τα VGA και SAR.

2.6.4 Σύγκριση των Βασισμένων στα Ερωτήματα Πρωτοκόλλων με τα Βασισμένα στην Διαπραγμάτευση Πρωτόκολλα και τα Συνεκτικά ή μη Συνεκτικά Πρωτόκολλα

Στο DD, ο πρώτος κόμβος στο δίκτυο μένει από ενέργεια σε 90sec και όλοι οι κόμβοι του δικτύου σε 200sec. Από την άλλη πλευρά, το COUGAR έχει αποτελεσματικό σχέδιο ερωτήματος για το δίκτυο επεξεργασίας ερωτημάτων, το οποίο μπορεί να μειώσει κατά πολύ τη χρήση των πόρων και, συνεπώς, επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου [86].

Το ACQUIRE, για ένα πολύ μικρό συντελεστή απόσβεσης c ($0,001 \leq c \leq 0,01$), έχει βέλτιστη απόδοση ($d = 10$). Από την άλλη πλευρά, για $0,08 \leq c \leq 0,9$, η πλέον ενεργειακά αποδοτική στρατηγική είναι να ζητήσει μόνο πληροφορίες από τους άμεσους γείτονές του ($d = 1$). Τα αποτελέσματα επίσης δείχνουν ότι υπάρχουν τιμές του c στο εύρος από $[0,001, 0,1]$ τέτοιο ώστε καθένα από τα 1, 2 ... 10 είναι η βέλτιστη τιμή πρόβλεψης [88].

Το MWE, έχει μεγαλύτερη καθυστέρηση και χαμηλότερη επεκτασιμότητα από ότι ένα μη-συνεκτικό δίκτυο επεξεργασίας [91].

Επιπλέον, το SPIN χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια από ότι η Πλημμύρα με αναλογία παράδοσης μέχρι 95%. Ο μέσος χρόνος καθυστέρησης στο SPIN-PP και στο SPIN-EK είναι 17msec και 16msec αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, η μέση ενέργεια που καταναλώνεται από το SPIN-BC και το SPIN-RL είναι 0.004J [94].

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Ελεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Εύρεση Διαδρομής	Τύπος Περιοδικού Μηνύματος	Ευρωστία
SPIN-PP	Απλότητα, αποφυγή κατάρρευσης και ελάχιστο κόστος εκκίνησης	Δεν εγγυάται την παράδοση των δεδομένων και καταναλώνει περιττή ενέργεια	Καλή	Ναι	Επιλογή του κοντινού γείτονα	Αποστολή μηνύματος	Καλή
SPIN-EC	Όποτε η ενέργεια έρχεται κοντά στο χαμηλό όριο, προσαρμόζεται με τη μείωση της συμμετοχής του	Δεν εμποδίζει τους κόμβους από τη λήψη μηνυμάτων, όπως των μηνυμάτων ADV και REQ κάτω από το χαμηλό όριο ενέργειας	Καλή	Ναι	Επιλογή του κοντινού γείτονα	Αποστολή μηνύματος	Καλή
SPIN-BC	Είναι καλύτερο από το SPIN-PP σε δίκτυα εκπομπής	Θα πρέπει να περιμένει για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα πριν από την αποστολή του μηνύματος REQ	Καλή	Ναι	Επιλογή του κοντινού γείτονα	Αποστολή μηνύματος	Καλή
SPIN-RL	Αποστέλλει δεδομένα μέσω δικτύων εκπομπής, ακόμη και στις περιπτώσεις που ένα δίκτυο χάνει πακέτα	Χρονοβόρο	Καλή	Ναι	Επιλογή του κοντινού γείτονα	Αποστολή μηνύματος	Καλή

Πίνακας 6. Σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα στην διαπραγμάτευση.

2.7 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοπολογία του Δικτύου (Topology Based)

2.7.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Θέση (Location-Based)

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα βασικά πρωτόκολλα τα οποία είναι βασισμένα στη θέση και οι μέθοδοι που προτείνονται για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αυτό το είδος των πρωτοκόλλων υπολογίζει την επίδραση της απόστασης και την κατανομή των κόμβων σε περιοχές που θεωρούνται σημαντικές για την απόδοση του δικτύου.

Τα πρωτόκολλα βασισμένα στην θέση εφαρμόζουν δύο βασικές παραδοχές:

- Κάθε κόμβος γνωρίζει τις θέσεις των γειτονικών του κόμβων στο δίκτυο.
- Η πηγή του μηνύματος πρέπει να ενημερωθεί για τη θέση του προορισμού.

Τα πρωτόκολλα για την τοπική μετάδοση των ερωτημάτων σε δίκτυα αισθητήρων κάνουν χρήση του υπάρχοντος δέντρου δρομολόγησης και δεν δημιουργούν πρόσθετα κανάλια επικοινωνίας. Αυτοί οι αλγόριθμοι απαιτούν οι κόμβοι να μεταδίδουν περιοδικά μηνύματα επιτρέποντας στους γείτονές τους να γνωρίζουν τις θέσεις τους. Το πρωτόκολλα αυτά είναι πολύ ενδιαφέροντα διότι λειτουργούν χωρίς πίνακες δρομολόγησης. Επιπλέον, τη στιγμή που η θέση του προορισμού είναι γνωστή, όλες οι λειτουργίες γίνονται τοπικά, δηλαδή, κάθε κόμβος πρέπει να παρακολουθεί μόνο τους άμεσους γείτονές του.

Τα κύρια μειονεκτήματα αυτών των πρωτοκόλλων είναι:

- Η απόδοση εξαρτάται από την εξισορρόπηση της γεωγραφικής κατανομής σε σχέση με την εμφάνιση της κίνησης.
- Κάθε εξάρτηση της απόδοσης με το φορτίο της κίνησης μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση του δικτύου.

2.7.1.1 Το πρωτόκολλο Απόστασης Δρομολόγησης για Κινητούς Κόμβους (DREAM)

Το DREAM είναι ένα προληπτικό πρωτόκολλο στο οποίο κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα για την θέση όλων των άλλων κόμβων στο δίκτυο [96]. Για να διατηρήσει τον πίνακα αυτό, κάθε κόμβος απαιτεί την αποστολή πακέτων θέσης στον κοντινό του κόμβο με μία δεδομένη συχνότητα και σε κάποια άλλη συχνότητα για τους μακρινούς κόμβους. Οι μακρινοί κόμβοι φαίνεται να κινούνται πιο αργά από ότι οι κοντινοί, έτσι δεν είναι απαραίτητο να διατηρεί ενημερωμένες πληροφορίες για την θέση των μακρινών κόμβων. Με τη διαφοροποίηση μεταξύ κοντινών και μακρινών κόμβων, το DREAM προσπαθεί να περιορίσει την επιβάρυνση των πακέτων θέσης.

Σε περίπτωση που ένας κόμβος S πρέπει να στείλει ένα μήνυμα m σε έναν παραλήπτη R , αναφέρεται στον πίνακα θέσης του προκειμένου να ανακτηθούν πληροφορίες για τη θέση του. Μετά από αυτό, ο S επιλέγει μεταξύ των γειτόνων του κόμβων που βρίσκονται στην κατεύθυνση του R και προς τα εμπρός από αυτούς. Αυτό επαναλαμβάνεται για κάθε ένα από αυτούς τους κόμβους, προωθώντας το μήνυμα σε εκείνους τους κόμβους στην κατεύθυνση του R μέχρις ότου φτάσει το μήνυμα στον R . Είναι, επομένως, σημαντικό να επιλέγει τους γείτονες ενός δεδομένου κόμβου σε ένα

συγκεκριμένο εύρος κατεύθυνσης κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εγγυημένο ότι το R μπορεί να βρεθεί με μία δεδομένη πιθανότητα p , $0 < p < 1$, ακολουθώντας διαδρομές προς αυτή την κατεύθυνση.

Το πλεονέκτημά του είναι ότι η μετάδοση των πακέτων δεδομένων είναι αποτελεσματική δεδομένου ότι είναι πάντα διαθέσιμη μια διαδρομή από άκρο σε άκρο, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι μικρή. Το μειονέκτημά του είναι η σπατάλη του εύρους ζώνης του δικτύου.

2.7.1.2 Το πρωτόκολλο Επίγνωσης της Θέσης και της Ενέργειας (GEAR)

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρωτόκολλα, το GEAR δεν χρησιμοποιεί άπληστους αλγόριθμους για να προωθήσει το πακέτο στον προορισμό [97]. Το GEAR χρησιμοποιεί την ενέργεια για να ενημερώσει τους γείτονες για την δρομολόγηση ενός πακέτου προς την περιοχή στόχο.

Δύο κύρια χαρακτηριστικά αυτού του πρωτοκόλλου είναι τα ακόλουθα:

- Όταν υπάρχει κοντινός γείτονας στον προορισμό, το GEAR επιλέγει τον κόμβο μεταξύ των γειτόνων που είναι πιο κοντά στον προορισμό του.
- Όταν όλοι οι γείτονες είναι μακριά, το GEAR επιλέγει τον κόμβο που ελαχιστοποιεί το κόστος του γείτονα.

Το κύριο πλεονέκτημα του GEAR είναι ότι κάθε κόμβος γνωρίζει τη θέση και το υπολειπόμενο επίπεδο της ενέργειάς του, τις θέσεις του και τα υπόλοιπα των επιπέδων ενέργειας των γειτονικών κόμβων. Επίσης προσπαθεί να εξισορροπήσει την κατανάλωση ενέργειας και, ως εκ τούτου, να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

2.7.1.3 Το πρωτόκολλο Γραφικής Ενσωμάτωσης Δρομολόγησης (GEM)

Το GEM είναι ένα πρωτόκολλο βασισμένο στην θέση που προσπαθεί να εκχωρήσει ετικέτες στους κόμβους αισθητήρων με κατανομημένο τρόπο [98]. Οι κόμβοι δρομολογούν τα μηνύματα γνωρίζοντας μόνο τις ετικέτες των άμεσων γειτόνων τους. Στο GEM, χρησιμοποιούνται οι εικονικές συντεταγμένες αντί των πραγματικών φυσικών συντεταγμένων.

Ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο συστατικά τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- *Οι εικονικές συντεταγμένες διαστήματος (VPCS)*. Το πρώτο βήμα για την κατασκευή του VPCS, είναι η δημιουργία ενός δέντρου. Για να δημιουργήσει το γενετικό δένδρο, πρέπει να οριστεί ένας κόμβος ρίζα. Μετά από αυτό, σε κάθε κόμβο έχει εκχωρηθεί ένα εύρος γωνίας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκχωρήσει τις γωνίες για τα υπό-δέντρα. Κάθε κόμβος χωρίζει το εύρος γωνίας για τα παιδιά του με βάση το μέγεθος του υπό-δέντρου του κάθε παιδιού. Για κάθε υπό-δέντρο υπολογίζονται και διαδίδονται στην ρίζα του δέντρου το κέντρο της μάζας και η μέση θέση όλων των κόμβων.
- *Οι εικονικές συντεταγμένες δρομολόγησης (VPCR)*. Το VPCR δρομολογεί πακέτα από κάθε κόμβο σε οποιοδήποτε σημείο του VPCS. Ένα σημείο ορίζεται από το επίπεδο και τη γωνία.

Το κύριο πλεονέκτημα του GEM είναι ότι επιτρέπει στα μηνύματα να δρομολογούνται αποτελεσματικά μέσω του δικτύου, ενώ κάθε κόμβος πρέπει να ξέρει μόνο τις ετικέτες των γειτόνων του. Επίσης, είναι εύρωστο για δυναμικά δίκτυα, λειτουργεί καλά σε κενά δίκτυα και σε δίκτυα με εμπόδια και προσαρμόζεται στο μέγεθος και την πυκνότητα του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, επιβαρύνει τους κόμβους που βρίσκονται στα χαμηλά επίπεδα του δέντρου.

2.7.1.4 Το πρωτόκολλο Σιωπηρής Γεωγραφικής Προώθησης (IGF)

Στα πρωτόκολλα βασισμένα στην τοπολογία, η δρομολόγηση εξαρτάται από τους ενημερωμένους πίνακες δρομολόγησης [99]. Σε αντίθεση, το IGF επιτρέπει σε έναν αποστολέα να καθορίσει τα επόμενα βήματα ενός πακέτου σε πραγματικό χρόνο. Με τον καθορισμό της διεύθυνσης, το IGF γίνεται ένα πρωτόκολλο το οποίο δεν εξαρτάται από τη γνώση της τοπολογίας του δικτύου ή την παρουσία/απουσία άλλων κόμβων. Αυτό το χαρακτηριστικό του είναι πολύτιμο για εξαιρετικά δυναμικά δίκτυα αισθητήρων, υποστηρίζει ανοχή σε σφάλματα και κάνει το πρωτόκολλο ισχυρό σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, το πρωτόκολλο αυτό μπορεί να εξαλείψει δαπανηρές επικοινωνίες που θα απαιτούνταν διαφορετικά για τη διατήρηση των πληροφοριών για την κατάσταση των κόμβων. Επιπλέον, το πρωτόκολλο αυτό ενισχύει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, ενσωματώνοντας την αύξηση της απόστασης προς τον προορισμό (idTD) και την ενέργεια που απομένει (ER) στη διαδικασία επιλογής διαδρομής.

Οι ιδιότητες του IGF συνοψίζονται ως εξής:

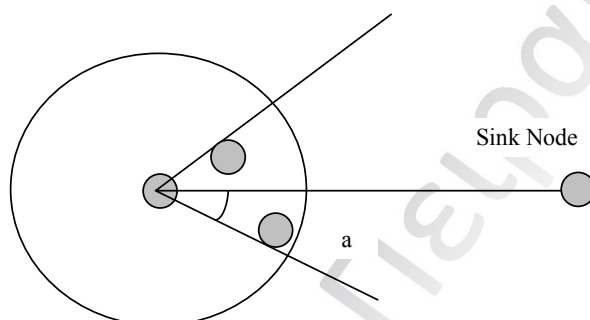
- Είναι αποδοτικότερο όταν οι κόμβοι μετακινούνται ή μεταβαίνουν από και προς την κατάσταση αδράνειας.
- Μικρότερη απο-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση σχέση με τα συστήματα που πρέπει να ενημερώνουν την κατάσταση του συστήματος πριν από την αποστολή.
- Η γνώση της απόστασης και της ενέργειας προώθησης.
- Η κατανομή του φόρτου εργασίας.
- Η αποσύνδεση της δρομολόγησης από τα πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας.

Στο [99], παρουσιάζεται η προσομοίωση του εν λόγω πρωτοκόλλου, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Το σενάριο που εξετάζεται είναι οι πολλαπλές ροές όπου το ποσοστό της αδράνειας στους κόμβους ορίζεται σε 33% για ποικίλες περιόδους εναλλαγής. Το IGF λειτουργεί καλά από την άποψη της διατήρησης της ενέργειας, όταν η περίοδος εναλλαγής είναι κάτω των 18 δευτερολέπτων.

2.7.1.5 Το πρωτόκολλο Ενεργειακής Απόδοσης Τοποθεσίας (SELAR)

Το SELAR συνδυάζει την κατανάλωση ενέργειας με τις πληροφορίες θέσης με σκοπό τη δρομολόγηση των πακέτων [100]. Το πρώτο βήμα του πρωτοκόλλου αυτού είναι ο σταθμός βάσης να ενημερώσει τους κόμβους για τη θέση του. Μετά από αυτό, όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο ενημερώνουν κάθε γειτονικό κόμβο για τη θέση και την ενέργειά τους. Μπορούν επίσης να ενημερώσουν και για τη θέση του σταθμού. Μετά από αυτή την αρχική ανταλλαγή των πληροφοριών, πρέπει οι κόμβοι να ενημερώνονται μόνο για την ενέργεια των γειτονικών τους κόμβων καθώς το δίκτυο είναι στατικό.

Για να μπορεί αυτό το πρωτόκολλο να εξοικονομήσει ενέργεια, τα πακέτα ελέγχου στέλνονται ένα βήμα. Επιπλέον, τα πακέτα δεδομένων αποστέλλονται από μεμονωμένους κόμβους που υπολογίζουν τους υποψήφιους γείτονες στη ζώνη προώθησής τους, η οποία ζώνη είναι η περιοχή που σχηματίζεται από τη γωνία προς την κατεύθυνση του σταθμού και την περιοχή κάλυψης του κόμβου αποστολής (Σχήμα 12). Ο κόμβος θέτει αρχικά τη γωνία a της ζώνης \min_alpha (15°) και την αυξάνει σε βήματα μέχρι να βρεθεί ένας αριθμός γειτονικών κόμβων ή μέχρις ότου η γωνία φθάσει σε μία μέγιστη τιμή που μπορεί να είναι για παράδειγμα (90°), ώστε να βεβαιωθεί ότι το πακέτο δεδομένων διαβιβάζεται πάντοτε στην κατεύθυνση του σταθμού. Σε περίπτωση που κανένας υποψήφιος κόμβος δεν βρίσκεται στη ζώνη προώθησης, τότε το SELAR χρησιμοποιεί το Κουτσομπολιό, προκειμένου να ανακαλύψει μια διαδρομή, καθιστώντας το πιο ισχυρό.



Σχήμα 12. Το μοντέλο διάδοσης των πακέτων δεδομένων [100].

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι μεταξύ των διαθέσιμων υποψήφιων κόμβων στη ζώνη προώθησης επιλέγει τον κόμβο με το υψηλότερο επίπεδο ενέργειας ώστε να παρέχει μία ομοιόμορφη διάχυση της ενέργειας. Ωστόσο, ο αλγόριθμος αυτός δεν λειτουργεί καλά στην περίπτωση ενός δικτύου που οι κόμβοι συχνά αλλάζουν θέση.

2.7.1.6 Το πρωτόκολλο Άπληστου Κατανεμημένου Δέντρου (GDSTR)

Το GDSTR μπορεί να βρει τη συντομότερη διαδρομή και παράγει χαμηλή κίνηση για την διατήρηση αυτής [101]. Η κύρια συνεισφορά του πρωτοκόλλου αυτού είναι ο ορισμός του δέντρου το οποίο είναι ένα hull-tree. Ένα hull-tree είναι ένα γενετικό δέντρο όπου κάθε κόμβος έχει ένα σχετικό κυρτό που περιέχει τις θέσεις όλων των απόγονων του στο δέντρο. Το Hull-tree είναι χτισμένο με τη συγκέντρωση των πληροφοριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποφυγή μονοπατιών που δεν είναι αποδοτικά.

Το κύριο μειονέκτημα του GDSTR σε σύγκριση με τα άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι το ότι δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα των τοπικών αδιεξόδων. Οι περισσότεροι από τους υπάρχοντες αλγορίθμους δρομολόγησης σχεδιάζουν το γράφημα συνδεσιμότητας κόμβων και στη συνέχεια χρησιμοποιούν τον κανόνα του δεξιού χεριού στην διαδρομή, προκειμένου να χειριστούν τα αδιέξοδα. Το GDSTR χειρίζεται αυτή την κατάσταση με διαφορετικό τρόπο με την αλλαγή αντί για δρομολόγηση σε ένα γενετικό δέντρο μέχρι να φτάσει σε ένα σημείο όπου η άπληστη διαβίβαση μπορεί να κάνει και πάλι πρόοδο. Για να επιλέξει μια κατεύθυνση για το δέντρο που είναι πιο πιθανό να σημειωθεί πρόοδος προς τον προορισμό, κάθε κόμβος του GDSTR διατηρεί μια περίληψη της περιοχής που καλύπτεται από το υπό-δέντρο σε κάθε ένα από τους γείτονές του.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του GDSTR είναι ότι επιτυγχάνει μικρότερη διαδρομή και είναι απλούστερο και πιο εύκολο να εφαρμοστεί. Ενώ το GDSTR απαιτεί μόνο ένα δέντρο για την ορθότητα, χρησιμοποιεί ευρωστία για να δώσει μια επιπλέον επιλογή προώθησης.

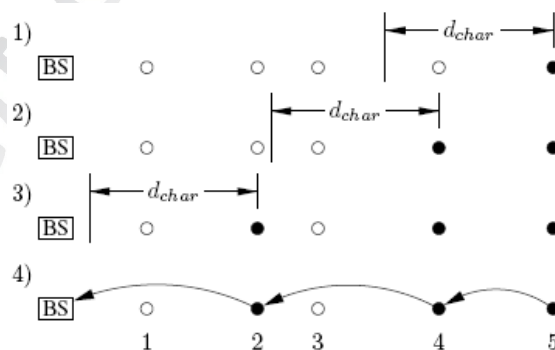
2.7.1.7 Το πρωτόκολλο Ελάχιστης Ενέργειας Τοποθεσίας (MERR)

Το MERR βασίζεται στην ιδέα ότι η απόσταση μεταξύ δύο κόμβων που μεταδίδουν είναι πολύ σημαντική [102]. Αυτή η απόσταση είναι στενά συνδεδεμένη με την ενέργεια που καταναλώνεται για ολόκληρη τη διαδρομή από την πηγή προς τον σταθμό βάσης, η οποία περιέχει, σε ορισμένες περιπτώσεις, μεγάλο αριθμό κόμβων. Έτσι, κάθε αισθητήρας στο MERR επιδιώκει σε τοπικό επίπεδο την επιλογή του κόμβου του οποίου η απόσταση είναι πιο κοντά στην χαρακτηριστική απόσταση.

Μόλις ένας αισθητήρας έχει αποφασίσει να χρησιμοποιήσει το επόμενο βήμα, ρυθμίζει την ισχύ μετάδοσής του στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο, έτσι ώστε το σήμα να μπορεί να ληφθεί μόνο από τον αντίστοιχο κόμβο. Αυτό μπορεί να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας. Αν οι αποστάσεις μεταξύ κάθε ζεύγους αισθητήρων είναι μεγαλύτερες από την χαρακτηριστική απόσταση, κάθε αισθητήρας θα επιλέξει τον άμεσο γείτονά του ως τον επόμενο κόμβο.

Παρουσιάζουμε ένα παράδειγμα για την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής δρομολόγησης στο Σχήμα 13. Το πρώτο βήμα αυτού του πρωτοκόλλου (1, 2 και 3 στο σχήμα) είναι να επιλέξει το 4, 2, και το σταθμό βάσης. Η προκύπτουσα διαδρομή $5 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow \text{BS}$ προσεγγίζει τη βέλτιστη και χρησιμοποιείται στο βήμα 4 για μεταφορά των δεδομένων από τον αισθητήρα 5 προς τον σταθμό βάσης.

Το MERR λειτουργεί καλά σε περίπτωση που οι αισθητήρες αναπτύσσονται σε γραμμική τοπολογία και στέλνουν δεδομένα σε ένα μόνο κέντρο ελέγχου. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι διανέμει την κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων ομοιόμορφα στους αισθητήρες του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, ελαχιστοποιώντας την ενέργεια μετάδοσης σημαίνει ότι επιλέγεται ο πλησιέστερος γείτονας ως δρομολογητής. Έτσι, χάνεται μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε περίπτωση που οι κόμβοι τυχαίνει να είναι πολύ κοντά.



Σχήμα 13. Η επιλογή της βέλτιστης διαδρομής δρομολόγησης [102].

2.7.1.8 Το πρωτόκολλο Γεωγραφικής Αντιδραστικής Προώθησης (OGF)

Το OGF είναι ένα πρωτόκολλο διαστρωματικό που χρησιμοποιεί συγκεκριμένη τεχνική για τη δημιουργία ενός μονοπατιού [103]. Σε περίπτωση που ο αποστολέας πρέπει να στείλει ένα πακέτο, ενημερώνεται από τον πίνακα δρομολόγησης, προκειμένου να μάθει αν υπάρχει μια καταχώριση προς τον κόμβο προορισμού του.

Εάν είναι διαθέσιμες οι πληροφορίες για το επόμενο βήμα, ο κόμβος πηγή αποστέλλει το πακέτο στον επόμενο κόμβο. Από την άλλη πλευρά, αν δεν υπάρχει διαθέσιμη καταχώρηση, ο αποστολέας ξεκινά τη δημιουργία του μονοπατιού για τον επόμενο αισθητήρα. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει αισθητήρας που να βρίσκεται στην περιοχή προώθησης, τότε ο αποστολέας αρχίζει την διαδικασία επιλογής του κόμβου. Σε αντίθετη περίπτωση, επιλέγεται ένας γειτονικός κόμβος να λάβει το πακέτο δεδομένων από τον αποστολέα. Ο αποστολέας ενημερώνει τον πίνακα δρομολόγησης εισάγοντας μια νέα εγγραφή μετά την επιτυχή αποστολή των πακέτων δεδομένων. Η λειτουργία αυτού του πρωτοκόλλου βασίζεται στις πραγματικές απαιτήσεις της εφαρμογής, στην κυκλοφορία των δεδομένων και στη δυναμική του δικτύου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο [103] δείχνουν ότι το OGF παρουσιάζει μια ανώτερη απόδοση όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, την επεκτασιμότητα και την ευρωστία. Επιπλέον, το OGF είναι αποτελεσματικό στην παροχή στοιχείων σε συγκεκριμένα δίκτυα αισθητήρων.

2.7.1.9 Το πρωτόκολλο Μερικής Τμηματοποίησης για Αποφυγή Γεωγραφικής Δρομολόγησης (PAGER-M)

Το PAGER-M χρησιμοποιεί τις πληροφορίες θέσης των αισθητήρων και του σταθμού βάσης για να ορίσει μια συνάρτηση κόστους σε κάθε κόμβο, που είναι κοντά στην Ευκλείδεια απόσταση της συντομότερης διαδρομής ενός κόμβου στο σταθμό [104]. Ένα πακέτο προωθείται στο σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας την άπληστη προώθηση όποτε είναι δυνατόν [105]. Η άπληστη προώθηση μπορεί να αποτύχει σε ένα κόμβο που δεν έχει γείτονα κοντά στο σταθμό βάσης. Για να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση, όταν ένα πακέτο φτάνει σε κόμβους κοντά σε ένα κοίλο κόμβο, το πακέτο προωθείται σε έναν γείτονα ακολουθώντας τον κανόνα από υψηλό κόστος σε χαμηλό κόστος. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο [104] δείχνουν ότι το PAGER-M επιτυγχάνει υψηλή αναλογία παράδοσης, χαμηλή επιβάρυνση δρομολόγησης και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η ενεργειακή απόδοση του PAGER-M προέρχεται από το χαμηλό κόστος ελέγχου και το μικρό μήκος της διαδρομής. Αυτή η ενεργειακή αποδοτικότητα του PAGER-M αποδεικνύει ότι είναι κατάλληλο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με κινητούς κόμβους. Από την άλλη πλευρά, το PAGER-M δεν απαιτεί ένας κόμβο να απομνημονεύσει την προηγούμενη κυκλοφορία/διαδρομή. Με αυτή την έννοια, είναι ένα πρωτόκολλο που δεν βασίζεται σε προηγούμενα στοιχεία για την επιλογή διαδρομής.

2.7.1.10 Το πρωτόκολλο Υβριδικής Γεωγραφικής Δρομολόγησης (HGR)

Στο [106], προτείνεται ένα νέο υβριδικό πρωτόκολλο δρομολόγησης το HGR που συνδυάζει τις στρατηγικές απόστασης και κατεύθυνσης με ευέλικτο τρόπο. Σε αυτό το πρωτόκολλο, η κύρια λειτουργία ενός κόμβου είναι να ορίσει την προτεραιότητα ως το επόμενο βήμα. Η προτεραιότητα αυτή ορίζεται ως Q_i . Όσο μεγαλύτερη είναι η προβλεπόμενη πρόοδος του κόμβου i τόσο μεγαλύτερο γίνεται το Q_i , ενώ όσο μικρότερη είναι η γωνία απόκλισης μεταξύ της γραμμής που συνδέει το z με το i και η γραμμή που συνδέει το z με το j , το Q_i γίνεται μεγαλύτερο. Μπορεί να οριστούν διαφορετικές μορφές του Q_i ώστε να συνδυάζουν τα κριτήρια δρομολόγησης της απόστασης και της κατεύθυνσης.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης δείχνει ότι το HGR μπορεί να επιτύχει λόγο παράδοσης που στις περισσότερες περιπτώσεις φτάνει το 100% και χαμηλή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο.

Επιπλέον, υπάρχουν και άλλα πρωτόκολλα βασισμένα στη θέση εκτός από το ανωτέρω που έχουν προταθεί για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [107, 108, 109, 110, 111].

Στον Πίνακα 7, παρουσιάζεται η σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα στην θέση. Ως εκ τούτου, τα DREAM, IGF, PAGER-M και HGR μπορούν να υποστηρίξουν κινητικότητα των κόμβων, ενώ ταυτόχρονα κρατούν την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων σε χαμηλά επίπεδα. Επιπλέον, τα GEM και GDSTR προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων, επιλέγοντας τη συντομότερη διαδρομή για να δρομολογήσουν τις πληροφορίες. Από την άλλη πλευρά, τα GEM, IGF, MERR, OGF και HGR προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας δεν χρησιμοποιούν περιοδικά μηνύματα. Επιπλέον, τα GEM, OGF, PAGER-M και HGR είναι πιο επεκτάσιμα από τα άλλα πρωτόκολλα.

Τέλος, στα πρωτόκολλα βασισμένα στην θέση μπορεί εν μέρει να συμπεριληφθούν μερικά πρωτόκολλα, τα οποία κυρίως ταξινομούνται και περιγράφονται αναλυτικά στις κατηγορίες παρακάτω. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι τα TTDD, COUGAR και ACQUIRE.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Επεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Εύρεση Διαδρομής	Τύπος Περιοδικού Μηνύματος	Ευρωστία
DREAM	Αποτελεσματική μετάδοση πακέτων δεδομένων	Η σπατάλη του εύρους ζώνης του δικτύου	Περιορισμένη	Ναι	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Αποστολή μηνύματος	Περιορισμένη
GEAR	Επιχειρεί να εξισορροπήσει την κατανάλωση ενέργειας και έτσι αυξάνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου	Η περιοδική ανταλλαγή του πίνακα δρομολόγησης	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Καλύτερο μονοπάτι	Αποστολή μηνύματος	Καλή
GEM	Επιτρέπει τα μηνύματα να δρομολογούνται αποτελεσματικά μέσω του δικτύου, ενώ κάθε κόμβος πρέπει μόνο να ξέρει τις ετικέτες των γειτόνων του	Επιβαρύνει τους κόμβους που βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα του δέντρου	Καλή	Περιορισμένη	Συντομότερο μονοπάτι	Όχι	Καλή
IGF	Υψηλή απόδοση, κατανομή του φόρτου εργασίας	Εξαρτάται από τους τοπικούς πίνακες δρομολόγησης	Περιορισμένη	Ναι	Καλύτερο μονοπάτι	Όχι	Καλή
SELAR	Επιλέγει τον κόμβο με το υψηλότερο επίπεδο ενέργειας, ώστε να παρέχει μια ομοιόμορφη διάχυση της ενέργειας	Δεν λειτουργεί καλά στην περίπτωση ενός δικτύου του οποίου οι κόμβοι αλλάζουν θέση συχνά	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Αποστολή μηνύματος	Καλή
GDSTR	Βρίσκει την συντομότερη διαδρομή και παράγει χαμηλή κίνηση συντήρησης	Επιβάρυνση στο δίκτυο	Περιορισμένη	Όχι	Συντομότερο μονοπάτι	Αποστολή μηνύματος	Καλή
MERR	Διανέμει την κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων ομοιόμορφα στους αισθητήρες του δικτύου	Σπατάλη ενέργειας σε περίπτωση που οι κόμβοι είναι κοντά	Περιορισμένη	Χαμηλή	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Όχι	Καλή
OGF	Παρουσιάζει ανώτερη απόδοση όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και την επεκτασιμότητα	Εξαρτάται από τους τοπικούς πίνακες δρομολόγησης	Καλή	Περιορισμένη	Καλύτερο μονοπάτι	Όχι	Καλή
PAGER-M	Επιτυγχάνει υψηλή ποσοστό παράδοσης, χαμηλή επιβάρυνση δρομολόγησης και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας	Εξαρτάται από την θέση των κόμβων	Καλή	Ναι	Συντομότερο μονοπάτι	Αποστολή μηνύματος	Καλή
HGR	Συνδυάζει την απόσταση και τις στρατηγικές κατεύθυνσης	Δεν εγγυάται την καθυστέρηση	Καλή	Ναι	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Όχι	Καλή

Πίνακας 7. Σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα στη θέση.

2.7.2 Πρωτόκολλα Βασισμένα σε Κινητούς Πράκτορες (Mobile Agent-based Protocols)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα ειδικά χαρακτηριστικά των εφαρμογών στα δίκτυα αισθητήρων απαιτούν από τους κόμβους να έχουν πολλαπλές δυνατότητες. Έτσι, δεν είναι πρακτικό οι αισθητήρες να αποθηκεύουν όλα τα προγράμματα που απαιτούνται στην τοπική μνήμη και να τρέχουν κάθε πιθανή εφαρμογή, λόγω των αυστηρών περιορισμών μνήμης.

Ένας από τους κύριους τομείς της έρευνας, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η σχεδίαση, η ανάπτυξη και η εγκατάσταση των συστημάτων κινητών πρακτόρων [112]. Τα συστήματα κινητών πρακτόρων έχουν ως κύριο συστατικό ένα κινητό μέσο, λογισμικό ή πρόγραμμα, το οποίο κινείται μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου για να εκτελέσει μια εργασία αυτόνομα και έξυπνα, με βάση τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Τα κινητά συστήματα πρακτόρων χρησιμοποιούν κωδικούς θέσης ώστε να διευκολύνουν την ευέλικτη εφαρμογή, την τοπική επεξεργασία και τη συνεργατική σήματος και επεξεργασίας πληροφοριών. Αυτό παρέχει στο δίκτυο επιπλέον ευελιξία, καθώς και νέες δυνατότητες σε αντίθεση με τις συμβατικές λειτουργίες των WSN που βασίζονται στο μοντέλο που πελάτη-εξυπηρετητή.

Ο σχεδιασμός των κινητών πρακτόρων και η ανάπτυξη πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την δρομολόγηση δεδομένων από την ανιχνευόμενη περιοχή προς τον προορισμό είναι ένας πραγματικά ενδιαφέρον τομέας. Στο [112], παρουσιάζονται τα ζητήματα σχεδιασμού των κινητών πρακτόρων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ο σχεδιασμός του πράκτορα μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα:

- *Αρχιτεκτονική.* Η αρχιτεκτονική αυτή βασίζεται στην τοπολογία του δικτύου και διαιρείται περαιτέρω σε επίπεδη ή ιεραρχική.
- *Σχεδιασμός Διαδρομής.* Η διαδρομή είναι ο δρόμος που ακολουθείται κατά τη μετακίνηση των κινητών πρακτόρων. Ο σχεδιασμός της διαδρομής σχετίζεται με την επιλογή του συνόλου των κόμβων πηγής που είναι επισκέψιμοι από τον κινητό πράκτορα και τον προσδιορισμό της αλληλουχίας επίσκεψης της πηγής για εξοικονόμηση ενέργειας. Ο σχεδιασμός διαδρομής χωρίζεται σε στατικό, δυναμικό και υβριδικό.
- *Σχεδιασμός του Συστήματος Μεσισμικού.* Οι κινητοί πράκτορες συχνά εφαρμόζονται ως μεσισμικοί. Οι μεσισμικοί χρησιμοποιούνται για να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ του λειτουργικού συστήματος και των συστατικών υψηλού επιπέδου και για να διευκολύνουν την ανάπτυξη και την εξάπλωση των εφαρμογών.
- *Συνεργασία Πρακτόρων.* Οι κινητοί πράκτορες μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως μεμονωμένες μονάδες επεξεργασίας είτε ως μονάδες καταμεμημένης συλλογής των στοιχείων. Η απαίτηση να παρέχουν τα μέσα για τη συνεργασία πρακτόρων είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο σχεδιασμό για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εφαρμογή των συστημάτων κινητών πρακτόρων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης του εύρους ζώνης. Η μετακίνηση των στοιχείων επεξεργασίας των δεδομένων προς τη θέση των στοιχείων που ανιχνεύονται μπορεί να μειώσει τις ενεργειακές δαπάνες των κόμβων. Ωστόσο, η εξεύρεση της βέλτιστης διαδρομής είναι πρόβλημα NP-hard και

για το λόγο αυτό είναι σε εξέλιξη πολλές προσπάθειες για την εύρεση κατάλληλων αλγορίθμων.

2.7.2.1 Το πρωτόκολλο Πολλαπλών Πρακτόρων που βασίζεται στο Σχεδιασμό Διαδρομής (MIP)

Στο [113], παρουσιάζεται ένα πρωτόκολλο με πολλαπλούς πράκτορες (MIP). Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν αναπτυχθεί χρησιμοποιούν ένα πράκτορα (SIP). Ωστόσο, η χρήση πρωτοκόλλων SIP σε ένα δίκτυο μεγάλης κλίμακας μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή καθυστέρηση και ασύμμετρο φορτίο. Έτσι, είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί ένα πρωτόκολλο με πολλαπλούς πράκτορες για καλύτερα αποτελέσματα.

Η βασική ιδέα του πρωτοκόλλου που προτείνεται στο [113] είναι η διανομή ενός συντελεστή επιπτώσεων σε κάθε κόμβο. Για παράδειγμα, θεωρώντας n τον αριθμό πηγής, τότε κάθε πηγή θα λάβει $n-1$ στοιχεία από τους άλλους κόμβους και ένα από τον ίδιο. Μετά από αυτό υπολογίζεται ο συσσωρευμένος παράγοντας επιρροής και επιλέγει τη θέση της πηγής με τον μεγαλύτερο συσσωρευμένο παράγοντα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποδεικνύουν ότι η κατανάλωση ενέργειας του αλγορίθμου MIP είναι υψηλότερη από τον SIP σε περίπτωση που ο αριθμός πηγής είναι μικρός. Ωστόσο, ο αλγόριθμος αυτός έχει σχεδιαστεί για χρήση όταν ο αριθμός πηγής είναι μεγάλος. Έτσι, με βάση τα αποτελέσματα, όταν ο αριθμός πηγής είναι 40, η κατανάλωση ενέργειας του MIP είναι πολύ καλύτερη από αυτή του SIP.

2.7.2.2 Τα Πρωτόκολλα Ελάχιστης Ενέργειας Διαδρομής για την Επιλογή της Πρώτης Πηγής (IEMF) και Ελάχιστης Ενέργειας Διαδρομής (IEMA)

Στο [114], παρουσιάζεται το πρωτόκολλο IEMF. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το IEMA, μια επαναληπτική έκδοση του IEMF.

Στο IEMF η πρώτη δραστηριότητα είναι να επιλεγεί μια αυθαίρετη πηγή κόμβος v ως $S [1]$ και το υπόλοιπο σύνολο θεωρείται ως $V - \{v\}$. Το επόμενο βήμα είναι να διαμορφώσει το v ως αφετηρία για τον καθορισμό της διαδρομής για τους $n-1$ κόμβους $V - \{v\}$ με την επίσκεψη με τη σειρά για τους υπόλοιπους $n-1$ κόμβους. Στην συνέχεια προσπαθεί να ακολουθήσει το σύνολο της διαδρομής με σειρά, ξεκινώντας από το σταθμό. Έτσι, κάθε πηγή V επιλέγεται ως $S [1]$ και η διαδρομή του καθορίζεται. Τέλος, το IEMF επιλέγει την διαδρομή που έχει το ελάχιστο κόστος ενέργειας.

Ωστόσο, το IEMA, εκτός από την επιλογή του $S [1]$, επιδιώκει να βελτιστοποιήσει το υπόλοιπο δρομολόγιο σε ορισμένο βαθμό.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απέδειξαν ότι το IEMF παρέχει υψηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ μπορεί να επιτύχει ποσοστό παράδοσης μέχρι 90%. Ωστόσο, ο περιορισμός της χρησιμοποιήσεως ενός ενιαίου παράγοντα για να εκτελέσει όλο το έργο κάνει το πρωτόκολλο απρόσιτο με μεγάλο αριθμό κόμβων πηγής που θα επισκεφτεί.

Στον Πίνακα 8, παρουσιάζεται η σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα σε κινητούς πράκτορες. Τα IEMF/IEMA έχουν περιορισμένη επεκτασιμότητα και απόδοση που μειώνεται καθώς ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται. Από την άλλη πλευρά, το MIP καταναλώνει λιγότερη ενέργεια, όταν ο αριθμός των κόμβων του δικτύου αυξάνεται.

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Επεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Εύρεση Διαδρομής	Τύπος Περιοδικού Μηνύματος	Ευρωστία
<i>MIP</i>	Μπορεί να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια, όταν ο αριθμός των κόμβων του δικτύου είναι μεγάλος	Υψηλή καθυστέρηση	Περιορισμένη	Ναι	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Κανένα	Καλή
<i>IEMF/IEMA</i>	Επιδιώκει να βελτιστοποιήσει το υπόλοιπο δρομολόγιο σε ορισμένο βαθμό	Απρόσιτο με μεγάλο αριθμό κόμβων πηγής	Περιορισμένη	Ναι	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Κανένα	Καλή

Πίνακας 8. Σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα σε κινητούς πράκτορες.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

2.7.3 Σύγκριση των Πρωτοκόλλων Βασισμένα στη Θέση με αυτά Βασισμένα σε Κινητούς Πράκτορες

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο [96] δείχνουν ότι το DREAM υπερτερεί των WRP και TORA από την άποψη της μέσης κατανάλωσης ενέργειας. Έχει ένα ποσοστό παράδοσης έως και 80% και μια καθυστέρηση από-άκρο-σε-άκρο μέχρι 50msec. Επιπλέον, το SELAR υπερτερεί των Flooding, Gossiping και DREAM από την άποψη της διάρκειας ζωής του δικτύου και του ποσοστού της παράδοσης των δεδομένων. Το SELAR είναι σε θέση να παραδώσει από 2,5 έως και 4 φορές περισσότερα πακέτα σε σχέση με το Flooding [100].

Επίσης, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο [102] δείχνουν ότι το MERR επιτυγχάνει εξοικονόμηση ενέργειας έως και 80% σε σύγκριση με την δρομολόγηση μεταφοράς ελάχιστης ενέργειας και μπορεί να παραδώσει τα πακέτα σε ποσοστό έως 95%. Ωστόσο, το αποτέλεσμα της προσομοίωσης στο [101] δείχνει ότι το GDSTR αποστέλλει τα πακέτα κατά μήκος της μικρότερης διαδρομής και είναι πιθανό να παραδώσει τα πακέτα γρηγορότερα και με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, αυτό μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη διάρκεια της ζωής του δικτύου.

Το IGF μπορεί να παραδώσει τα πακέτα με ένα ποσοστό κοντά στο 100% [99]. Το IGF έχει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, όταν η περίοδος εναλλαγής αδράνειας/λειτουργίας είναι κάτω των 18 δευτερολέπτων. Ωστόσο, το OGF υπερτερεί του IGF όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας [103]. Το OGF έχει κατά μέσο όρο κατανάλωση ενέργειας μέχρι 0.005J. Μπορεί να παραδώσει περισσότερο από το 90% των πακέτων, ακόμη και κάτω από υψηλό ποσοστό αποτυχίας των κόμβων (όπως 0,6).

Το PAGER-M επιτυγχάνει ένα μέσο ποσοστό παράδοσης μεγαλύτερο από 99% με διάστημα ενημέρωσης 3-4 δευτερόλεπτα [104]. Το PAGER-M διαθέτει μέση κατανάλωση ενέργειας μέχρι 10 msec. Η μέγιστη χρήση της ενέργειας μεταξύ όλων των κόμβων είναι 57.44mJ για τη αποστολή. Επίσης, ο ρυθμός αποστολής είναι ~ 250 bits/sec, γεγονός που αποδεικνύει τις εξαιρετικά χαμηλές απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης δεδομένων των δικτύων.

Το GEAR είναι πιο αποτελεσματικό από το Flooding [97]. Επιτυγχάνει την εξισορρόπηση ενέργειας με τη λήψη εναλλακτικής διαδρομής. Ως εκ τούτου, δεν αποτελεί έκπληξη το ότι αυξάνει το μήκος της διαδρομής από 25% έως 45% για όλα τα πακέτα που παραδίδονται. Επίσης, στο GEM οι ενεργοί κόμβοι του δικτύου είναι 500 από 0-6000 πακέτα που αποστέλλονται και φτάνει από 0-7500 πακέτα [98].

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο [103] δείχνουν ότι, εάν ο αριθμός της πηγής είναι 40, η κατανάλωση ενέργειας του MIP είναι πολύ καλύτερη από αυτή του SIP. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο [104] έδειξαν ότι το IEMF παρέχει υψηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ μπορεί να επιτύχει ποσοστό παράδοσης μέχρι 90%.

2.8 Αξιόπιστα Πρωτόκολλα Δρομολόγησης (Reliable Routing)

2.8.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα σε Πολλαπλές Διαδρομές (Multipath Based)

Η δρομολόγηση μέσω πολλαπλών διαδρομών είναι μια ενδιαφέρουσα μέθοδος για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η δρομολόγηση πολλαπλών διαδρομών έχει το πλεονέκτημα ότι επιτυγχάνει την εξισορρόπηση του φορτίου και είναι πιο ανθεκτική σε αστοχίες της διαδρομής [115]. Υπάρχουν πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία και η αξιολόγηση των επιδόσεων τους αποδεικνύει ότι έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλότερου φορτίου δρομολόγησης, την χαμηλότερη καθυστέρηση από-άκρο-σε-άκρο και την αποφυγή συμφόρησης σε σύγκριση με τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μιας μόνο διαδρομής.

2.8.1.1 Το πρωτόκολλο Δρομολόγησης Αντιδραστικών Ακυκλών Πολλαπλών Διαδρομών (ROAM)

Το ROAM είναι ένα πρωτόκολλο αντιδραστικό [116]. Χρησιμοποιεί μια έννοια που ονομάζεται εφικτή απόσταση για να διατηρήσει τις διαδρομές. Το ROAM ανιχνεύει χωρίσματα στο δίκτυο, απαιτώντας από τους κόμβους να στέλνουν μηνύματα ενημέρωσης στους γειτονικούς τους κόμβους κάθε φορά που υπάρχει αλλαγή στην απόσταση σε έναν συγκεκριμένο προορισμό.

Στο ROAM, κάθε δρομολογητής διατηρεί έναν πίνακα απόστασης, έναν πίνακα δρομολόγησης και έναν πίνακα κόστους. Ο πίνακας απόστασης είναι ένας πίνακας που περιέχει την απόσταση μεταξύ δύο γειτόνων σε έναν δρομολογητή. Ο πίνακας δρομολόγησης είναι ένα διάνυσμα στήλης που περιέχει, για κάθε προορισμό, την απόσταση από τον κόμβο προορισμού, την εφικτή απόσταση, την απόσταση που αναφέρθηκε, τον επόμενο κόμβο, την προέλευση της σημαίας ερώτημα και τη σήμανση. Ο πίνακας κόστους απαριθμεί τις δαπάνες των συνδέσεων σε κάθε γνωστό γείτονα. Όταν ένας δρομολογητής παραλάβει ένα πακέτο δεδομένων που πρόκειται να παραδοθεί σε ένα προορισμό για τον οποίο δεν έχει καμία καταχώρηση στον πίνακα δρομολόγησης του, ξεκινά την αναζήτηση. Η αναζήτησης διαδίδεται από την πηγή με βάση ένα βήμα, μέχρι να φτάσει σε έναν δρομολογητή που έχει το ζητούμενο προορισμό. Ο δρομολογητής απαντά με την απόστασή του από αυτό. Στο τέλος της έρευνας, η πηγή αποκτά μία πεπερασμένη απόσταση προς τον προορισμό. Αν δεν υπάρχει η διαδρομή προς τον προορισμό όλοι οι κόμβοι στην ίδια διαδρομή καθορίζουν ότι ο προορισμός είναι απρόσιτος.

Το ROAM ενημερώνει τους δρομολογητές όταν ένας προορισμός είναι απρόσιτος και αποτρέπει τους δρομολογητές από την περιττή αποστολή πακέτων αναζήτηση, προκειμένου να βρει μονοπάτια σε ένα απρόσιτο προορισμό. Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος απαιτεί τις ανταλλαγές πληροφοριών κατάστασης μεταξύ των κόμβων, είναι πιο κατάλληλο για χρήση σε στατικά δίκτυα ή σε δίκτυα με περιορισμένη κινητικότητα. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι πρέπει να στέλνει περιοδική ενημέρωση προκειμένου να ενημερωθούν σχετικά οι ενεργοί κόμβοι.

2.8.1.2 Το Πρωτόκολλο Ετικέτας Πολλαπλής Δρομολόγησης (LMR)

Το LMR αποστέλλει ένα μήνυμα ελέγχου σε όλο το δίκτυο για μια πιθανή εναλλακτική διαδρομή [117]. Κατά τη διαδικασία αυτή, ανατίθενται ετικέτες στα μονοπάτια που περνάει το μήνυμα. Οι πληροφορίες της ετικέτας χρησιμοποιούνται για την εφεδρική αναζήτηση διαδρομής, εάν μια διαδρομή δεν είναι εφικτή. Το LMR έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται μόνο η τοπική πληροφορία για να βρίσκονται ασύνδετα μονοπάτια ή τμήματα για να προστατεύσει την πορεία εργασίας. Με μια πλημμύρα το LMR μπορεί να βρει εναλλακτικά μονοπάτια ή περισσότερα τμήματα για να προστατεύσει την πορεία της εργασίας.

Στο LMR, οι κόμβοι μεταδίδουν ένα μήνυμα ετικέτας στους γείτονές τους. Τόσο τα μηνύματα ενίσχυσης όσο και τα μηνύματα ετικέτας, θα λάβουν ένα ακέραιο αριθμό, που ονομάζεται ετικέτα. Η αξία της ετικέτας αυξάνεται κατά 1 σε κάθε κόμβο εργασίας ο οποίος στη συνέχεια μεταδίδει με ένα νέο μήνυμα ετικέτας. Κάθε κόμβος εργασίας πρέπει να θυμάται την τιμή της ετικέτας. Τα μηνύματα ετικέτας διαβιβάζονται προς την πηγή κατά μήκος όλων των διαδρομών που θα περάσουν τα διερευνητικά μηνύματα δεδομένων. Ένας κόμβος που λαμβάνει δύο ή περισσότερα μηνύματα ετικέτας θα διαβιβάσει το ένα μόνο με τη μικρότερη τιμή ετικέτας. Η ιδέα είναι να αποσταλεί το μήνυμα ετικέτας από τον κόμβο όσο το δυνατόν περισσότερο πιο κοντά στο σταθμό, έτσι ώστε τα ασύνδετα μονοπάτια να είναι δυνατό να βρεθούν. Οι κόμβοι που εργάζονται δεν διαβιβάσει τα μηνύματα ετικέτας από κάθε άλλο κόμβο. Κάθε κόμβος πρέπει να θυμάται όλες τις ετικέτες που έχει δει και τους γείτονες από τους οποίους αυτές προέρχονται. Εάν ένας κόμβος λαμβάνει πολλά μηνύματα ετικέτας με την ίδια τιμή από διάφορους γείτονες, θα καταγραφεί μόνο το πρώτο για να βρει τη συντομότερη διαδρομή. Οι πληροφορίες της ετικέτας μπορεί να μειώσουν τα γενικά έξοδα δρομολόγησης και την καθυστέρηση εγκατάστασης ενός νέου μονοπατιού. Ωστόσο, για να βρούμε τις πιθανές εναλλακτικές διαδρομές, το LMR αναλαμβάνει γενικά ένα μήνυμα ετικέτας, και μια ετικέτα για να ενισχύει το μήνυμα.

2.8.1.3 Το πρωτόκολλο Μετάδοσης Κλήσης (GRAB)

Το GRAB έχει σχεδιαστεί ειδικά για την καλή παράδοση δεδομένων, προκειμένου να ασχοληθεί με αναξιόπιστους κόμβους και να αποτρέψει τυχαίες αποτυχίες των ασύρματων συνδέσεων [118]. Κτίζει και διατηρεί ένα πεδίο κόστους με διαφήμιση (ADV) πακέτων στο δίκτυο. Μόλις ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο ADV που περιέχει το κόστος του αποστολέα, υπολογίζει το κόστος του προσθέτοντας το κόστος σύνδεσης μεταξύ του ίδιου και του αποστολέα και διαφημίζει το κόστος στον αποστολέα. Συγκρίνει το κόστος που έχει ήδη και θέτει το νέο κόστος ως το μικρότερο από τα δύο. Όταν αποκτά κόστος μικρότερο από το παλιό, μεταδίδει ένα πακέτο ADV που περιέχει το νέο κόστος. Το GRAB ελέγχει το εύρος ζώνης από το ποσό της κίνησης που μεταφέρεται σε κάθε μήνυμα δεδομένων, επιτρέποντας στον αποστολέα να ρυθμίσει την ευρωστία της παράδοσης των δεδομένων.

Το πλεονέκτημα του GRAB είναι ότι βασίζεται στις συλλογικές προσπάθειες των πολλαπλών κόμβων για την παροχή δεδομένων, χωρίς την εξάρτηση από οποιοδήποτε μεμονωμένες μονάδες και είναι πραγματικά ισχυρό. Από την άλλη πλευρά, μπορεί να έχει γενικά την αποστολή πλεοναζόντων δεδομένων.

2.8.1.4 Το πρωτόκολλο Ιεραρχικής Πολλαπλής Διαδρομής (HMRP)

Το HMRP χρησιμοποιεί μια ιεραρχική αντίληψη για να κατασκευάσει ένα ολόκληρο δίκτυο αισθητήρων [119]. Κάθε κόμβος αισθητήρων χρειάζεται απλά να μεταδώσει το πακέτο μία φορά και να διατηρήσει το δικό του πίνακα δρομολόγησης (CIT). Όταν ένας κόμβος διαδίδει ένα πακέτο δεδομένων, θα πρέπει να ξέρει μόνο ποιος είναι ο γονέας κόμβος για τη μεταφορά, χωρίς να διατηρήσει το σύνολο της πληροφορίας για τη διαδρομή. Αυτό μπορεί να μειώσει την επιβάρυνση του κόμβου. Το HMRP πρέπει να υπολογίσει την πληροφορία για την εγγραφή στο CIT του κόμβου, η ενεργειακή δαπάνη είναι μικρότερη από την μετάδοση και την λήψη. Επιπλέον, υποστηρίζει την προώθηση δεδομένων σε πολλαπλές διαδρομές, χωρίς τη χρήση σταθερής διαδρομής. Η κατανάλωση ενέργειας θα διανεμηθεί και η διάρκεια ζωής του δικτύου θα είναι παρατεταμένη. Τέλος, μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλούς κόμβους σταθμούς.

Το HMRP έχει πολλές υποψήφιες διαδρομές για τη διάδοση των πακέτων δεδομένων στο σταθμό. Ο μηχανισμός συνάθροισης δεδομένων λειτουργεί σε κάθε κόμβο, εκτός από τους κόμβους που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Το προτεινόμενο σύστημα έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τους ακόλουθους στόχους:

- *Ευελιξία.* Η περιοχή ανίχνευσης μπορεί να περιλαμβάνει εκατοντάδες ή για χιλιάδες κόμβους. Το HMRP θα μπορούσε να είναι κατάλληλο για μικρή ή μεγάλη ακτίνα ανίχνευσης, δεδομένου ότι η επιβάρυνση της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων είναι πολύ χαμηλή.
- *Απλότητα.* Οι κόμβοι έχουν περιορισμένη υπολογιστική ικανότητα και πόρους μνήμης. Ως εκ τούτου, αυτή η προσέγγιση επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των λειτουργιών που εκτελούνται, και των καταστάσεων που διατηρούνται στους κόμβους, οι οποίοι διατηρούν πίνακες πληροφοριών υποψήφιων γονέων για να προσδιοριστεί η διαδρομή δρομολόγησης.
- *Διάρκεια ζωής του συστήματος.* Τα δίκτυα αυτά πρέπει να λειτουργούν για όσο το δυνατόν περισσότερο, η επαναφόρτιση της μπαταρίας των κόμβων μπορεί να είναι δύσκολη ή αδύνατη. Ως εκ τούτου, υιοθετούνται η συνάθροιση των δεδομένων και η ενεργειακή κατανάλωση για να μειώσει τον αριθμό των μηνυμάτων και να επεκταθεί η διάρκεια ζωής.

2.8.1.5 Το Πρωτόκολλο Βασισμένο σε Συμπλέγματα Πολλαπλής Δρομολόγησης (CBMPR)

Το CBMPR συνδυάζει την ιεραρχική δομή και την δρομολόγηση πολλαπλής διαδρομής [120]. Το CBMPR κάνει χρήση της ιεραρχικής δομής του δικτύου για να βρει πολλαπλές διαδρομές, να μειώσει τον έλεγχο δρομολόγησης και γενικά να βελτιώσει την επεκτασιμότητα του δικτύου.

Όπως σε όλα τα ιεραρχικά πρωτόκολλα, το CBMPR επιλέγει επικεφαλής συστάδας και απλούς κόμβους. Οι κόμβοι στο δίκτυο στέλνουν μηνύματα ελέγχου τακτικά. Ένα μέλος της συστάδας προσθέτει την IP διεύθυνσή του και ο επικεφαλής στη συστάδα προσθέτει τη διεύθυνση IP του μέλους της συστάδας του, σε κάθε μήνυμα. Ο επικεφαλής στο σύμπλεγμα κρατά τις διευθύνσεις IP των μελών του συμπλέγματος στον πίνακα δρομολόγησης του.

Το CBMPR είναι ένα πρωτόκολλο που δημιουργεί πολλαπλές διαδρομές από τον κόμβο πηγή στον κόμβο προορισμό. Αυτές οι διαδρομές μπορεί να ταξινομηθούν σε βέλτιστη διαδρομή, συντομότερη διαδρομή και ούτω καθεξής, σύμφωνα με τον

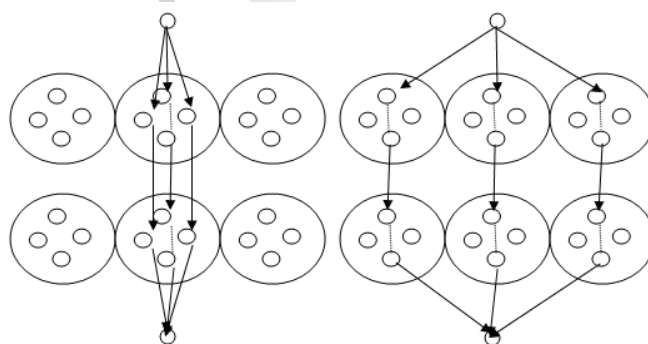
αριθμό των βημάτων (H), την καθυστέρηση (δ) και το εύρος ζώνης (B) που περιλαμβάνεται στα μηνύματα που λαμβάνονται από την πηγή.

Με βάση τα παραπάνω, τα βασικά βήματα του πρωτοκόλλου αυτού είναι τα εξής:

- Το πρώτο βήμα είναι να υπολογιστεί η τιμή βάρους διαδρομής $w = b/\ln(\Delta H)$ ανάλογα με τον αριθμό των βημάτων (H), την καθυστέρηση (δ) και το εύρος ζώνης (β) που περιλαμβάνονται στα μηνύματα.
- Το επόμενο βήμα είναι η αξιοποίηση της τεχνικής κωδικοποίησης M-για-N για την επίλυση της εγγενούς αναξιπιστίας του δικτύου με την προσθήκη επιπλέον πληροφορίας σε κάθε πακέτο. Το πακέτο δεδομένων είναι κατακερματισμένο σε μικρότερα μπλοκ.
- Τέλος, ανάλογα με την τιμή του βάρους της διαδρομής, διανέμει τα μπλοκ στις διαθέσιμες διαδρομές. Καθώς η τιμή του βάρους μιας διαδρομής αυξάνεται, τα περισσότερα μπλοκ διανέμονται σε μονοπάτια. Το φορτίο δεδομένων κατανέμεται σε πολλαπλές διαδρομές προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο ρυθμός απώλειας των πακέτων, να επιτευχθεί η εξισορρόπηση φορτίου και η βελτίωση της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης.

Το Σχήμα 14 δείχνει ένα παράδειγμα των πολλαπλών διαδρομών που θα υποστούν λιγότερες παρεμβολές με την επιλογή δρομολόγησης με διαφορετικές συστάδες.

Το κύριο πλεονέκτημα του CBMPR σε σχέση με τη συμβατική δρομολόγηση πολλαπλών διαδρομών είναι η μικρότερη παρεμβολή και το ότι είναι απλό. Κάθε διαδρομή στο CBMPR περνά μόνο από τους επικεφαλής των συστάδων, με αποτέλεσμα να έχει απλή δρομολόγηση. Αυτό καθιστά το CBMPR εύκολο και απλό και με μειωμένη επιβάρυνση για τον υπολογισμό των παρεμβολών που απαιτούνται σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο.



Σχήμα 14. Οι πολλαπλές διαδρομές καθορίζονται με το συμβατικό πρωτόκολλο δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών και με το πρωτόκολλο CBMPR [120].

2.8.1.6 Το πρωτόκολλο Κατευθυνόμενης Γεωγραφικής Δρομολόγησης (DGR)

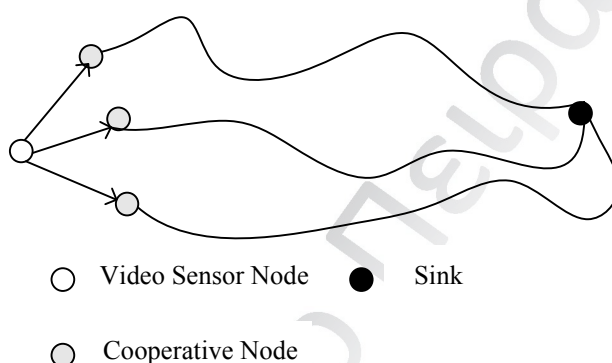
Στο [121], παρουσιάζεται το DGR, ένα νέο πρωτόκολλο πολλαπλών διαδρομών δρομολόγησης. Αυτό το πρωτόκολλο είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα λύση στο πρόβλημα της συνεχούς ροής βίντεο σε πραγματικό χρόνο σε ένα εύρος ζώνης και ενέργειας που περιορίζεται από τον μικρό αριθμό κόμβων.

Στο DGR, ένα κόμβος μεταδίδει ένα πακέτο στους άμεσους γείτονές του. Μόλις οι κόμβοι αυτοί λάβουν το πακέτο, επιλέγουν το δικό τους φορτίο, σύμφωνα με τα αναγνωριστικά και τους αριθμούς ακολουθίας των αντίστοιχων πακέτων από αυτούς τους κόμβους, σε συνεχόμενα πακέτα. Στη συνέχεια, οι κόμβοι αυτοί αποστέλλουν τα

πακέτα που έχουν ανατεθεί στο σταθμό μέσω των αντίστοιχων μοναδικών διαδρομών.

Ένα παράδειγμα αυτής της αρχιτεκτονικής παρουσιάζεται στο Σχήμα 15, όπου το στρώμα δρομολόγησης δημιουργεί 3 διαδρομές από την πηγή στο σταθμό. Επιπλέον, κάθε διαδρομή χρησιμοποιεί διαφορετικό αρχικό άμεσο γείτονα. Αυτή η αρχιτεκτονική σε συνδυασμό με την συντομότερη διαδρομή δρομολόγησης με τον αριθμό των επιτυχών παραδόσεων πλαισίων κατά την περίοδο που οι κόμβοι είναι ζωντανοί, είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική και μπορεί να είναι αποτελεσματική για την αποστολή βίντεο στο δίκτυο.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το DGR μπορεί να προσφέρει μικρή καθυστέρηση, που είναι 0,05msec, σημαντικά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και καλύτερη ποιότητα λαμβανόμενου βίντεο. Επίσης, το μέσο σήμα βίντεο προς το θόρυβο μπορεί να βελτιωθεί μέχρι 3dB.



Σχήμα 15. Το DGR με βάση τη μετάδοση βίντεο μέσω πολλαπλών διαδρομών.

2.8.1.7 Το πρωτόκολλο Κατευθυνόμενης Ελεγχόμενης Σύντηξης (DCF)

Στο [122], παρουσιάζεται το πρωτόκολλο DCF. Η κύρια ικανότητα του DCF είναι η από κοινού εξέταση της συγχώνευσης δεδομένων με την εξισορρόπηση φορτίου. Επίσης, μια βασική παράμετρος στο DCF ονομάζεται παράγοντας πολλαπλών διαδρομών που μπορεί να παρέχει τους συμβιβασμούς μεταξύ των πολλαπλών διαδρομών και επέκτασης, προκειμένου να ικανοποιήσει συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS από διάφορες εφαρμογές.

Στο DCF ένας κόμβος επιλέγεται ως πηγή αναφοράς ανά γύρο με βάση κάποια κριτήρια. Το πρώτο βήμα είναι για κάθε κόμβο πηγής να ξεκινήσει μια Αναφορά-Πηγή-Επιλογή-Timer (RSS-Timer). Στο RSS-Timer δίνεται μια τυχαία τιμή για κάθε χρονόμετρο με βάση ένα συγκεκριμένο κριτήριο που έχει οριστεί. Σε αυτό το στάδιο μια μικρή τιμή του RSS-Timer υποδεικνύει ότι μία πηγή έχει υψηλότερη επιλεξιμότητα ως πηγή αναφοράς. Το επόμενο βήμα είναι η παρακολούθηση των RSS-Timer. Η πηγή της οποίας η τιμή αυτή λήγει πρώτη θα πρέπει να επιλεγεί ως πηγή αναφοράς και θα αποστείλει ένα μήνυμα ειδοποίησης εντός της περιοχής. Όταν οι άλλοι κόμβοι πηγές λαμβάνουν αυτό το μήνυμα, ακυρώνουν τους δικούς τους RSS-Timers και γνωρίζουν τη θέση της πηγής αναφοράς από το μήνυμα. Το επόμενο βήμα είναι η πηγή αναφοράς να αρχικοποιήσει τη διαδρομή αναφοράς για τις πηγές για τη μετάδοση των πακέτων ελέγχου.

2.8.1.8 Το Πρωτόκολλο Δρομολόγησης για Δίκτυα με Χαμηλή Ισχύ και Απώλειες (RPL)

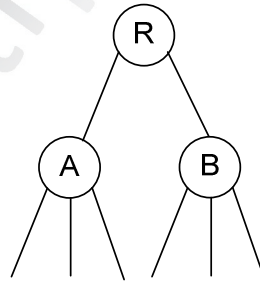
Το RPL είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης IPv6 για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που προτείνει η ομάδα εργασίας ROLL στο IETF [123]. Το βασικό συστατικό του RPL είναι ο προορισμός DODAG. Ένας προορισμός DODAG είναι ένας μόνο κόμβος ρίζα, που είναι χωρίς εξερχόμενη ακμή.

Στην συγκλίνουσα κατάσταση, κάθε δρομολογητής στο δίκτυο έχει ένα σταθερό σύνολο γονέων, σε μια πορεία προς τη ρίζα του DODAG, καθώς και έναν από αυτούς ως προτιμώμενο. Κάθε δρομολογητής ο οποίος αποτελεί μέρος του DODAG εκπέμπει πληροφορίες αντικειμένων (DIO), χρησιμοποιώντας την τοπική πολυεκπομπή, αναφέροντας την αντίστοιχη κατάταξή του στο DODAG. Αφού λάβει μια σειρά τέτοιων μηνυμάτων DIO, ένας δρομολογητής θα υπολογίσει τη δική του τάξη, ώστε να είναι μεγαλύτερη από το βαθμό του καθενός από τους γονείς του, και θα αρχίσει να εκπέμπει μηνύματα DIO. Έτσι, ο μηχανισμός DODAG ξεκινά από τη ρίζα, και εξαπλώνεται σταδιακά για να καλύψει το σύνολο του δικτύου. Η ρίζα μπορεί να προκαλέσει παγκόσμιο επανυπολογισμό του DODAG μέσω της αύξησης του αριθμού των μηνυμάτων DIO.

Το RPL παρέχει ένα μηχανισμό για τη διάδοση πληροφοριών σε δυναμική τοπολογία δικτύου. Η διάδοση επιτρέπει τις ελάχιστες ρυθμίσεις στους κόμβους, οι οποίοι λειτουργούν ως επί το πλείστον αυτόνομα.

Το ελάχιστο σύνολο των καταστάσεων που απαιτείται σε ένα δρομολογητή για να τρέχει το RPL αποτελείται:

- το αναγνωριστικό του DODAG
- τη διεύθυνση και την κατάταξη του προτιμώμενου γονέα
- τις παραμέτρους διαμόρφωσης από κοινού από το DODAG
- το ανώτατο αξίωμα που ο δρομολογητής WSN έχει διαφημίσει τον εαυτό



Σχήμα 16. Οι πολλαπλοί κόμβοι στο LLN που συντονίζονται από ένα σκελετό και αποστέλλουν το ίδιο DAGID.

Επιπλέον, υπάρχουν και άλλα πρωτόκολλα πολλαπλής διαδρομής που έχουν προταθεί για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [124, 125].

Στον Πίνακα 9, παρουσιάζεται η σύγκριση των πρωτοκόλλων πολλαπλής διαδρομής. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, τα πρωτόκολλα LMR, HMRP, DGR και DCF δεν χρησιμοποιούν περιοδικά μηνύματα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, το DGR δεν υποστηρίζει την κινητικότητα των κόμβων, ενώ τα ROAM, HMRP και GBMPR αποδίδουν καλύτερα σε περίπτωση που οι κόμβοι δεν είναι κινητοί. Επιπλέον, τα LMR, GRAB, HMRP, DGR, DCF και RPL είναι πιο επεκτάσιμα.

Τέλος, στα βασισμένα στην πολλαπλή διαδρομή μπορεί εν μέρει να συμπεριληφθούν μερικά πρωτόκολλα, τα οποία κυρίως ταξινομούνται και περιγράφονται αναλυτικά

στις κατηγορίες παρακάτω. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι τα TBRPF, TORA, TTDD, MIMO, Sleep/Wake, DD, MWE και MMSPEED.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Επεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Εύρεση Διαδρομής	Τύπος Περιοδικού Μηνύματος	Ευρωστία
ROAM	Μπορεί να ενημερώσει τουςδρομολογητές όταν ένας προορισμός είναι απρόσιτος και αποτρέπει την περιττή αποστολή πακέτων αναζήτησης	Θα πρέπει να στείλει μηνύματα για τη διατήρηση των ενεργών κόμβων	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Μονοπάτι με μικρότερη ενέργεια	Αποστολή μηνύματος	Περιορισμένη
LMR	Οι πληροφορίες της ετικέτας μπορεί να μειώσουν τα έξοδαδρομολόγησης	Μπορεί να έχει επιβάρυνση για να βρει τις πιθανές εναλλακτικές διαδρομές	Καλή	Ναι	Μονοπάτι με μικρότερη ενέργεια	Κανένα	Καλή
GRAB	Στηρίζεται στις συλλογικές προσπάθειες των πολλαπλών κόμβων για την παροχή δεδομένων	Μπορεί να έχει επιβάρυνση από την αποστολή των περιττών δεδομένων	Καλή	Ναι	Μονοπάτι με μικρότερη ενέργεια	Αποστολή μηνύματος	Καλή
HMRP	Επεκτασιμότητα, απλότητα και διάρκεια ζωής του συστήματος	Μεταδίδει το πακέτο μία φορά	Καλή	Περιορισμένη	Μονοπάτι με μικρότερη ενέργεια	Κανένα	Περιορισμένη
CBMPR	Χαμηλή παρεμβολή, απλότητα	Μπορεί να συμβεί πρόβλημα σε μονοπάτι	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Μονοπάτι με μικρότερη ενέργεια	Αποστολή μηνύματος	Περιορισμένη
DGR	Είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα λύση στο πρόβλημα της ροής βίντεο σε πραγματικό χρόνο	Είναι βελτιστοποιημένο για την μεταφορά βίντεο	Καλή	Όχι	Μονοπάτι με μικρότερη ενέργεια	Κανένα	Καλή
DCF	Παρέχει συμβιβασμό μεταξύ της εύρεσης και της επέκτασης πολλαπλών διαδρομών	Επιλέγει έναν κόμβο πηγής ως πηγή αναφοράς ανά γύρο	Καλή	Ναι	Μονοπάτι με μικρότερη ενέργεια	Κανένα	Καλή
RPL	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας	Υποστηρίζει μονοεκπομπή	Καλή	Ναι	Μονοπάτι με μικρότερη ενέργεια	Αποστολή μηνύματος	Καλή

Πίνακας 9. Σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα σε πολλαπλές διαδρομές.

2.8.2 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS-Based)

Στα πρωτόκολλα βασισμένα στην ποιότητα υπηρεσίας, το δίκτυο πρέπει να ισορροπήσει μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της ποιότητας των δεδομένων [126, 127]. Ειδικότερα, το δίκτυο θα πρέπει να πληροί ορισμένες επίπεδα QoS π.χ. καθυστέρηση, ενέργεια, εύρος ζώνης, κλπ. κατά την παράδοση των δεδομένων στο σταθμό. Στην δρομολόγηση οι κύριες ανησυχίες είναι η διακίνηση και ο μέσος χρόνος απόκρισης. Η δρομολόγηση QoS γίνεται συνήθως με την δέσμευση πόρων σε μια επικοινωνία με σύνδεση να πληρούνται οι απαιτήσεις QoS για κάθε σύνδεση. Ενώ πολλοί μηχανισμοί έχουν προταθεί για τη δρομολόγηση με QoS σε εφαρμογές πολυμέσων σε πραγματικό χρόνο, δεν μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, λόγω των περιορισμένων πόρων, όπως εύρος ζώνης και ενέργεια.

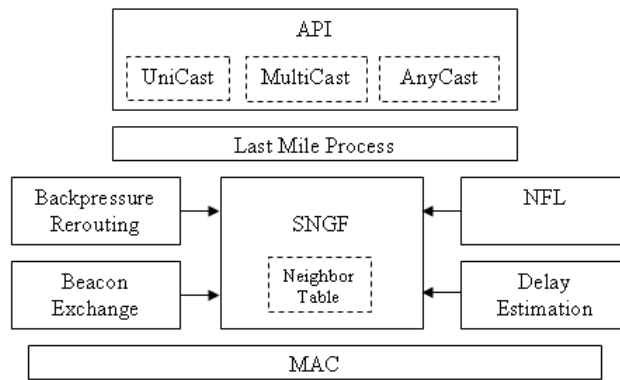
2.8.2.1 Το πρωτόκολλο Διαδοχικής Ανάθεσης Δρομολόγησης (SAR)

Το SAR είναι ένα από τα πρώτα πρωτόκολλα δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, που εισάγει την έννοια του QoS στις αποφάσεις δρομολόγησης [128]. Η απόφαση για τη δρομολόγηση του SAR εξαρτάται από τρεις παράγοντες: τους ενεργειακούς πόρους, το QoS σε κάθε μονοπάτι και το επίπεδο προτεραιότητας του κάθε πακέτου. Για να αποφευχθεί η αστοχία μιας διαδρομής, χρησιμοποιείται η προσέγγιση της πολλαπλής διαδρομής και προγράμματα αποκατάστασης του μονοπατιού. Ο στόχος του αλγορίθμου SAR είναι η ελαχιστοποίηση του σταθμισμένου μέσου όρου ποιότητας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

2.8.2.2 Το πρωτόκολλο SPEED

Ένα άλλο πρωτόκολλο δρομολόγησης QoS για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που παρέχει σε πραγματικό χρόνο από-άκρο-σε-άκρο εγγυήσεις είναι το SPEED, που μπορεί να παρέχει αποφυγή της κυκλοφοριακής συμφόρησης, όταν το δίκτυο είναι κορεσμένο [129]. Η δρομολόγηση στο SPEED ονομάζεται Γεωγραφική Ακαταστασία Μη Προσδιοριστική προώθησης (SNFG) και συνεργάζεται με τέσσερις άλλες ενότητες στο στρώμα του δικτύου και διατηρεί την επιθυμητή ταχύτητα παράδοσης στα δίκτυα αισθητήρων ρυθμίζοντας τα πακέτα που αποστέλλονται στο στρώμα MAC. Αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά (Σχήμα 17):

- Μια διεπαφή (Application Programming Interface).
- Ένα σύστημα καθυστέρησης
- Ένα σύστημα γειτονικής ανταλλαγής
- Ένα μη ντετερμινιστικό αλγόριθμο (NGF)
- Ένα βρόχο ενημέρωσης (NFL)
- Ένα σύστημα για την αναδρομολόγηση
- Επεξεργασία τελευταίου χιλιομέτρου



Σχήμα 17. Η αποστολή πακέτων στο πρωτόκολλο Speed [128].

Κάτω από βαριά κυκλοφοριακή συμφόρηση, το SPEED έχει ελαφρώς υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, κυρίως επειδή το SPEED προσφέρει περισσότερα πακέτα προς τον προορισμό από τα άλλα πρωτόκολλα. Το κύριο πλεονέκτημα του SPEED είναι ότι αποδίδει καλύτερα από την άποψη της από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρησης. Ωστόσο, στο SPEED δεν λαμβάνεται υπόψη η κατανάλωση ενέργειας του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Ως εκ τούτου, για μια πιο ρεαλιστική κατανόηση της κατανάλωσης ενέργειας του SPEED, υπάρχει ανάγκη να το συγκρίνουμε με ένα ενεργειακό πρωτόκολλο δρομολόγησης.

2.8.2.3 Το πρωτόκολλο Πολλαπλής Διαδρομής Multi-SPEED (MMSPEED)

Το MMSPEED έχει αναπτυχθεί για πιθανολογικό QoS στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η παροχή του QoS γίνεται σε δύο τομείς [130]:

- *Τομέας έγκαιρης παράδοσης.* Μπορεί να επιτευχθεί με την εξασφάλιση πολλαπλών επιλογών για ταχύτητα της παράδοσης πακέτων.
- *Τομέας αξιοπιστίας.* Μπορεί να υποστηρίξει διάφορες απαιτήσεις αξιοπιστίας με πιθανοτική προώθηση πολλαπλών διαδρομών.

Αυτοί οι μηχανισμοί για QoS μπορεί να εφαρμοστούν τοπικά χρησιμοποιώντας την τοπική γεωγραφική προώθηση των πακέτων με δυναμική αντιστάθμιση, η οποία αντισταθμίζει τις τοπικές ανακρίβειες μιας απόφασης όταν το πακέτο ταξιδεύει προς τον προορισμό του.

Το κύριο πλεονέκτημα του MMSPEED είναι ότι εγγυάται από-άκρο-σε-άκρο ποιότητα, η οποία είναι επιθυμητή για την επεκτασιμότητα και την προσαρμοστικότητα σε δυναμικά δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας. Μπορεί να προσφέρει διαφοροποίηση QoS τόσο σε αξιοπιστία όσο και σε επικαιρότητα και να βελτιώσει σημαντικά την πραγματική ικανότητα ενός δικτύου αισθητήρων ως προς τον αριθμό των ροών που πληρούν τόσο την αξιοπιστία όσο και τις απαιτήσεις επικαιρότητας.

2.8.2.4 Το Πρωτόκολλο Κινητών Πολυμέσων Γεωγραφικής Δρομολόγησης (MGR)

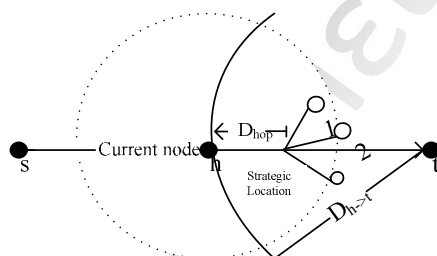
Στο [131], παρουσιάζεται μια νέα αρχιτεκτονική που ονομάζεται δίκτυο κινητής τηλεφωνίας πολυμέσων (MMSN) και ένα σύστημα δρομολόγησης που ονομάζεται γεωγραφική δρομολόγηση κινητών πολυμέσων (MGR). Σε αυτήν την αρχιτεκτονική

ο κινητός κόμβος πολυμέσων (MMN) αξιοποιείται για να ενισχυθεί η ικανότητα του δικτύου αισθητήρων για την περιγραφή του συμβάντος. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο έχει σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας και να ικανοποιήσει τους περιορισμούς σχετικά με τη μέση από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρησης των ειδικών αιτήσεων MMSN.

Στο πρωτόκολλο αυτό, το κύριο μέλημα είναι να αντιμετωπιστεί η καθυστέρηση που εγγυάται ως κορυφαία προτεραιότητα το QoS. Στη συνέχεια, το πρωτόκολλο συνεχίζει τις προσπάθειες για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και διευρύνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Αυτό δίνει το κίνητρο να εκμεταλλευτεί τις ανταλλαγές καθυστέρησης ενέργειας για το σχεδιασμό αυτού του πρωτοκόλλου.

Έτσι, η κύρια λειτουργία του πρωτοκόλλου είναι να επιλέξει την ιδανική τοποθεσία του επόμενου κόμβου. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, το MGR υπολογίζει την επιθυμητή απόσταση του βήματος για τον επόμενο κόμβο (D_{hop}), διαιρώντας την απόσταση από την τρέχουσα του κόμβο προς τον σταθμό ($D_h \rightarrow t$), με το επιθυμητό αριθμό βημάτων από τον τρέχοντα κόμβο προς τον σταθμό ($H_h \rightarrow t$).

Με βάση τον υπολογισμό D_{hop} , η στρατηγική θέση του MGR αποφασίζεται όπως στο σχήμα 18.



Σχήμα 18. Η Στρατηγική Επιλογή θέσης στο MGR.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο [131], δείχνουν ότι για καθυστέρηση 0,035s, το MGR εγγυάται την QoS της καθυστέρησης στις περισσότερες περιπτώσεις. Πέραν αυτού το MGR εξοικονομεί περίπου 30% της κατανάλωσης ενέργειας και επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, σε σύγκριση με την κλασική γεωγραφική δρομολόγηση.

Επιπλέον, υπάρχουν και άλλα πρωτόκολλα βασισμένα στην ποιότητα υπηρεσίας εκτός από το ανωτέρω που έχουν προταθεί για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [132, 133, 134, 135, 136].

Στον Πίνακα 10, παρουσιάζεται η σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα στην ποιότητα υπηρεσίας. Ως εκ τούτου, τα SAR, SPEED και MMSPEED μπορούν να παρέχουν εξοικονόμηση ενέργειας με την εγγύηση ποιότητας της υπηρεσίας θεωρώντας ότι οι κόμβοι δεν κινούνται. Από την άλλη πλευρά, το MGR μπορεί να είναι πιο επεκτάσιμο από τα άλλα πρωτόκολλα και μπορεί να υποστηρίξει την κινητικότητα των κόμβων.

Τέλος, στα πρωτόκολλα που βασίζονται στο QoS μπορούν εν μέρει να συμπεριληφθούν μερικά πρωτόκολλα, τα οποία κυρίως έχουν καταταχθεί και περιγράφει αναλυτικά στις προηγούμενες κατηγορίες. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι τα MIMO, Sleep/Wake, GRAB, DGR και DCF.

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Επεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Εύρεση Διαδρομής	Τύπος Περιοδικού Μηνύματος	Ευρωστία
SAR	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας	Επιβάρυνση της διατήρησης των πινάκων	Περιορισμένη	Όχι	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Αποστολή μηνύματος	Περιορισμένη
SPEED	Μικρή από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση	Δεν αποδίδει καλά σε βαριά κυκλοφοριακή συμφόρηση	Περιορισμένη	Όχι	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Αποστολή μηνύματος	Περιορισμένη
MMSPEED	Μπορεί να προσφέρει διαφοροποίηση QoS σε αξιοπιστία και βελτιώνει την χωρητικότητα ενός δικτύου	Σε ένα δίκτυο υψηλού φορτίου, δεν είναι σε θέση να ανταποκριθεί σε απαιτήσεις καθυστέρησης	Περιορισμένη	Όχι	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Αποστολή μηνύματος	Περιορισμένη
MGR	Ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας για να ικανοποιήσει τους περιορισμούς σχετικά με τη μέση καθυστέρηση	Αντιμετωπίζει την εγγύηση καθυστέρησης, με κορυφαία προτεραιότητα	Καλή	Ναι	Μονοπάτι με λιγότερη ενέργεια	Κανένα	Περιορισμένη

Πίνακας 10. Σύγκριση των πρωτοκόλλων βασισμένα στην ποιότητα υπηρεσίας.

2.8.3 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Βασισμένα σε Πολλαπλές Διαδρομές με Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Ποιότητα Υπηρεσίας

Το LMR είναι αποτελεσματικό επειδή χρησιμοποιεί τοπική πολυεκπομπή και μειώνει τον μέσο αριθμό των μηνυμάτων κατά $1/2D$ (D είναι ο μέσος βαθμός κόμβων) [117]. Επιπλέον, σε ένα δίκτυο 400 κόμβων, στην περίπτωση της μονοεκπομπής, ο μέγιστος αριθμός πακέτων είναι 500, ενώ στην περίπτωση της πολυεκπομπής ο μέγιστος αριθμός πακέτων είναι 4500.

Το HMRP, σε σύγκριση με τα LEACH και PEGASIS, βελτιώνει τη διάρκεια ζωής (75% των κόμβων είναι ενεργοί) του LEACH κατά 200% και του PEGASIS κατά 8% [119]. Το HMRP εμφανίζει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας 35% σε σχέση με το LEACH.

Το GRAB μπορεί να παραδώσει με επιτυχία πάνω από το 90% των πακέτων με χαμηλό κόστος ενέργειας, ακόμη και κάτω από αντίξοες συνθήκες όπως 30% αποτυχίας κόμβων που επιδεινώνεται με 15% απώλειες σε μήνυμα [112]. Για διαφορετικούς ρυθμούς απώλειας πακέτων, η ενέργεια παραμένει σχεδόν σταθερή γύρω 16054, αυξανόμενη κατά λιγότερο από 6 J, όταν ο ρυθμός απώλειας πακέτων μεγαλώνει από 5% έως 50%. Ωστόσο, το CBMPR αυξάνει την απόδοση περίπου 5-8% για κάθε πρόσθετη διαδρομή, φτάνοντας τελικά στο 20-24% σε τέσσερις διαδρομές.

Στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης στο [123], το RPL δείχνει ότι για τη συγκεκριμένη τοπολογία, το 90% των διαδρομών έχουν μήκος διαδρομής 4 βήματα ή λιγότερα με μεθοδολογία συντομότερης διαδρομής δρομολόγησης, ενώ στο RPL Point-to-Point (P2P) δρομολόγησης, το 90% των διαδρομών έχει μήκος όχι μεγαλύτερο από 5 βήματα. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι παρά το μη βελτιστοποιημένο σύστημα δρομολόγησης P2P, η ποιότητα διαδρομής του RPL είναι κοντά σε ένα βελτιστοποιημένο μηχανισμό δρομολόγησης P2P για την τοπολογία. Επιπλέον, το RPL υποστηρίζει το IPv6 το οποίο θα χρησιμοποιείται σε όλα τα μελλοντικά δίκτυα.

Το SAR προσφέρει λιγότερη κατανάλωση ενέργειας από το πρωτόκολλο ελάχιστης ενέργειας [128]. Το SAR υποστηρίζει πολλαπλές διαδρομές από τους κόμβους προς το σταθμό. Αυτό εξασφαλίζει ανοχή σε βλάβες και εύκολη ανάκτηση, αλλά το πρωτόκολλο πάσχει από την επιβάρυνση της διατήρησης των πινάκων και αναφέρει σε κάθε κόμβο αισθητήρα ειδικά όταν ο αριθμός των κόμβων είναι τεράστιος.

Η καθυστέρηση από-άκρο-σε-άκρο για το SPEED κυμαίνεται από 10 msec μέχρι 140msec για ένα ποσοστό συμφόρησης από 0 πακέτα/δευτερόλεπτο μέχρι 100 πακέτα/δευτερόλεπτο [129]. Επίσης το SPEED καταφέρνει να παραδώσει το 95% των πακέτων προς τον προορισμό. Ωστόσο, το MMSPEED μπορεί να προσφέρει σαφή διαφοροποίηση υπηρεσιών στον τομέα της αξιοπιστίας και οι δύο ομάδες ροής στην προσομοίωση μπορεί να καλύψουν τις δικές τους απαιτήσεις αξιοπιστίας για έως και 20 ροές [130]. Από την άλλη πλευρά, στο πρωτόκολλο SPEED, οι δύο ομάδες ροής αναμιγνύονται με καμία διαφοροποίηση και καθιστά την ομάδα ροής 1 να χάσει την αξιοπιστία των 0,7 από 18 ροές και περισσότερο. Επίσης, το MMSPEED μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, λόγω του πολύπλοκου υπολογισμού και του μεγαλύτερου πλαισίου.

Πολλά από τα προτεινόμενα πρωτόκολλα έχουν αξιολογηθεί με τη χρήση εργαλείων προσομοίωσης, όπως τα NS2, Sensor Toolkit πολλά από αυτά θα μπορούσαν να υλοποιηθούν σε πραγματικό περιβάλλον όπως το IGF [99] σε στρατιωτικά δίκτυα, το TBRPF [48, 49], E-TORA [57] και COUGAR [86] σε συστήματα υγείας.

Τα πρωτόκολλα TTDD [73], ROAM [116], SWE [91] και MWE [91], δεδομένου ότι δεν αποδίδουν καλά σε κινητά περιβάλλοντα, μπορεί να μελετηθούν και να βελτιωθούν περαιτέρω προκειμένου να ξεπεραστούν η περιορισμένη κινητικότητα και να ελαχιστοποιηθούν τα μειονεκτήματα της κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζεται μια αναλυτική περίληψη της κατάταξης των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Στο κεφάλαιο αυτό, κάθε πρωτόκολλο περιγράφεται λεπτομερώς μία φορά στην κύρια κατηγορία που ανήκει. Ωστόσο, λόγω των χαρακτηριστικών τους τα περισσότερα από τα ανωτέρω πρωτόκολλα δρομολόγησης, μπορεί να ανήκουν σε περισσότερες από μία κατηγορίες. Για παράδειγμα, με βάση τα κύρια χαρακτηριστικά του, το TTDD μπορεί να χαρακτηριστεί ως ιεραρχικό. Ωστόσο, το πρωτόκολλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις, ως βασισμένο στην τοπολογία ή στις πολλαπλές διαδρομές. Έτσι, στον Πίνακα 11, το TTDD ταξινομείται ως ιεραρχική (έντονο X), βάσει τοποθεσίας (κανονικό X) και πολλαπλής διαδρομής (κανονικό X).

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

	Επίπεδα	Ιεραρχικά	Βασισμένα σε Ερωτήματα	Συνεκτικά και μη Συνεκτικά	Βασισμένα στην Διαπραγμάτευση	Βασισμένα στη Θέση	Κινητούς Πράκτορες	Βασισμένα σε Πολλαπλές Διαδρομές	Ποιότητα Υπηρεσίας
WRP	X								
TBRPF	X							X	
TORA	X							X	
Gossiping	X								
Flooding	X								
RR	X		X						
E-TORA	X								
ZRP	X								
LEACH		X							
LEACH-C		X							
PEGASIS		X							
TEEN		X							
APTEEN		X							
VGA		X			X				
TTDD		X				X		X	
BCDCP		X							
MIMO		X						X	X
HPAR		X							
Sleep/Wake		X						X	X
DD			X					X	
COUGAR			X			X			
ACQUIRE			X			X			
SWE				X					
MWE				X				X	
SPIN-PP			X		X				
SPIN-EC			X		X				
SPIN-BN			X		X				
SPIN-RL			X		X				
DREAM						X			
GEAR						X			
GEM		X				X			
IGF						X			
SELAR						X			
GDSTR						X			
MERR						X			
OGF	X					X			
PAGER-M						X			
HGR	X					X			
MIP							X		
IEMF/IEMA							X		
ROAM								X	
LMR								X	
GRAB								X	X
HMRP		X						X	
CBMPR		X						X	
DGR								X	X
DCF								X	X
RPL								X	
SAR					X				X
SPEED									X
MMSPEED								X	X
MGR									X

Πίνακας 11. Κατάταξη πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Προτεινόμενο Σχήμα Δρομολόγησης μέσω Ενεργειακά Ισορροπημένων Συστάδων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

3.1 Εισαγωγή

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν συστάδες προκειμένου να παρέχουν υψηλή ενεργειακή απόδοση και να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Κάθε σύμπλεγμα εκλέγει έναν κόμβο ως επικεφαλής και στη συνέχεια οι κόμβοι του συμπλέγματος στέλνουν τα δεδομένα τους στο δικό τους επικεφαλής. Ο επικεφαλής του συμπλέγματος αποστέλλει τα δεδομένα του στο σταθμό βάσης. Αυτή η μεταφορά των δεδομένων μπορεί να εκτελεστεί με δύο εναλλακτικούς τρόπους. Είτε άμεσα, στην περίπτωση κατά την οποία ο επικεφαλής του συμπλέγματος βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης, ή μέσω ενός ενδιάμεσου επικεφαλής. Σε αυτό το κεφάλαιο, προτείνεται ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο, που ονομάζεται ECHERP. Το ECHERP, σε αντίθεση με τα άλλα υπάρχον πρωτόκολλα που επιλέγουν ένα τυχαίο κόμβο ή τον κόμβο με την υψηλότερη ενέργεια μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ως το νέο επικεφαλής, υπολογίζει την τρέχουσα και την προβλεπόμενη μελλοντική εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων μαζί με τον αριθμό των γύρων που μπορεί να είναι επικεφαλής συμπλέγματος, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Το δίκτυο μοντελοποιείται ως ένα γραμμικό σύστημα, και χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Gauss για να υπολογίσει τον συνδυασμό των κόμβων που μπορούν να επιλεγούν ως επικεφαλής συμπλέγματος. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο επιτρέπει σε νέους κόμβους να προστεθούν στο σύστημα και να προσαρμόζουν αυτόματα τη συμπεριφορά τους με βάση τους κόμβους και το λόγο της παρεμβολής σήματος προς θόρυβο. Επιπλέον, υποστηρίζει τη κινητικότητα των κόμβων.

Όλα τα ιεραρχικά πρωτόκολλα που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιώντας διάφορους αλγόριθμους [65-82]. Αυτοί οι αλγόριθμοι προσφέρουν μια καλή λύση, διότι συνήθως επιλέγουν τον κόμβο με την υψηλότερη ενέργεια στο σύμπλεγμα ως επικεφαλής για τον επόμενο γύρο. Ωστόσο, αυτό δεν εξασφαλίζει τη μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου. Ως εκ τούτου, αν ο κόμβος με την υψηλότερη ενέργεια είναι ένας κόμβος που βρίσκεται στο άκρο του συμπλέγματος, αυτό μπορεί να οδηγήσει τους άλλους κόμβους να σπαταλήσουν σημαντική ποσότητα ενέργειας για την αποστολή δεδομένων σε αυτόν τον κόμβο, το οποίο δεν είναι ενεργειακά αποδοτικό για ολόκληρο το δίκτυο. Αυτός είναι ο λόγος που προτείνουμε ένα πρωτόκολλο που εκλέγει ως επικεφαλής συμπλέγματος κόμβους που ελαχιστοποιούν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας σε ένα σύμπλεγμα.

3.2 Προτεινόμενο Πρωτόκολλο για Ενεργειακά Αποδοτική Δρομολόγηση στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται το νέο ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, που ονομάζεται ECHERP. Το πρωτόκολλο ECHERP επιλέγει τους επικεφαλής στο δίκτυο χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο, όπως τα περισσότερα από τα προτεινόμενα παλαιότερα πρωτόκολλα. Ωστόσο, η κύρια διαφορά του με τα άλλα πρωτόκολλα είναι ότι χρησιμοποιεί ένα πιο αποτελεσματικό μηχανισμό για να επιλέξει έναν κόμβο ως επικεφαλής. Αυτό γίνεται με την εξέταση της τρέχουσας και της εκτιμώμενης μελλοντικής ενέργειας των κόμβων, μαζί με τον αριθμό των γύρων που μπορούν να είναι επικεφαλής, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Το ECHERP μοντελοποιεί το δίκτυο και την ενέργεια που δαπανάται από τους κόμβους ως ένα γραμμικό σύστημα και επιλέγει τους επικεφαλής του δικτύου χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Gauss. Στο κεφάλαιο 3.2.1, παρουσιάζεται το ενεργειακό μοντέλο που υιοθετήθηκε, ενώ στο κεφάλαιο 3.2.2, περιγράφεται το μοντέλο δρομολόγησης.

3.2.1 Περιγραφή του Ενεργειακού Μοντέλου

Επί του παρόντος, υπάρχει μεγάλη έρευνα στον τομέα της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας στις ραδιοαπομπές. Διαφορετικές υποθέσεις σχετικά με τα ραδιο-χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης ενέργειας της εκπομπής και λήψης, επηρεάζουν την απόδοση των διαφορετικών πρωτοκόλλων.

Σε αυτή την έρευνα, το ενεργειακό μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το εξής: καταναλώνονται 50 nJ/bit (E_{elec}) για να ενεργοποιηθεί ο πομπός ή ο δέκτης και 100 pJ/bit/m² (E_{amp}) να ενεργοποιηθεί ο ενισχυτής μετάδοσης [63]. Η ενέργεια που καταναλώνει ένας κόμβος για τη ραδιο-μετάδοση $E_{Tx}(k,d)$ ενός μηνύματος k bits σε απόσταση d οφείλεται στην ενέργεια λόγω της ταυτόχρονη λειτουργίας του πομπού $E_{Tx-elec}(k)$ και του ενισχυτή $E_{Tx-amp}(k,d)$ και εκφράζεται παρακάτω:

$$E_{Tx}(k,d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k,d) = E_{elec} \cdot k + E_{amp} \cdot k \cdot d^2, \quad (5)$$

όπου E_{elec} είναι η κατανάλωση στον πομπό ανά bit - ίση με την αντίστοιχη στο δέκτη ανά bit - και E_{amp} είναι η κατανάλωση μετάδοσης ανά bit ανά τετραγωνικό μέτρο. Επιπλέον, με τη χρήση δρομολόγησης πολλαπλών βημάτων, το $E_{Tx}(k,d)$ είναι μειωμένο σε σύγκριση με εκείνο στη δρομολόγηση ενός βήματος. Ομοίως, η ενέργεια που καταναλώνεται από έναν κόμβο για την υποδοχή $E_{Rx}(k)$ ενός μηνύματος k bits που οφείλεται στην λειτουργία του δέκτη $E_{Rx-elec}(k)$ εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = E_{elec} \cdot k. \quad (6)$$

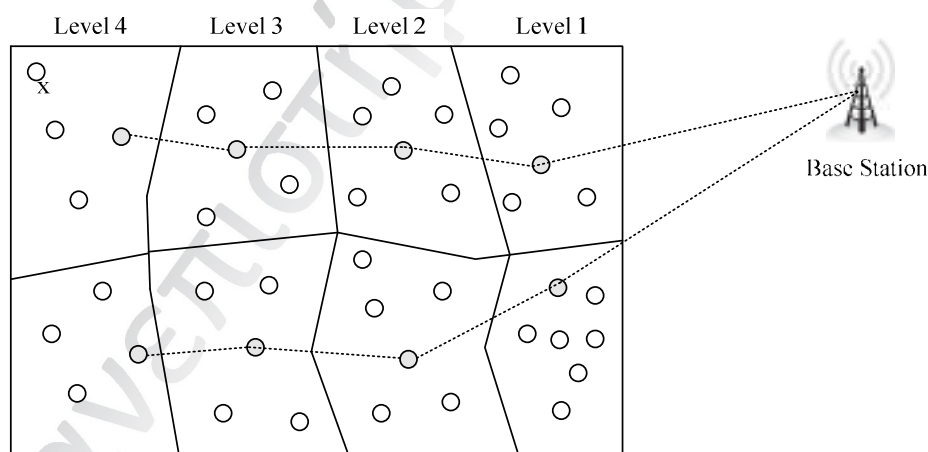
3.2.2 Περιγραφή του ECHERP

Στο ECHERP, ο BS υποτίθεται ότι έχει απεριόριστη παροχή ενέργειας και ισχύος. Υποτίθεται επίσης ότι ο BS βρίσκεται σε μία σταθερή θέση, είτε στο εσωτερικό ή μακριά από το πεδίο των κόμβων. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ του BS και του κέντρου του πεδίου των κόμβων, τόσο υψηλότερη είναι η ενεργειακή δαπάνη

για κάθε κόμβο να μεταδώσει στο BS. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου, που υποτίθεται ότι βρίσκονται εντός του πεδίου, ομαδοποιούνται δυναμικά σε συστάδες. Ένας κόμβος σε κάθε συστάδα εκλέγεται ως επικεφαλής αυτής της συστάδας. Ως εκ τούτου, ο αριθμός των επικεφαλής είναι ίσος με τον αριθμό των συστάδων. Οι επικεφαλής, που βρίσκονται αρκετά κοντά στο σταθμό βάσης του δικτύου αναφέρονται ως επικεφαλής πρώτου επιπέδου. Αυτοί οι επικεφαλής είναι ικανοί για την άμεση επικοινωνία με το σταθμό βάσης. Οι επικεφαλής που βρίσκονται σε πιο απομακρυσμένες θέσεις από το σταθμό βάσης θεωρούνται επικεφαλής δεύτερου, τρίτου, κλπ. επιπέδου. Αυτοί οι επικεφαλής μεταδίδουν τα δεδομένα προς τους επικεφαλής του ανώτερου επιπέδου. Επιπλέον, προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπημένη κατανάλωση ενέργειας και να παραταθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου, η εκλογή των επικεφαλής συστάδας γίνεται σε γύρους.

Το κύριο χαρακτηριστικό του ECHERP είναι η διαδικασία επιλογής των επικεφαλής. Για την επιλογή επικεφαλής, το ECHERP χρησιμοποιεί τις πληροφορίες δρομολόγησης και την ενέργεια που δαπανάται στο δίκτυο σαν γραμμικό σύστημα, η λύση του οποίου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Gauss. Ως εκ τούτου, επικεφαλής εκλέγονται οι κόμβοι που ελαχιστοποιούν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του συμπλέγματος.

Στα περισσότερα από τα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα, ο κόμβος με το υψηλότερο απόθεμα ενέργειας εκλέγεται ως επικεφαλής. Αυτή η επιλογή μπορεί να οδηγήσει σε ανεπάρκειες, όπως μπορεί να φανεί από το ακόλουθο παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος x στο Σχήμα 19 έχει το υψηλότερο απόθεμα ενέργειας από τους άλλους κόμβους που ανήκουν στην ίδια συστάδα. Ο κόμβος αυτός εκλέγεται ως ο νέος επικεφαλής. Ωστόσο, αυτό αναγκάζει τους υπόλοιπους κόμβους να μεταφέρουν τα δεδομένα προς την αντίθετη κατεύθυνση από τον σταθμό βάσης, με αποτέλεσμα την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 19. Το μοντέλο δικτύου που χρησιμοποιείται.

Προφανώς, αυτό δεν είναι ενεργειακά αποδοτικό και μπορεί να αποφευχθεί με την επιλογή των επικεφαλής συστάδας με τρόπο πιο ενεργειακά αποδοτικό. Αυτό επιδιώκεται με το προτεινόμενο πρωτόκολλο.

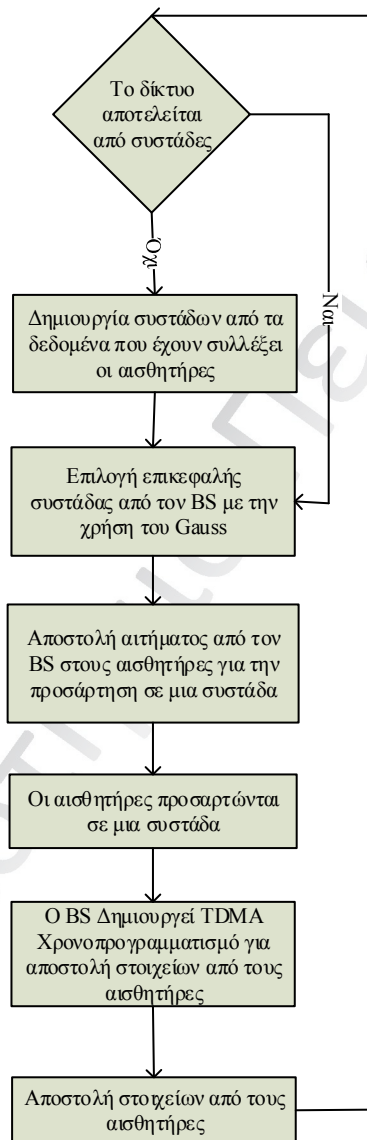
Τα βήματα για την δημιουργία συστάδων και στη συνέχεια για την επιλογή των επικεφαλής είναι τα εξής:

1. Ο BS δημιουργεί ένα χρονοδιάγραμμα TDMA (Time Division Multiple Access) και ζητεί από τους κόμβους να διαφημίσουν τον εαυτό τους, μια διαδικασία παρόμοια με εκείνη των άλλων πρωτοκόλλων.

2. Κάθε κόμβος μεταδίδει ένα μήνυμα για να διαφημίσει το επίπεδο της ενέργειας και θέση του στους γείτονες κόμβους. Με βάση αυτή την ανταλλαγή πληροφοριών, κάθε κόμβος δημιουργεί ένα πίνακα πληροφοριών για κάθε γείτονα που καταγράφει το επίπεδο ενέργειας και τις θέσεις των γειτόνων του και στέλνει τον πίνακα αυτό μαζί με τις αντίστοιχες πληροφορίες του στους γείτονές του. Αυτό το βήμα επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η ενημέρωση όλων των κόμβων του δικτύου αποσταλεί στο BS, επιτρέποντας του να έχει μια σφαιρική γνώση του δικτύου. Σε αυτό το στάδιο όλοι οι κόμβοι είναι υποψήφιοι επικεφαλής και κάθε κόμβος έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό που περιλαμβάνεται επίσης στον πίνακα που ανταλλάσσεται.
3. Μόλις ολοκληρωθεί η διαφήμιση των κόμβων, ο BS χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Gauss και υπολογίζει τον αριθμό των γύρων που κάθε κόμβος μπορεί να είναι επικεφαλής, προσπαθώντας να μεγιστοποιήσει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Στο πρώτο στάδιο επιλογής του επικεφαλής, ο BS επιλέγει τους κόμβους πιο κοντά στον εαυτό του να είναι οι επικεφαλής υψηλού επιπέδου. Επιπλέον, κάποιοι από τους κόμβους από τους οποίους ο BS δεν έχει λάβει κανένα μήνυμα διαφήμισης θεωρούνται χαμηλού επιπέδου επικεφαλής. Ο συνολικός αριθμός των κόμβων, που μπορεί να γίνουν επικεφαλής, είναι 5% του συνολικού αριθμού των κόμβων στο δίκτυο αυτό το ποσοστό είναι χρήσιμο στην επίτευξη καλής απόδοσης σε ένα ομοιογενές δίκτυο με διάφορες ρυθμίσεις παραμέτρων [63]. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλα ποσοστά.
4. Ο BS μεταδίδει τα μοναδικά αναγνωριστικά των επιλεγμένων επικεφαλής, καθώς και των μελών των ομάδων τους και οι κόμβοι χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για να σχηματίσουν και να ενταχθούν σε κάποιο σύμπλεγμα. Ως εκ τούτου, κάθε κόμβος έχει γνώση του αριθμού των γύρων που μπορεί να είναι επικεφαλής. Ο BS τρέχει τον αλγόριθμο Gauss και υπολογίζει τον κατάλληλο αριθμό των γύρων που οι κόμβοι μπορούν να είναι επικεφαλής και στέλνει αυτή την πληροφορία στους κόμβους.
5. Οι επικεφαλής χαμηλότερου επιπέδου δεν διαβιβάζουν τις πληροφορίες άμεσα στον BS. Χρησιμοποιούν τους επικεφαλής ανώτερου επιπέδου ως ενδιάμεσους αναμεταδότες των δεδομένων τους στο BS.
6. Κάθε επικεφαλής δημιουργεί ένα χρονοδιάγραμμα TDMA και το εκτέμνει στους κόμβους του συμπλέγματός του, προκειμένου να ενημερώσει κάθε κόμβο για τη χρονοθυρίδα που μπορεί να μεταδώσει. Επιπλέον, ο ραδιοπομπός κάθε κόμβου επιτρέπεται να απενεργοποιηθεί σε όλες τις χρονικές περιόδους, εκτός από τη διάρκεια εκπομπής τους. Ως εκ τούτου, η κατανάλωση ενέργειας του κάθε κόμβου μπορεί να μειωθεί σημαντικά.
7. Στη συνέχεια, ξεκινά η μετάδοση των δεδομένων. Οι κόμβοι, με βάση την κατανομή του χρόνου μετάδοσης, στέλνουν τα δεδομένα τους στον επικεφαλής τους. Η ισχύς εκπομπής του κάθε κόμβου ρυθμίζεται στο ελάχιστο για την επικοινωνία με τον γείτονά του. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται τόσο η παρεμβολή με άλλες μεταδόσεις όσο και η κατανάλωση της ενέργειας.
8. Κάθε επικεφαλής χαμηλότερου επιπέδου συγκεντρώνει τα δεδομένα του συμπλέγματός του και στη συνέχεια τα μεταδίδει συμπιεσμένα στους επικεφαλής ανώτερου επιπέδου μέχρι τα δεδομένα να προσεγγίσουν το σταθμό βάσης. Ένας γύρος διαβίβασης δεδομένων έχει ολοκληρωθεί, και το πρωτόκολλο συνεχίζει από το βήμα 4 για τον επόμενο γύρο.

9. Σε περίπτωση που υπάρχει αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου, λόγω μεταβολής της θέσης ενός κόμβου ή στη συνολική κατανάλωση της ενέργειας ενός κόμβου, ο BS χρησιμοποιεί ξανά τον αλγόριθμο Gauss για να καθορίσει την κατάλληλη εκλογή του επικεφαλής
10. Η εκτέλεση του πρωτοκόλλου τερματίζεται όταν όλοι οι κόμβοι του δικτύου ξεμείνουν από ενέργεια.

Το διάγραμμα ροής του ECHERP παρουσιάζεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20. Δημιουργία συστάδων και αποστολή δεδομένων στο ECHERP.

Ο αλγόριθμος Gauss όπως χρησιμοποιείται στο προτεινόμενο πρωτόκολλο παρουσιάζεται στο Σχήμα 21.

```

for ( $k = 1; k < m + 1; k++$ )
   $i\_max := \text{argmax} (i = k \dots m, \text{abs}(A[i, k]));$ 
  if ( $A[i\_max, k] = 0$ )
    error "Matrix is singular!";
  swap rows ( $k, i\_max$ );
  for ( $i = k + 1; i < m + 1; i++$ )
    for ( $j = k + 1; j < n + 1; j++$ )
       $A[i, j] := A[i, j] - A[k, j] \times (A[i, k]/A[k, k]);$ 
       $A[i, k] := 0;$ 

```

Σχήμα 21. Ο ψευδο-κώδικας του αλγόριθμου Gauss που χρησιμοποιείται στο ECHERP.

Το προτεινόμενο πρωτόκολλο εκτελεί την δημιουργία συστάδων μόνο μία φορά, στο αρχικό στάδιο. Ως εκ τούτου, το πρωτόκολλο μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο και ενέργεια που θα καταναλώνονταν για την εκ νέου δημιουργία. Η ενέργεια που δαπανάται από τους κόμβους στο δίκτυο μοντελοποιείται ως ένα γραμμικό σύστημα, ο BS χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Gauss προκειμένου να υπολογίσει την ενέργεια που καταναλώνεται από έναν κόμβο εάν γίνει επικεφαλής συστάδας στον επόμενο γύρο, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους πιθανούς συνδυασμούς. Ως εκ τούτου, επιλέγεται επικεφαλής ο κόμβος που ελαχιστοποιεί την συνολική κατανάλωση ενέργειας παρατείνοντας έτσι την διάρκεια ζωής στο δίκτυο.

Η διαδικασία του Gauss πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση, χρησιμοποιώντας την τεχνική εμπρός (forward elimination), μειώνεται η κατάταξη του συστήματος, που αντιπροσωπεύει την ενέργεια που δαπανάται. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των στοιχειωδών γραμμικών πράξεων. Στη δεύτερη φάση, χρησιμοποιείται η τεχνική υποκατάστασης προς τα πίσω (backward elimination) για να βρεθεί η λύση του παραπάνω συστήματος.

Η κατανάλωση ενέργειας από τον επικεφαλής βασίζεται στη λήψη δεδομένων που αποστέλλονται σε αυτόν από τους κόμβους του συμπλέγματος και τη διαβίβαση δεδομένων που αποστέλλονται από αυτόν στους επικεφαλής ανώτερου επίπεδου ή στο σταθμό βάσης. Η κατανάλωση ενέργειας ενός κόμβου βασίζεται στη μετάδοση δεδομένων που αποστέλλονται στον επικεφαλής.

Ας υποθέσουμε ότι ένα σύμπλεγμα αποτελείται από k κόμβους, ο πίνακας A αντιπροσωπεύει την κατανάλωση ενέργειας του κάθε κόμβου του συμπλέγματος. Το a_{ij} δηλώνει την ενέργεια που καταναλώνεται από τον κόμβο i , αν ο κόμβος j είναι ο επικεφαλής. Επιπλέον, το b_i δηλώνει την υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου i , ενώ το x_i εκφράζει τους γύρους που ο κόμβος i μπορεί να γίνει επικεφαλής. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζονται οι πίνακες B και X , έτσι ώστε $A \cdot X = B$, όπως φαίνεται στην εξίσωση 7.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \cdots & a_{2k} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & \cdots & a_{3k} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & \cdots & a_{4k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & a_{k3} & a_{k4} & \cdots & a_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}. \quad (7)$$

3.3 Εκτίμηση Επίδοσης του ECHERP

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδοση του ECHERP, έχουν γίνει προσομοιώσεις για πάνω από 50 διαφορετικές 100 m × 100 m τοπολογίες δικτύου. Η αρχιτεκτονική του δικτύου που λαμβάνεται υπόψη είναι η ακόλουθη:

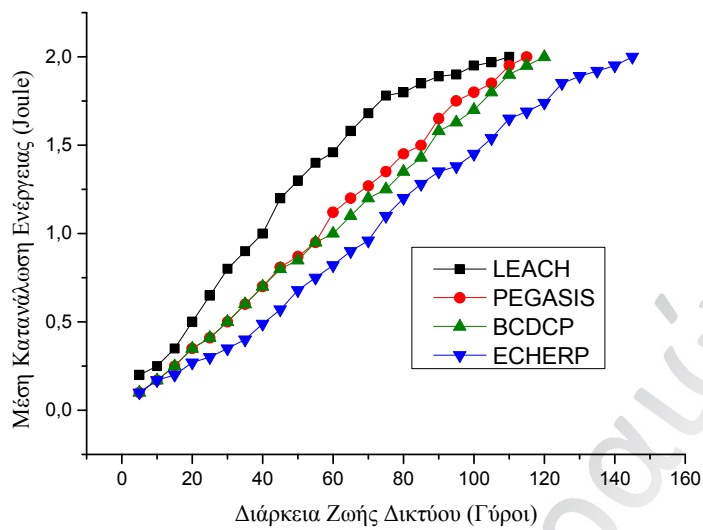
- Ένας σταθερός σταθμός βάσης βρίσκεται μακριά από το πεδίο των κόμβων.
- Οι κόμβοι έχουν περιορισμένη και ομοιόμορφη αρχική κατανομή ενέργειας.
- Κάθε κόμβος ανιχνεύει το περιβάλλον με σταθερό ρυθμό και έχει πάντα δεδομένα να στείλει στο σταθμό βάσης.
- Οι κόμβοι υποτίθεται ότι είναι ακίνητοι. Ωστόσο, το πρωτόκολλο μπορεί επίσης να υποστηρίξει την κινητικότητα των κόμβων.
- Το δίκτυο είναι ομοιογενές και όλοι οι κόμβοι είναι ισοδύναμοι, δηλαδή, έχουν την ίδια ικανότητα υπολογισμού και επικοινωνίας.
- Το δίκτυο αγνοεί την θέση των κόμβων, δηλαδή, η φυσική θέση των κόμβων δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων.
- Ο πομπός μπορεί να ρυθμίσει τον ενισχυτή ισχύος του με βάση την απόσταση μεταφοράς.

Η εν λόγω αρχιτεκτονική του δικτύου είναι χαρακτηριστική σε πολλές εφαρμογές των ιεραρχικών ασύρματων δικτύων αισθητήρων, όπως στην παρακολούθηση περιβάλλοντος και οικοσυστημάτων, στην επιτήρηση και αναγνώριση, οικιακού αυτοματισμού, στην βιοϊατρική εφαρμογή, στην παρακολούθηση αντικειμένων, στον έλεγχο της κυκλοφορίας, στην πυρανίχνευση, στον έλεγχο απογραφής, στην γεωργία, και στην διάγνωση μηχανικής βλάβης [27].

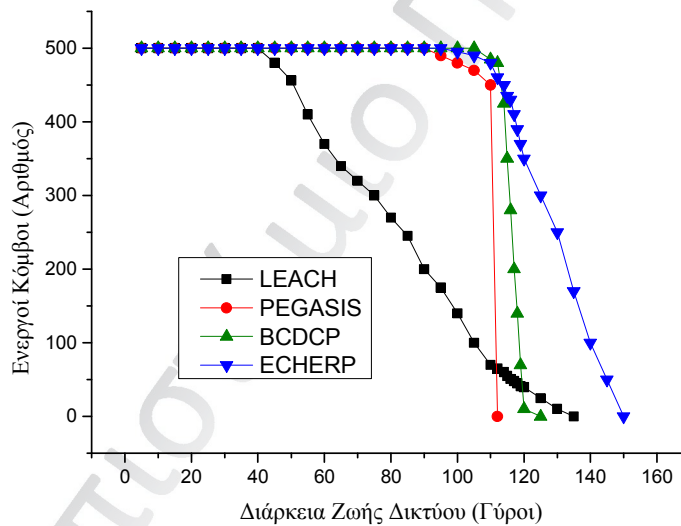
Σε μια πραγματική εφαρμογή το προτεινόμενο πρωτόκολλο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα παρακολούθησης πυρκαγιάς σε ένα σύνολο κτιρίων, όπου οι αισθητήρες σε κάθε κτίριο συγκεντρώνονται στο ίδιο σύμπλεγμα που αποστέλλει τα δεδομένα στο σύμπλεγμα του επόμενου κτιρίου.

Η προσομοίωση έγινε με την ανάπτυξη ενός προσαρμοσμένου περιβάλλοντος λογισμικού που βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης εξετάστηκαν 500 ομοιογενείς κόμβοι με αρχική ενέργεια 2J τυχαία διασκορπισμένοι σε ένα πεδίο 100 m². Ο σταθμός βάσης τοποθετείται στο σημείο (0, 150), έτσι ώστε να είναι τουλάχιστον 100 μέτρα μακριά από τον πλησιέστερο κόμβο, και τα πακέτα που αποστέλλονται έχουν μέγεθος 500 byte. Η κατανάλωση ενέργειας που οφείλεται στην επικοινωνία υπολογίζεται με βάση το ενεργειακό μοντέλο πρώτης τάξης που περιγράφηκε προηγούμενα. Υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος είναι ακίνητος και δημιουργεί ένα πακέτο δεδομένων ανά γύρο που πρέπει να αποσταλεί στον BS. Οι κόμβοι χωρίζονται σε ομάδες που αποτελούνται από επικεφαλής που στέλνουν δεδομένα σε επικεφαλής ανώτερου επιπέδου, ώστε να φτάσουν τελικά στο BS.

Τα Σχήματα 22 και 23 δείχνουν τη μέση κατανάλωση ενέργειας και τον αριθμό των κόμβων που παραμένουν ενεργοί όταν εφαρμόζονται τα πρωτόκολλα LEACH, PEGASIS, BCDCP και ECHERP. Ο λόγος του κόμβου N_r , όπως αναφέρεται στην (8) είναι ίσος με 1. Όπως δείχνουν τα σχήματα αυτά, η απόδοση του ECHERP είναι σημαντικά καλύτερη από τις επιδόσεις των LEACH, PEGASIS και BCDCP. Ακριβέστερα, στην περίπτωση των LEACH, PEGASIS και BCDCP, όλοι οι κόμβοι του δικτύου εξαντλούνται στο τέλος του 110^{ου}, 115^{ου} και 120^{ου} γύρου, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, όταν εφαρμόζεται το ECHERP, οι τελευταίοι κόμβοι εξαντλούνται στον 145^ο γύρο.



Σχήμα 22. Μέση κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.



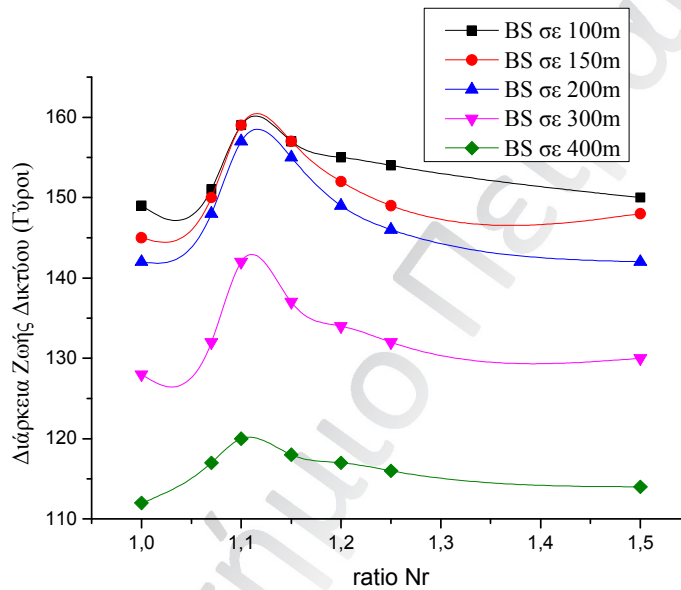
Σχήμα 23. Αριθμός ενεργών κόμβων σε σύγκριση με τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.

Επιπρόσθετα, η επίδοση του ECHERP αξιολογείται ως συνάρτηση της αναλογίας των κόμβων ανώτερου και κατώτερου επιπέδου. Πιο συγκεκριμένα, είναι αλήθεια ότι οι επικεφαλής ανώτερου επιπέδου μεταδίδουν όχι μόνο τα δικά τους δεδομένα στο σταθμό βάσης, αλλά διαβιβάζουν, επίσης, τα στοιχεία των χαμηλότερων επιπέδων που προορίζονται για το σταθμό βάσης. Ως εκ τούτου, έχουν υψηλότερη μέση κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους χαμηλότερου επιπέδου. Προκειμένου να συσχετιστεί η επίδοση του ECHERP με την κατανομή των κόμβων στην τοπολογία του δικτύου, ορίζεται η αναλογία κόμβων N_r ως εξής:

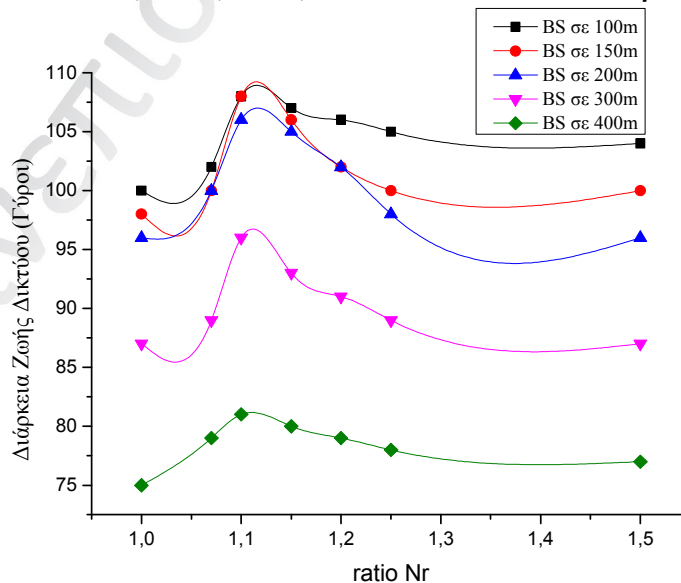
$$N_r = \frac{\sum n_u}{\sum n_l}, \quad (8)$$

όπου $\sum n_u$ είναι ο αριθμός των κόμβων του ανώτερου επιπέδου και $\sum n_l$ ο αριθμός των κόμβων του κατώτερου επιπέδου.

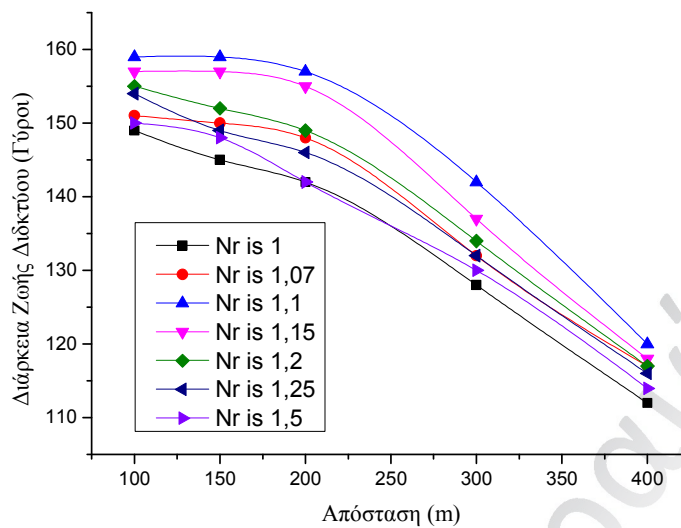
Οι δοκιμές προσομοίωσης έδειξαν ότι η καλύτερη ενεργειακή απόδοση επιτυγχάνεται όταν ο BS βρίσκεται 150 m μακριά από το κέντρο του πεδίου και ο αριθμός των κόμβων ανώτερου επιπέδου είναι κατά 10% μεγαλύτερος από τον αριθμό των κόμβων χαμηλότερου επιπέδου. Αυτό εμφανίζεται γραφικά στα Σχήματα 24 και 25.



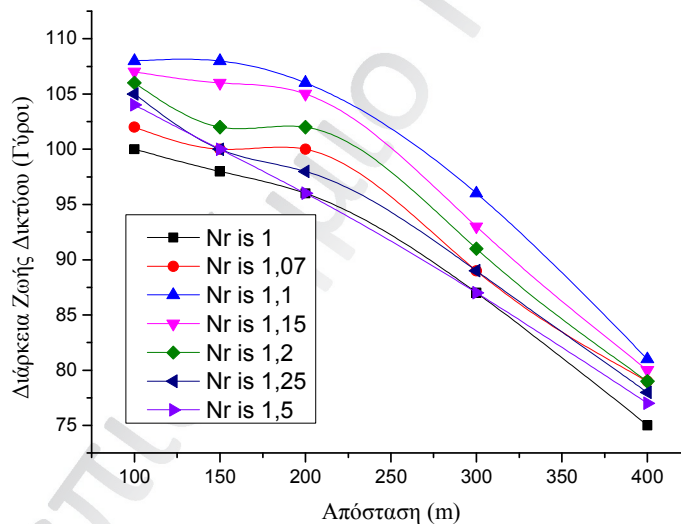
Σχήμα 24. Εξάντληση του τελευταίου κόμβου σε γύρους έναντι του N_r , όταν ο σταθμός βάσης βρίσκεται 100 m, 150 m, 200 m, 300 m και 400 m από το κέντρο του πεδίου.



Σχήμα 25. Εξάντληση του πρώτου κόμβου σε γύρους έναντι N_r όταν ο BS, βρίσκεται 100 m, 150 m, 200 m, 300 m και 400 m από το κέντρο του πεδίου.



Σχήμα 26. Η απόσταση του BS από το κέντρο της περιοχής όταν ο τελευταίος κόμβος μένει από ενέργεια σε γύρους, καθώς μεταβάλλεται η αναλογία κόμβων.



Σχήμα 27. Η απόσταση του BS από το κέντρο της περιοχής όταν ο πρώτος κόμβος μένει από ενέργεια σε γύρους, καθώς μεταβάλλεται η αναλογία κόμβων.

Μια πιο αναλυτική και σφαιρική σύγκριση των αποτελεσμάτων από τη χρήση των τεσσάρων πρωτοκόλλων μπορεί να επιτευχθεί εστιάζοντας στην εξάντληση του πρώτου και του τελευταίου κόμβου και στη μέση κατανάλωση ενέργειας. Ο Πίνακας 12 συνοψίζει τα αποτελέσματα, όσον αφορά αυτές τις μετρήσεις οι οποίες απεικονίζονται στα Σχήματα 22 και 23, στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής της ενέργειας.

<i>Απόσταση του σταθμού βάσης από το κέντρο του πεδίου (m)</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του πρώτου κόμβου (%)</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του τελευταίου κόμβου (%)</i>	<i>Μέση κατανάλωση ενέργειας (%)</i>	<i>Συγκρινόμενο πρωτόκολλο</i>
150	+98	+7.5	-25.05	LEACH
150	+5	+30	-19.12	PEGASIS
150	-10	+16	-17.25	BCDCP

Πίνακας 12. Σύγκριση του ECHERP με το LEACH, PEGASIS και BCDCP ως συνάρτηση της απόστασης του σταθμού βάσης από το κέντρο του πεδίου, όταν η αρχική ενέργεια του κόμβου έχει οριστεί σε 2 J.

Στους Πίνακες 12 και 13, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία απεικονίζονται στα Σχήματα 24 και 25, σχετικά με το σταθμό βάσης που βρίσκεται σε απόσταση 150 m και 300 m από το κέντρο του πεδίου. Στους δύο πίνακες, περιγράφεται ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο έχει καλύτερη επίδοση όταν η αναλογία κόμβων N_r ανώτερου επιπέδου με τους κόμβους χαμηλότερου επιπέδου είναι 1,1 για το δίκτυο.

<i>Αναλογία κόμβων N_r ανώτερου επιπέδου σε σχέση με τους κόμβους χαμηλότερου επιπέδου</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του πρώτου κόμβου (%)</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του τελευταίου κόμβου (%)</i>	<i>Μέση κατανάλωση ενέργειας (%)</i>
1	-	-	-
1.07	+2	+3.5	-2.5
1.1	+10	+10	-5.7
1.15	+8.2	+8	-4.5
1.2	+4	+4.8	-3.2
1.25	+2	+2.7	-2.1
1.5	+2	+2	-1.9

Πίνακας 13. Ποσοστό αλλαγής στην απόδοση του WSN με τη χρήση του ECHERP ως συνάρτηση του λόγου κόμβου N_r , όταν ο σταθμός βάσης βρίσκεται 150 m από το κέντρο του πεδίου.

<i>Αναλογία κόμβων N_r ανώτερου επιπέδου σε σχέση με τους κόμβους χαμηλότερου επιπέδου</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του πρώτου κόμβου (%)</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του τελευταίου κόμβου (%)</i>	<i>Μέση κατανάλωση ενέργειας (%)</i>
1	-	-	-
1.07	+2.1	+3.1	-2.2
1.1	+10	+10	-5.7
1.15	+6.8	+7	-3.5
1.2	+4.9	+4.6	-3.2
1.25	+2.1	+3.1	-2.5
1.5	+0.1	+1.5	-1.5

Πίνακας 14. Ποσοστό αλλαγής στην απόδοση του WSN με τη χρήση του ECHERP ως συνάρτηση του λόγου κόμβου N_r , όταν ο σταθμός βάσης βρίσκεται 300 m μακριά από το κέντρο του πεδίου.

Επιπλέον, στους Πίνακες 15 και 16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία απεικονίζονται στα Σχήματα 26 και 27, όταν το N_r έχει τιμές

1.1 και 1.5. Στους δύο πίνακες, φαίνεται ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο έχει καλύτερη επίδοση όταν η αναλογία κόμβων N_r ανώτερου επιπέδου με κόμβους χαμηλότερου επιπέδου είναι 1,1 για το δίκτυο.

<i>Απόσταση του σταθμού βάσης από το κέντρο του πεδίου (m)</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του πρώτου κόμβου (%)</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του τελευταίου κόμβου (%)</i>	<i>Μέση κατανάλωση ενέργειας (%)</i>
100	+8	+7	-4.1
150	+10	+10	-5.7
200	+10	+5.7	-4.8
300	+10	+10	-5.7
400	+8	+7	-4.1

Πίνακας 15. Ποσοστό αλλαγής στην επίδοση του WSN με τη χρήση του ECHERP ως συνάρτηση της απόστασης από το σταθμό βάσης όταν το N_r είναι 1.1.

<i>Απόσταση του σταθμού βάσης από το κέντρο του πεδίου (m)</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του πρώτου κόμβου (%)</i>	<i>Χρόνος εξάντλησης του τελευταίου κόμβου (%)</i>	<i>Μέση κατανάλωση ενέργειας (%)</i>
100	+4	+2	-2.5
150	+2	+2	-1.9
200	+0.1	+2	-1.2
300	+0.1	+1.5	-1.5
400	+2	+1.7	-1.7

Πίνακας 16. Ποσοστό αλλαγής στην επίδοση του WSN με τη χρήση του ECHERP ως συνάρτηση της απόστασης από το σταθμό βάσης όταν το N_r είναι 1.5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Προτεινόμενο Σχήμα Εξοικονόμησης Ενέργειας με Αυτοματοποιημένο Έλεγχο της Άρδευσης στη Γεωργία με τη Χρήση Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

4.1 Εισαγωγή

Η γεωργία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιβίωση και την οικονομία κάθε χώρας, δεδομένου ότι παρέχει τα απαραίτητα τρόφιμα για το σύνολο του πληθυσμού της χώρας, ενώ ταυτόχρονα αλληλεπιδρά με πολλές άλλες βιομηχανίες. Ειδικά στις αγροτικές περιοχές οι κάτοικοι εξαρτώνται άμεσα από τη γεωργία, δεδομένου ότι είναι ζωτικής σημασίας όχι μόνο για τη διατροφή τους αλλά και για το εμπόριο. Επιπλέον, ο ολοένα αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός απαιτεί μεγαλύτερες ποσότητες τροφίμων γεγονός που προϋποθέτει καλή διαχείριση και αποδοτική γεωργία.

Σε ολόκληρο τον κόσμο, η άρδευση είναι η κύρια χρήση του νερού. Σχεδόν το 60% του συνολικού νερού χρησιμοποιείται για την άρδευση χρησιμοποιώντας νερό από ποτάμια, λίμνες, δεξαμενές και πηγάδια. Χωρίς άρδευση, δεν θα μπορούσαν ποτέ να καλλιεργούνται κτήματα στην έρημο της Καλιφόρνια και το Ισραήλ. Η άρδευση υπάρχει για όσο διάστημα οι άνθρωποι καλλιεργούν τα φυτά. Η πρώτη εφεύρεση του ανθρώπου αφότου έμαθε πώς να καλλιεργεί φυτά από τους σπόρους ήταν πιθανώς ο κουβάς. Οι αρχαίοι πρέπει να είχαν δυνατές πλάτες για να μεταφέρουν τους κουβάδες με το νερό. Το πότισμα στα χωράφια εξακολουθεί να είναι μια κοινή μέθοδος άρδευσης μέχρι σήμερα. Χρησιμοποιούνται επίσης και πιο αποτελεσματικές και αυτοματοποιημένες μέθοδοι. Μία από τις πιο δημοφιλείς αυτές μεθόδους είναι το σύστημα άρδευσης με κινούμενα πιστόλια ψεκασμού ή με σταγόνες νερού σε σωλήνες που περιστρέφονται γύρω από μια κεντρική πηγή νερού. Τα χωράφια που αρδεύονται από τα συστήματα αυτά είναι εύκολα ορατά από τον αέρα ως πράσινοι κύκλοι. Υπάρχουν πολλές τεχνικές άρδευσης που χρησιμοποιούν σήμερα οι αγρότες, δεδομένου ότι υπάρχει πάντα η ανάγκη να βρουν πιο αποτελεσματικούς τρόπους για να χρησιμοποιούν το νερό για άρδευση.

Ορισμένες προσπάθειες για την αποδοτικότερη αξιοποίηση του νερού για τη φυτική παραγωγή βασίζονται στον πιο αποτελεσματικό και αποδοτικό τρόπο χρήσης των υδάτινων πόρων, διατηρώντας παράλληλα την υψηλή απόδοση της καλλιέργειας.

Οι παραγωγοί πρέπει να χρησιμοποιούν το νερό για να καλύψουν τις ανάγκες της καλλιέργειάς τους. Ωστόσο, πρέπει να συνειδητοποιήσουν ότι με τις τυπικές πρακτικές διαχείρισης, η απόδοση και τα κέρδη από τις αρδευόμενες καλλιέργειες θα μειωθούν σε σύγκριση με τις πλήρως αρδευόμενες καλλιέργειες. Επιπλέον, προκειμένου να διαχειρίζονται σωστά το διαθέσιμο νερό, οι παραγωγοί πρέπει να κατανοούν τις πραγματικές ανάγκες των καλλιέργειών σε νερό, πώς αυτές μπορούν να ενισχύσουν τη διαχείριση της άρδευσης, και πώς οι αλλαγές σε γεωπονικές πρακτικές μπορούν να επηρεάσουν τις ανάγκες σε νερό.

Η λανθασμένη χρήση του νερού κατά την κρίσιμη στιγμή μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή απόδοση. Οι καλλιέργειες, όπως το καλαμπόκι, έχουν καλύτερη απόδοση για κάθε ίντσα νερού που καταναλώνει η καλλιέργεια σε σύγκριση με άλλες

καλλιέργειες, όπως το χειμερινό σιτάρι ή η σόγια. Ωστόσο, καλλιέργειες όπως το καλαμπόκι απαιτούν περισσότερο νερό για την ανάπτυξη ή τη συντήρηση πριν από οποιαδήποτε παραγωγή. Το καλαμπόκι απαιτεί περίπου 10 ίντσες νερού για να παραχθεί η πρώτη αύξηση της απόδοσης σε σύγκριση με 4,5 και 7,5 ίντσες για το σιτάρι και σόγια. Αυτές οι καλλιέργειες απαιτούν επίσης λιγότερο νερό για τη μέγιστη παραγωγή.

Η ενσωμάτωση των αυτοματοποιημένων διαδικασιών στον τομέα της γεωργίας αυξάνει την παραγωγικότητα καθώς και την ποιότητα των προϊόντων, εκπληρώνοντας έτσι τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για υγιεινό και φθινό φαγητό σε όλο τον κόσμο. Ωστόσο, ένα αποτελεσματικό αυτοματοποιημένο σύστημα πρέπει να περιγράφει όλες τις κύριες διαδικασίες που εμπλέκονται στην αλυσίδα της γεωργίας. Η καλλιέργεια των φυτών, που μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο κρίσιμη διαδικασία, επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η τοπογραφία του περιβάλλοντος. Η επίτευξη των ιδανικών τιμών για αυτούς τους παράγοντες και η βελτιστοποίησή τους εξαρτώνται από τον τύπο των καλλιεργειών. Έτσι, ο σχεδιασμός ενός αποτελεσματικού συστήματος άρδευσης θα πρέπει να εξετάσει αυτούς τους παράγοντες για να επιτευχθεί μια επιτυχημένη και υψηλής ποιότητας συγκομιδή. Για παράδειγμα, η διαδικασία της ωρίμανσης των σταφυλιών επηρεάζεται από την φωτοσύνθεση που παράγει τη ζάχαρη που αποθηκεύεται στα σταφύλια. Στα σταφύλια η ισορροπία μεταξύ σακχάρου, οξέων, pH και καλίου είναι θεμελιώδους σημασίας για τον καθορισμό της ποιότητας του παραγόμενου οίνου. Αυτή η ισορροπία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα της άρδευσης των καλλιεργειών.

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων μπορεί να παρέχει ακριβείς και εξαιρετικά αποτελεσματικές υπηρεσίες στους γεωργούς. Έτσι, τα ασύρματα δίκτυα για να επιτύχουν μια καλύτερη συγκομιδή θα πρέπει να παρακολουθούν τους ανωτέρω περιγραφέντες παράγοντες [137]. Τα ασύρματα δίκτυα είναι σε θέση να συλλέγουν γρήγορα, να επεξεργάζονται και να μεταδίδουν τα κρίσιμα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα συλλέγονται από τους αισθητήρες που βρίσκονται στις καλλιεργούμενες εκτάσεις και μπορεί να χρησιμοποιηθούν από τους εμπειρογνώμονες ή από τα αυτοματοποιημένα συστήματα για τη λήψη αποφάσεων, όπως αν θα πρέπει να εφαρμοστεί άρδευση. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι ένα WSN δεν απαιτεί την εγκατάσταση καλωδίων, ελαχιστοποιείται η ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση. Για τους λόγους αυτούς, αναμένεται ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα γίνουν μια χαμηλού κόστους αλλά αποτελεσματική προσέγγιση για την παρακολούθηση των καλλιεργειών στο εγγύς μέλλον.

Επιπροσθέτως, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να συνδυαστούν με ένα σύστημα που διαχειρίζεται το νερό σε κάθε καλλιέργεια με βάση τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τα δεδομένα που αποστέλλεται από τους επιμέρους αισθητήρες. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα από τη χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των αυτοματοποιημένων συστημάτων στον τομέα της γεωργίας:

- Βελτιωμένη εκτίμηση και προγραμματισμός άρδευσης με βάση το διαθέσιμο νερό.
- Ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων ανθρώπινων πόρων, του χρόνου και της προσπάθειας στη γεωργική παραγωγή.
- Έγκαιρη ανίχνευση πιθανών πλημμυρών που θα μπορούσαν να είναι καταστροφικές για τις καλλιέργειες και τη σωστή άρδευση του νερού για την αποφυγή τέτοιων περιπτώσεων.

- Βελτίωση του συντονισμού μεταξύ των διαφόρων ομάδων εργασίας, δηλαδή των αγροτών και των τεχνικών βοηθών, σε μια σαφή κατανομή αρμοδιοτήτων.
- Δημιουργία γνώσης που συγκεντρώθηκε από τα δίκτυα αισθητήρων για μελλοντικές εφαρμογές στον τομέα της γεωργίας.

Τα μοντέλα άρδευσης που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα δεν χρησιμοποιούν ένα γεωργικό μοντέλο για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού για άρδευση. Επιπλέον, χρησιμοποιούν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για τη συλλογή δεδομένων από κάποια περιοχή χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την δρομολόγηση των δεδομένων από τους αισθητήρες προς το σταθμό βάσης, μια τεχνική που θα μπορούσε να προσφέρει βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση. Στο κεφάλαιο αυτό της διατριβής, προτείνουμε ένα σύστημα που λαμβάνει υπόψη τα ιστορικά δεδομένα και την αλλαγή του κλίματος για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού που χρειάζεται για άρδευση. Σε περίπτωση που η αλλαγή στις τιμές που συλλέγονται είναι πάνω από ένα όριο πρέπει να γίνει συχνότερη συλλογή δεδομένων για να ελαχιστοποιηθεί η απαραίτητη ποσότητα νερού. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση που η μεταβολή των τιμών είναι κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, τότε το χρονικό διάστημα για τη συλλογή δεδομένων μπορεί να αυξηθεί για την εξοικονόμηση ενέργειας, οδηγώντας σε μια παρατεταμένη διάρκεια ζωής του αισθητήρα.

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική, η οποία βασίζεται στη χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για την αυτοματοποιημένη διαχείριση της άρδευσης που αποσκοπεί στην επίτευξη της αποτελεσματικής και έγκαιρης άρδευσης των αγροτεμαχίων με μεγάλη ενεργειακή απόδοση λόγω της χρήσης ενός νέου πρωτοκόλλου δρομολόγησης.

4.2 Σχετική Βιβλιογραφία

Οι μελέτες στον τομέα της ασύρματων δικτύων στην γεωργία αποτελούνται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος ασχολείται με το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ενώ το δεύτερο μέρος εξετάζει την ανάπτυξη συστημάτων άρδευσης στη γεωργία που διαχειρίζονται το νερό που χρησιμοποιείται για άρδευση.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποιημένη άρδευση αγροτεμαχίων [138]. Αυτές οι εφαρμογές αντιμετωπίζουν την έλλειψη του νερού και την ανάγκη της σωστής διαχείρισης των υδάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή του νερού μόνο όταν αυτό είναι αναγκαίο, ενώ την ίδια στιγμή ελέγχουν την ποσότητα του νερού που καταναλώνεται.

Διάφορα μοντέλα, συστήματα και μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί για την άρδευση των αγροτεμαχίων. Στο [139] παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για να καθοδηγήσει την ανάπτυξη εφαρμογών για το γεωργικό τομέα που βασίζεται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αυτή η μέθοδος χωρίζει την ανάπτυξη των εφαρμογών στον τομέα της γεωργίας σε βήματα που παίρνουν ένα σήμα εισόδου, παράγουν μια έξοδο, και περιγράφει τις διαδικασίες που πρέπει να γίνουν από μια συγκεκριμένη ομάδα χρηστών. Συγκεκριμένα, ο σκοπός της μεθοδολογίας αυτής είναι να περιγράψει τον κύκλο ζωής των εφαρμογών με προσδιορισμό στις αρμοδιότητες για τους χρήστες.

Στο [140] προτείνεται ένα σύστημα παρακολούθησης που βασίζονται σε υπολογιστή για συνεχείς μετρήσεις του υδάτινου δυναμικού του εδάφους. Αυτό το μοντέλο μετρά την ποσότητα του νερού κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Τα αποτελέσματα

χρησιμοποιούνται για να αποφασιστεί η ποσότητα του νερού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για άρδευση.

Οι έμμεσες εκτιμήσεις που χρησιμοποιούν μετρήσεις της υγρασίας του εδάφους περιγράφονται στο [141]. Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις στη διάρκεια του χρόνου για την εκτίμηση της ποσότητας του νερού που απαιτείται για άρδευση. Επιπλέον, στο [142] παρουσιάζεται ένα σύστημα ελέγχου για τη διαχείριση άρδευσης σε μηλιές. Σε αυτό το μοντέλο το νερό που απαιτείται για την άρδευση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα που ενεργοποιεί το αυτόματο σύστημα άρδευσης του εδάφους.

Στο [143] αξιολογείται ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου άρδευσης για τη διαχείριση των εγκαταστάσεων εμπορευματοκιβωτίων θερμοκηπίου. Το σύστημα αποτελείται από αισθητήρες υγρασίας εδάφους, μια διεπαφή εισόδου/εξόδου, έναν υπολογιστή και αισθητήρες. Μια αξιολόγηση του συστήματος ελέγχου εξετάζει την χρήση του σε ένα θερμοκήπιο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα ελέγχου είναι αξιόπιστο κατά την εφαρμογή του νερού που ανταποκρίνεται προς τις απαιτήσεις των φυτών. Αναφέρεται ότι οι μετρήσεις της ποσότητας του νερού του υποστρώματος με τη χρήση αισθητήρων παρουσίασε σημαντική δυσκολία.

Στο [144] περιγράφεται ο σχεδιασμός ενός λογισμικού υποστήριξης λήψης αποφάσεων και η ενσωμάτωσή του με ένα WSN για τον έλεγχο άρδευσης μέσω Bluetooth. Η πρώτη απαίτηση του συστήματος είναι η άρδευση από ένα συμβατικό μηχανικό και υδραυλικό σύστημα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο για ατομικό έλεγχο της κεφαλής ψεκασμού. Θα πρέπει να γίνεται συνεχώς παρακολούθηση της γεωγραφικής θέσης της άρδευσης από ένα σύστημα. Μόλις το μηχανήμα γίνει ελεγχόμενο και προσιτό στην πλοήγησή του, το σύστημα αποφασίζει το χρόνο της άρδευσης κάθε μπεκ ψεκασμού σε κάθε θέση.

Στο [145] χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο TDMA για τη συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων όπως η υγρασία του εδάφους και η θερμοκρασία. Οι αισθητήρες βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας και μεταβαίνουν σε ενεργή κατάσταση για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και του επιπέδου υγρασίας του εδάφους. Ο σταθμός βάσης στέλνει αιτήματα στους κόμβους για να συλλέξουν τη θερμοκρασία και το επίπεδο υγρασίας σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Οι κόμβοι ανταποκρίνονται σε αυτό το αίτημα στέλνοντας την τιμή της υγρασίας και της θερμοκρασίας της περιοχής. Οι άλλοι κόμβοι παραμένουν σε κατάσταση αδράνειας. Μετά την αποστολή των απαιτούμενων δεδομένων οι κόμβοι επιστρέφουν στην κατάσταση αδράνειας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλους τους κόμβους. Με τη χρήση της άμεσης μεθόδου επικοινωνίας κάθε κόμβος αποστέλλει τα δεδομένα του απευθείας προς τον σταθμό βάσης.

Εκτός από τα παραπάνω, υπάρχουν επίσης κάποιες πρόσφατες εργασίες οι οποίες περιγράφουν την ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου για τη διαχείριση της άρδευσης με χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Στο [146], περιγράφεται ένα σύστημα άρδευσης χρησιμοποιώντας ένα κατανεμημένο WSN. Οι συνθήκες του πεδίου παρακολουθούνται από τους αισθητήρες που διανέμονται σε όλο το πεδίο με βάση το έδαφος, και σε τακτά χρονικά διαστήματα δείγματα μεταδίδονται ασύρματα σε ένα σταθμό βάσης. Στο [147] παρουσιάζεται ένα αρδευτικό σύστημα που βασίζεται σε ασαφή τεχνολογία ελέγχου και WSN. Ο κόμβος παίρνει το σφάλμα της υγρασίας του εδάφους και το ποσοστό αλλαγής ως είσοδο και το ποσό της ζήτησης ύδατος για τις καλλιέργειες υπό ορισμένες συνθήκες υγρασίας του εδάφους. Στο [148] παρουσιάζεται ένα σύστημα ελέγχου άρδευσης και αυτοματισμού χρησιμοποιώντας DTMF. Το σύστημα σηματοδότησης έχει τον έλεγχο της ροής του νερού για κανονική ή στάγδην άρδευση. Στο [149] παρουσιάζεται μια μέθοδος βαθμονόμησης

για την ανίχνευση περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους με βάση την ανταλλαγή πληροφοριών. Το σύστημα είναι μια αποτελεσματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό της ισορροπίας ανάμεσα στην ακρίβεια βαθμονόμησης του αισθητήρα υγρασίας και την επένδυση της γεωργικής παραγωγής. Όλες αυτές οι προσπάθειες προτείνουν συστήματα που είναι σε θέση να παρέχουν υπηρεσίες άρδευσης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη σε βάθος η αποτελεσματική διαχείριση του νερού που χρησιμοποιείται.

4.3 Επισκόπηση Προτεινόμενου Συστήματος

Το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιεί παραμέτρους, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και ο άνεμος, για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού που είναι απαραίτητη για τη σωστή άρδευση. Επίσης, κατά την αξιολόγηση των κλιματικών παραμέτρων υπολογίζει τις προηγούμενες τιμές αυτών των παραμέτρων και τις συγκρίνει με τις τρέχουσες για αποτελεσματικότερες αποφάσεις. Για παράδειγμα, εάν η τιμή της θερμοκρασίας την προηγούμενη ημέρα μειώθηκε τότε απαιτείται λιγότερο νερό. Με βάση τις προηγούμενες τιμές η απαιτούμενη ποσότητα θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη. Έτσι, μπορεί να εξοικονομηθεί νερό σε περίπτωση υψηλού ρυθμού μεταβολής αυτών των περιβαλλοντικών τιμών. Η συνολική πολυπλοκότητα του μοντέλου είναι $2n + n$, όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων του συμπλέγματος.

Το προτεινόμενο αυτοματοποιημένο σύστημα διαχείρισης άρδευσης, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, έχει ως στόχο την αυτόματη άρδευση των αγροτεμαχίων με πιθανώς μη ομοιόμορφη σύνθεση, όπως αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 28, το οποίο αποτελείται από πέντε γειτονικά αγροτεμάχια που έχουν διαφορετικές καλλιέργειες.



Σχήμα 28. Γειτονικά αγροτεμάχια που φιλοξενούν διαφορετικά είδη καλλιέργειών.

Το προτεινόμενο αυτοματοποιημένο σύστημα διαχείρισης άρδευσης αποτελείται από δύο υποσυστήματα. Το πρώτο υποσύστημα αφορά το WSN το οποίο συλλέγει τα δεδομένα από τα καλλιεργημένα χωράφια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29α. Το δεύτερο υποσύστημα περιλαμβάνει το σύστημα λήψης αποφάσεων, το διάγραμμα ροής του οποίου απεικονίζεται στο Σχήμα 29β.

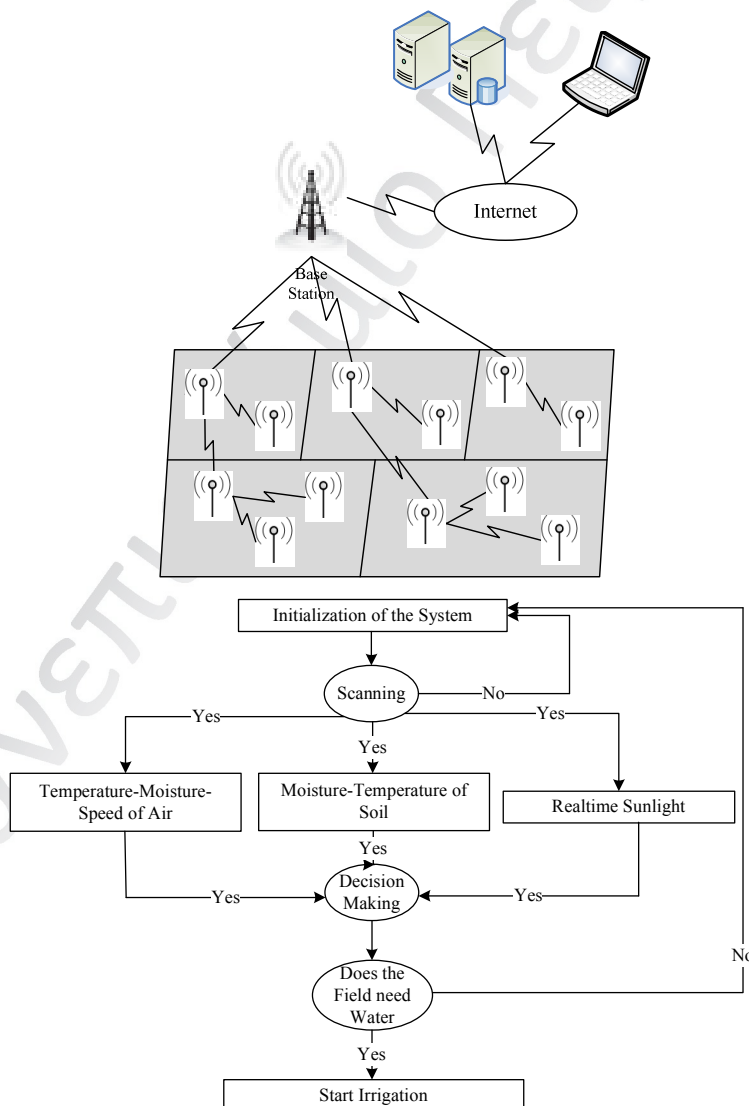
Η προτεινόμενη δομή του WSN περιλαμβάνει μια σειρά από αισθητήρες που παρακολουθούν την υγρασία και τη θερμοκρασία του εδάφους, την υγρασία, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα, και τη διάρκεια της ηλιοφάνειας ανά ημέρα. Οι επιμέρους αισθητήρες τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις στα χωράφια. Οι πληροφορίες που συλλέγονται αποστέλλονται σε ένα σταθμό βάσης.

Ειδικότερα, οι αισθητήρες στο πεδίο σαρώνουν τις καιρικές συνθήκες περιοδικά (π.χ. κάθε 10s). Τα δεδομένα αποστέλλονται μέσω ενός ραδιοπομπού τεχνολογίας ZigBee στη βάση του υπολογιστή στο δέκτη. Οι αισθητήρες είναι αυτοτροφοδοτούμενοι από

μπαταρία. Ένα σύνολο αισθητήρων χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της υγρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας. Επίσης, αισθητήρες υγρασίας χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους και την ταχύτητα του ανέμου.

Η κύρια εφαρμογή βασίζεται στα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες. Στη συνέχεια, δρα με βάση τη διαμόρφωση που εφαρμόζεται στο σύστημα. Αυτή η διαμόρφωση γίνεται με βάση τις απαιτήσεις για τον τόπο που πρέπει να παρακολουθείται. Αυτό σχετίζεται με το είδος των καλλιεργειών που φυτεύονται στο πεδίο (καλαμπόκι, πατάτες, κλπ.), τα χημικά συστατικά του εδάφους (δηλ. περιεκτικότητα σε νάτριο) και εποχή του έτους (δηλ. χειμώνας, καλοκαίρι κλπ).

Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί από παραγωγούς, οι οποίοι θέλουν να παρακολουθούν την κατάσταση της υγρασίας του εδάφους στην οθόνη του υπολογιστή τους στο σπίτι τους σε διάφορες περιοχές, να ακολουθούν τις πληροφορίες για τον καιρό και να παρακολουθούν λεπτομερώς την άρδευση. Κατά τη διάρκεια της άρδευσης, μπορεί επίσης να θέλουν να δουν την τρέχουσα θέση της άρδευσης. Για παράδειγμα, εάν ένα σύννεφο βροχής περνάει πάνω από το πεδίο, το λογισμικό θα πρέπει να είναι σε θέση να ρυθμίζει αυτόματα την ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 29. α) Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του WSN, β) Το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου συστήματος λήψης αποφάσεων.

Στο προτεινόμενο σύστημα, το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται για την αποστολή της κίνησης από τις πηγές στον προορισμό προϋποθέτει τη συνύπαρξη ενός σταθμού βάσης και ενός συνόλου ομογενών κόμβων αισθητήρων. Αυτοί οι κόμβοι κατανέμονται τυχαία εντός μιας περιοχής. Ο σταθμός βάσης βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση μακριά από το πεδίο. Τόσο ο σταθμός βάσης όσο και το σύνολο των κόμβων αισθητήρων θεωρούνται σταθεροί. Ο σταθμός βάσης είναι σε θέση να μεταδώσει με αρκετά υψηλή ισχύ σε όλους τους κόμβους του δικτύου, λόγω της απεριόριστης παροχής ρεύματος. Επιπλέον, οι αισθητήρες είναι ιεραρχικά οργανωμένοι σε συστάδες.

4.3.1 Σύστημα Άρδευσης και Λήψης Αποφάσεων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στον τομέα της γεωργίας, θα πρέπει να γίνετε αποτελεσματική διαχείριση του νερού, που χρησιμοποιείται, το οποίο συνεπάγεται ότι το νερό που απαιτείται για την άρδευση πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Το προτεινόμενο σύστημα βασίζεται στις πληροφορίες που αποστέλλονται από τους αισθητήρες και υπολογίζει την ποσότητα του νερού που απαιτείται. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την αποστολή στο σταθμό βάσης της υγρασίας και της θερμοκρασίας του εδάφους, της υγρασίας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα, και τη διάρκεια της ηλιοφάνειας ανά ημέρα. Το προτεινόμενο σύστημα βασίζεται σε αυτές τις τιμές και υπολογίζει την ποσότητα νερού για άρδευση. Επιπλέον, για να είναι πιο ακριβές το σύστημα υπολογίζει τα ιστορικά δεδομένα για την ποσότητα άρδευσης που χρησιμοποιήθηκαν την προηγούμενη περίοδο για να ρυθμίσει την ποσότητα του νερού που χρειάζεται για άρδευση. Η σύγκριση μεταξύ της τρέχουσας και της προηγούμενης ποσότητας νερού είναι αναγκαία για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόφαση.

Οι κύριοι παράμετροι που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή είναι οι εξής: το κλίμα (η ένταση της βροχής, η υγρασία, ο άνεμος, η εξάτμιση) και το είδος της καλλιέργειας.

Ένας σημαντικός παράγοντας για την εφαρμογή ενός συστήματος άρδευσης είναι η γνώση της υγρασίας του εδάφους κατά την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου, η οποία εξαρτάται κυρίως από τις καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του προηγούμενου χειμώνα. Επιπρόσθετα, η γνώση της ποσότητας του νερού που αποθηκεύεται σε υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, η οποία είναι διαθέσιμη για τα φυτά μέσω της τριχοειδούς ανόδου είναι κρίσιμη για μια σωστή απόφαση.

Προκειμένου να ληφθεί απόφαση για τις αρδευτικές ανάγκες ενός συγκεκριμένου αγροτεμαχίου, είναι απαραίτητο να προσθέσουμε το χρήσιμο νερό από τη βροχή Pe , την αποθηκευμένη υγρασία SM στη ζώνη του εδάφους κατά την έναρξη της βλαστικής περιόδου, την εξατμισοδιαπνοή Etc και το νερό που φθάνει με τριχοειδή ανύψωση από το έδαφος GW . Αν το χώμα είναι συνεκτικό, το νερό μπορεί εύκολα να αυξηθεί πάνω από το επίπεδο του εδάφους, αλλά ο ρυθμός αύξησης των τριχοειδών είναι αργή. Αντιθέτως, αν το έδαφος είναι ελαφρύ, τότε το ύψος της τριχοειδούς ανόδου είναι περιορισμένο, αλλά ο ρυθμός ανάπτυξης είναι γρήγορος. Εάν τα ποσοστά αυτά είναι επαρκή για να καλύψουν τις ανάγκες άρδευσης του φυτού υπάρχει σταθερή ανάπτυξη της καλλιέργειας και ισχύουν τα εξής:

$$Etc - (Pe + SM + GW) = 0. \quad (9)$$

Εάν αυτές οι πηγές νερού δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών για φυσιολογική ανάπτυξη, η ισορροπία του νερού είναι ελλειμματική. Για να επιτευχθεί ομαλή ανάπτυξη και κανονική απόδοση, οι καλλιέργειες θα πρέπει να παρέχονται με ποσότητα ύδατος IRn ίση με αυτή που απαιτείται:

$$IRn = Etc - (Pe + SM + GW) . \quad (10)$$

Σε αυτό το κεφάλαιο, η κύρια εστίαση είναι σχετικά με τη χρήση ενός WSN για τη συλλογή δεδομένων που χρησιμοποιούν οι αισθητήρες και την αποστολή των δεδομένων σε μια βάση. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθούν από ένα σύστημα για την αυτόματη άρδευση των πεδίων. Ως εκ τούτου, στην εργασία αυτή τα Pe , SM , η GW δεν αναλύονται περαιτέρω και οι τιμές τους θεωρούνται ότι παρέχονται με τη χρήση των αισθητήρων τάσεως.

Ως εκ τούτου, τα Pe , SM , GW συνοψίζονται σε μια τιμή k , όπως παρουσιάζεται:

$$Pe + SM + GW = k . \quad (11)$$

Σε αυτό το σύστημα θεωρούμε ότι το k ισούται με το συνολικό ποσό της βροχής στην περιοχή που εκφράζεται σε mm/ημέρα.

Παρ' όλα αυτά, η τιμή της εξατμισοδιαπνοής Etc που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το άθροισμα της εξάτμισης και της διαπνοής των φυτών από την επιφάνεια της γης προς την ατμόσφαιρα αναλύεται περαιτέρω και υπολογίζεται με βάση τους αισθητήρες που βρίσκονται στο πεδίο. Η εξάτμιση είναι σχετική με την ποσότητα του νερού που αποστέλλεται στον αέρα από πηγές όπως το έδαφος. Η διαπνοή είναι η ποσότητα του νερού σε ένα φυτό και την επακόλουθη απώλεια του ύδατος υπό μορφή ατμών μέσω των στομάτων από τα φύλλα.

Ο ρυθμός της εξατμισοδιαπνοής εξαρτάται από τους κλιματικούς παράγοντες (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου, υγρασία). Ως εκ τούτου, η αύξηση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα του ανέμου ή στο ποσό των αποτελεσμάτων του ηλιακού φως προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της εξατμισοδιαπνοής. Από την άλλη πλευρά, η υγρασία έχει το αντίθετο αποτέλεσμα.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση της ποσότητας του νερού κατηγοριοποιούνται σε εμπειρικά, υπολογιστικά και συνδυαστικά.

Τα εμπειρικά βασίζονται στην θερμοκρασία του αέρα [150, 151]. Απαιτούν σαν είσοδο μόνο την τιμή της θερμοκρασίας του αέρα για να υπολογίσουν το νερό, χωρίς τη χρήση άλλων παραμέτρων, όπως η υγρασία ή η ταχύτητα του ανέμου. Επιπλέον, βασίζονται στις μέσες τιμές της θερμοκρασίας και μπορεί να παρέχουν περιορισμένα αποτελέσματα αν η περίοδος χρήσης είναι μικρότερη από μήνα. Τα υπολογιστικά βασίζονται σε ηλιακή ακτινοβολία [152, 153]. Χρησιμοποιούν την τιμή της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας για να εκτιμήσουν το νερό χωρίς να ληφθούν υπόψη άλλες παράμετροι, όπως υγρασία ή θερμοκρασία. Μπορούν να έχουν περιορισμένη απόδοση, αν τα αγροτεμάχια βρίσκονται σε ένα λόφο. Τα συνδυαστικά μπορεί να παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα, αφού υπολογίζουν όλες τις περιβαλλοντικές παράμετροι για την εκτίμηση του νερού για άρδευση.

Στο [154], προτείνεται ένα συνδυαστικό μοντέλο για ύδρευση με βάση παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου. Αυτό το μοντέλο είναι γενικό και δεν υπολογίζει το είδος των καλλιεργειών για να εκτιμήσει την ποσότητα νερού που απαιτείται. Στο [155], προτείνεται ένα μοντέλο που είναι βελτίωση αυτού

του μοντέλου και στηρίζεται στο είδος των καλλιιεργειών. Ωστόσο, και τα δύο αυτά μοντέλα προσφέρουν υψηλή πολυπλοκότητα και κάνουν δύσκολη τη χρήση τους σε περίπτωση με συχνές αλλαγές στις παραμέτρους. Ως εκ τούτου, στο [156], προτείνεται ένα μοντέλο που βασίζεται στα προηγούμενα και είναι πιο ευέλικτο, λόγω της χαμηλής πολυπλοκότητας. Το μοντέλο δεν χρησιμοποιεί την αντίσταση της επιφάνειας για να εκτιμήσει το νερό.

Σε αυτή την έρευνα χρησιμοποιείται το μοντέλο που προτείνεται στο [156] για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Η εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με αυτό το μοντέλο υπολογίζεται ως εξής:

$$Etc = \left(a_e \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda} \right) kg / m^2 day \quad (12)$$

όπου

a_e είναι μια σταθερή τιμή και θεωρείται ότι είναι ίση με 1,3.

Το Δ συμβολίζει την καμπύλη κλίσης του κορεσμού των ατμών και υπολογίζεται με βάση πληροφορίες από τους αισθητήρες για την θερμοκρασία του αέρα και τη πίεση κορεσμού του νερού ως εξής:

$$\Delta = \left(\frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237.3)^2} \right) hPa / ^\circ C, \quad (13)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του αέρα και e_s είναι η θερμοκρασία του εδάφους και εκφράζεται ως εξής:

$$e_s = \left(6.11 \cdot 2.718^{\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}} \right) hPa. \quad (14)$$

Το γ παριστάνει τον παράγοντα θερμοκρασία αέρα που εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα σε ύψος 2m που συλλέγεται από τον αισθητήρα ως εξής:

$$\gamma = (0.67 \cdot (1 + 0.33 \cdot u_2)) hPa / ^\circ C, \quad (15)$$

όπου u_2 είναι η ταχύτητα του αέρα σε ύψος 2 μέτρα.

Το R_n εκφράζει τη συνολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας που εξαρτάται από την ακτινοβολία μικροκυμάτων που έχει σταλεί από τον αισθητήρα.

$$R_n = (S_n - L_n) kj / m^2 day, \quad (16)$$

όπου S_n είναι το αλγεβρικό άθροισμα της εισερχόμενης μείον την ανακλώμενη ακτινοβολία μικροκυμάτων και L_n είναι η καθαρή ακτινοβολία που βασίζονται στην

υγρασία του εδάφους και του αέρα και οι τιμές της υπολογίζονται από τους αισθητήρες.

Τα χωράφια κατηγοριοποιούνται με βάση γεωγραφικές, τοπολογικές και κλιματικές πληροφορίες, καθώς και με τον τύπο των καλλιεργειών. Στο Σχήμα 28 βλέπουμε ένα παράδειγμα όπου περιγράφονται πέντε διαφορετικά αγροτεμάχια με διάφορες καλλιέργειες. Τα χωράφια στη συνέχεια χωρίζονται σε ομάδες και τοποθετούνται αισθητήρες σε κάθε ομάδα. Για παράδειγμα, το αγροτεμάχιο Α μπορεί να διαιρεθεί σε δύο συστάδες. Στη συνέχεια με βάση τα ανωτέρω χαρακτηριστικά κάθε συστάδας και τα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες υπολογίζεται η ποσότητα του νερού που χρειάζεται QW_i σε κάθε συστάδα i χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$QW_i = (Etc - k) \text{ kg / m}^2 \text{ day} . \quad (17)$$

$$QW_i = \left(a_e \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda} - k \right) \text{ kg / m}^2 \text{ day} . \quad (18)$$

Οι τιμές των ανωτέρω εξισώσεων συλλέγονται από τους αισθητήρες που βρίσκονται στα αγροτεμάχια. Το προτεινόμενο σύστημα για την εξοικονόμηση νερού για άρδευση κάνει μια ρύθμιση της ποσότητας του νερού όπως υπολογίζεται στην εξίσωση 18 με βάση τις πληροφορίες από τους αισθητήρες. Το σύστημα υπολογίζει τη μέση τιμή της υγρασίας και της θερμοκρασίας του εδάφους, την υγρασία, την θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα, και τη διάρκεια της ηλιοφάνειας σε ώρες ανά ημέρα για την συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή σε προηγούμενες περιόδους.

Ως εκ τούτου, η μέση τιμή της ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται στις προηγούμενες περιόδους υπολογίζεται ως εξής:

$$QW_{history} = \left(a_e \frac{\Delta'}{\Delta' + \gamma'} \cdot \frac{R'_n}{\lambda'} - k' \right) \text{ kg / m}^2 \text{ day} , \quad (19)$$

όπου

Το Δ' συμβολίζει την καμπύλη της κλίσης του κορεσμού των ατμών και υπολογίζεται με βάση τις πληροφορίες σε προηγούμενες περιόδους της θερμοκρασίας του αέρα και της πίεσης κορεσμού του νερού.

Το γ' αντιπροσωπεύει τον παράγοντα δροσερό αέρα που εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m που συλλέγεται την προηγούμενη περίοδο.

Το R'_n εκφράζει τη συνολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας που εξαρτάται από την ακτινοβολία μικροκυμάτων που έχει σταλεί την προηγούμενη περίοδο.

Επιπλέον, ο ρυθμός μεταβολής στις τιμές κατά τη διάρκεια των τελευταίων ημερών υπολογίζεται ως εξής:

$$QW_{rate} = \left(\frac{a_e \frac{\Delta''}{\Delta'' + \gamma} \cdot \frac{R_n''}{\lambda''} - k''}{a_e \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda} - k} \right) kg / m^2 day, \quad (20)$$

όπου

Το Δ'' συμβολίζει την καμπύλη της κλίσης του κορεσμού των ατμών και υπολογίζεται με βάση τις πληροφορίες κατά τη διάρκεια των τελευταίων ημερών σχετικά με την θερμοκρασία του αέρα και της πίεσης κορεσμού του νερού.

Το γ'' αντιπροσωπεύει τον παράγοντα δροσερό αέρα και εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m κατά τη διάρκεια των τελευταίων ημερών.

Το R_n'' εκφράζει τη συνολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας και εξαρτάται από την ακτινοβολία μικροκυμάτων κατά τη διάρκεια των τελευταίων ημερών.

Ως εκ τούτου, η ποσότητα του νερού που χρειάζεται για άρδευση $QW_{required}$ υπολογίζεται ως εξής:

$$QW_{required} = QW_i + (QW_{history} - QW_i) / QW_{history} + QW_{rate} kg / m^2 day. \quad (21)$$

Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί, εάν δεν είναι διαθέσιμες οι ιστορικές τιμές και να χρησιμοποιήσει μόνο τις πληροφορίες που παρέχονται από τους αισθητήρες.

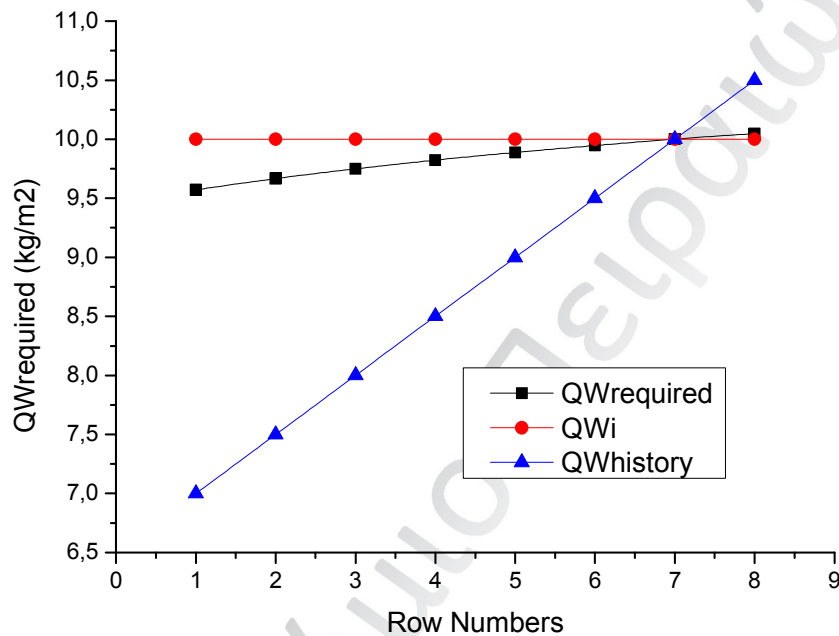
4.3.2 Μελέτη Χρήσης

Είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι μέσες τιμές της υγρασίας και της θερμοκρασίας του εδάφους, της υγρασίας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα, και της διάρκειας της ηλιοφάνειας ανά ημέρα για τη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και σε προηγούμενες περιόδους. Ως εκ τούτου, οι μέσες τιμές για μια συγκεκριμένη περιοχή κατά τη διάρκεια του ίδιου μήνα για τα προηγούμενα χρόνια θα μπορούσε να παράσχει πληροφορίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτές οι μέσες τιμές σε συνδυασμό με τις τιμές από τους αισθητήρες θα μπορούσαν να παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα για την ποσότητα του νερού που απαιτείται για άρδευση.

Το προτεινόμενο μοντέλο είναι βελτίωση αυτού που προτείνεται στο [156], καθώς υπολογίζει το νερό για άρδευση με βάση τις προηγούμενες τιμές που συλλέγονται από τους αισθητήρες. Ένα παράδειγμα που αποδεικνύει την αποτελεσματική διαχείριση του ύδατος του συστήματος είναι η περίπτωση που για ένα συγκεκριμένο πεδίο η μέση τιμή νερού που απαιτείται για άρδευση με βάση την εξίσωση 14 είναι 10 kg/m² ανά ημέρα. Αυτή η ποσότητα νερού μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, εάν υπολογιστούν τα ιστορικά δεδομένα. Εάν χρησιμοποιηθούν τα ιστορικά δεδομένα, τότε η μέση τιμή για άρδευση θα μπορούσε να είναι μικρότερη από τις τρέχουσες μετρήσεις. Εάν η τιμή είναι 5 kg/m² το νερό που θα χρησιμοποιηθεί για άρδευση θα είναι λιγότερο από ότι το τρέχον ποσό από την εξίσωση 14, και είναι ως εξής:

$$QW_{required} = (QW_{history} - QW_i) / QW_{history} = (5 - 10) / 5 = -1 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ day}, \quad (22)$$

Έτσι, το νερό μπορεί να διαχειριστεί πιο αποτελεσματικά. Επιπλέον, στην περίπτωση που ο μέσος ρυθμός μεταβολής του νερού που απαιτείται για άρδευση τον προηγούμενο μήνα είναι $-1 \text{ kg}/\text{m}^2$ και η τρέχουσα νερού που απαιτείται για την άρδευση είναι $10 \text{ kg}/\text{m}^2$ τότε απαιτείται λιγότερο νερό για άρδευση.

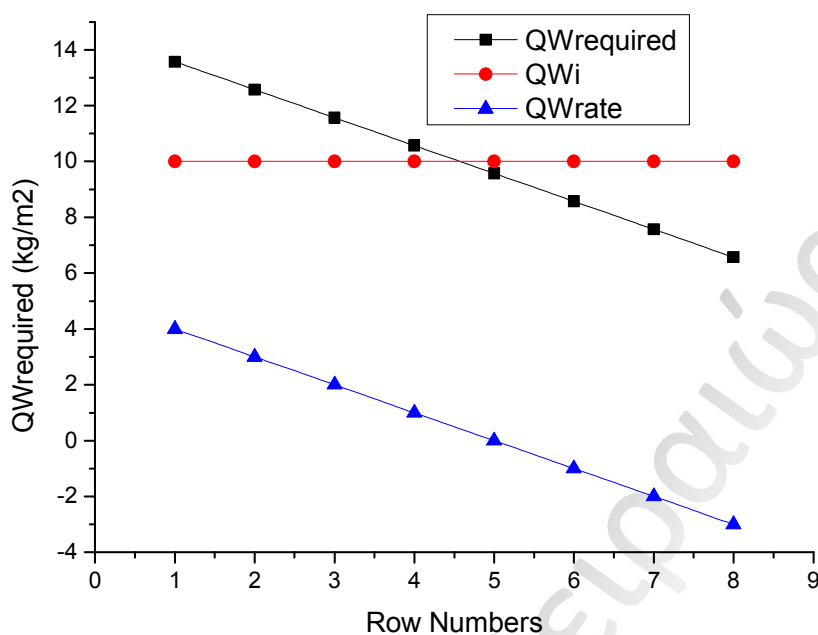


Σχήμα 30. Η ποσότητα νερού που απαιτείται με βάση τα ιστορικά $QW_{history}$ και πραγματικά δεδομένα QW_i .

$QW_{required}$	QW_i	$QW_{history}$	QW_{rate}
9.57	10	7	0
9.6	10	7.5	0
9.78	10	8	0
9.8	10	8.5	0
9.97	10	9	0
10	10	9.5	0
10.07	10	10	0
10.09	10	10.5	0

Πίνακας 17: Η ποσότητα του νερού που απαιτείται, τα δεδομένα από τους αισθητήρες, η ιστορική ποσότητα του νερού και ο ρυθμός.

Στο Σχήμα 30, φαίνεται η ποσότητα του νερού που απαιτείται για μια συστάδα σε σχέση με την ποσότητα της ιστορική ποσότητας του νερού και του νερού με βάση τα δεδομένα του αισθητήρα.



Σχήμα 31. Η ποσότητα νερού που απαιτείται με βάση το ρυθμό και τα δεδομένα από τους αισθητήρες.

$QW_{required}$	QW_i	$QW_{history}$	QW_{rate}
13.5	10	7	4
12.5	10	7	3
11.5	10	7	2
10.5	10	7	1
9.5	10	7	0
8.5	10	7	-1
7.5	10	7	-2
6.5	10	7	-3

Πίνακας 18: Οι λεπτομέρειες της ποσότητας του νερού που απαιτείται, τα δεδομένα από τους αισθητήρες, την ιστορικότητα του νερού και το ρυθμό.

Στο Σχήμα 31, περιγράφεται η ποσότητα του νερού που απαιτείται για ένα σύμπλεγμα ως συνάρτηση της ποσότητας του ρυθμού του νερού και του νερού με βάση τα δεδομένα από τους αισθητήρες.

Το συνολικό νερό QW_A που απαιτείται για την άρδευση στο αγροτεμάχιο A εκφράζεται ως εξής:

$$QW_A = \left(\sum_{i=1}^n QW_{required} \right) \text{kg} / \text{m}^2 \text{day}, \quad (23)$$

όπου n είναι ο αριθμός των συστάδων στο αγροτεμάχιο A .

Επίσης, η συνολική ποσότητα του νερού QW_{total} που απαιτείται για την άρδευση στο αγροτεμάχιο A έως E εκφράζεται ως εξής:

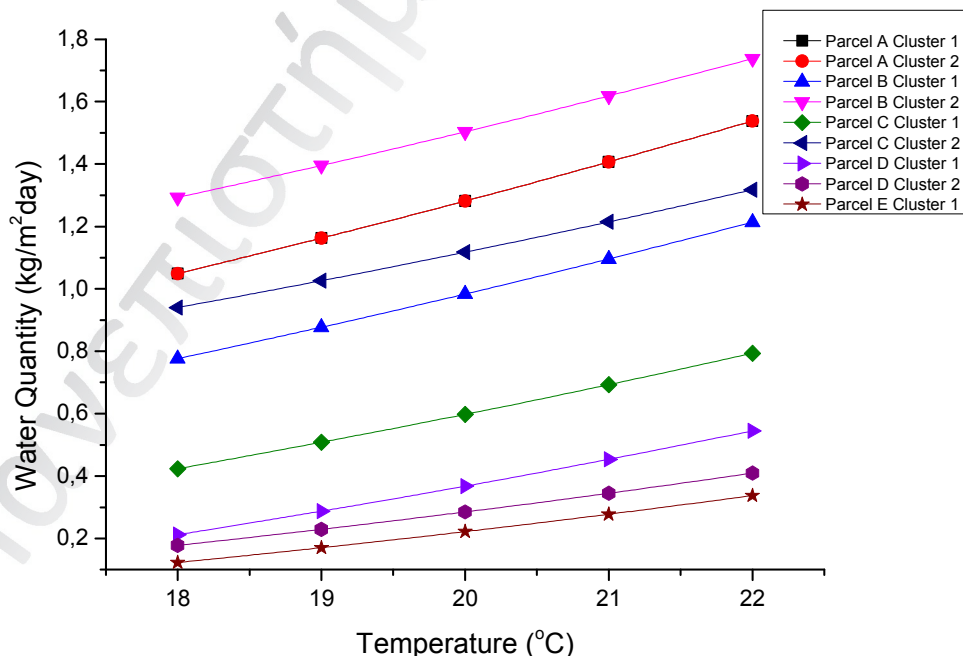
$$QW_{total} = \left(\sum_{i=1}^5 QW_A \right) \text{kg} / \text{m}^2 \text{day} , \quad (24)$$

όπου m είναι ο αριθμός των αγροτεμαχίων.

Στο Σχήμα 32, περιγράφεται η ποσότητα του νερού που απαιτείται σε κάθε αγροτεμάχιο με βάση την αλλαγή της θερμοκρασίας. Η ταχύτητα του αέρα, το albedo (R), η ηλιακή ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας (S_0), η υγρασία, το γεωγραφικό πλάτος, η διάρκεια της ηλιοφάνειας (n), και η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία (N) περιγράφονται στον Πίνακα 19.

Αγροτεμάχιο, Συστάδα	Ταχύτητα Αέρα	r	S_0	Υγρασία	Γεωγραφικό Πλάτος	n	N
A, 1	20	0.06	43	55%	41°	8.1	10
A, 2	20	0.06	43	55%	41°	8.1	10
B, 1	20	0.15	43	55%	41°	8.1	10
B, 2	20	0.15	43	57%	41°	8.1	10
Γ, 1	21	0.25	43	55%	41°	8.1	10
Γ, 2	21	0.25	43	57%	41°	8.1	10
Δ, 1	23	0.3	43	57%	41°	8.1	10
Δ, 2	23	0.5	43	59%	41°	8.1	10
E, 1	25	0.5	43	57%	41°	8.1	10

Πίνακας 19: Οι λεπτομέρειες της ταχύτητας του αέρα, το r , το S_0 , η υγρασία, το γεωγραφικό πλάτος, το n , το N .



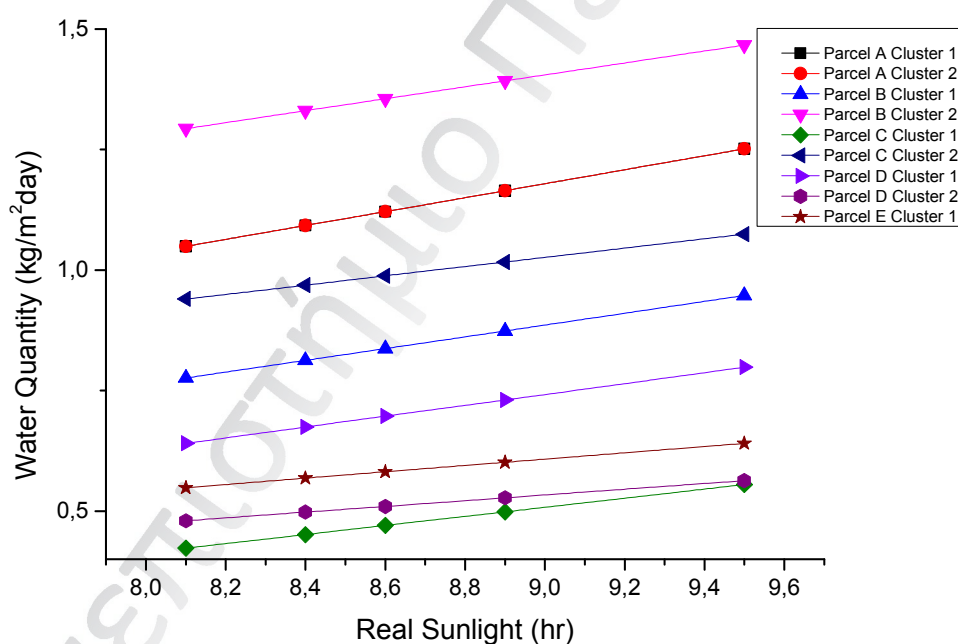
Σχήμα 32. Η ποσότητα του νερού που απαιτείται σε κάθε αγροτεμάχιο, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Το Σχήμα 33 δείχνει την ποσότητα του νερού που απαιτείται σε κάθε αγροτεμάχιο ως συνάρτηση της διάρκειας του ηλιακού φωτός. Οι λεπτομέρειες της ταχύτητας του

αέρα, το albedo (R), η ηλιακή ακτινοβολία επί του εξωτερικού ορίου της ατμόσφαιρας (S_0), η υγρασία, το γεωγραφικό πλάτος, και η θερμοκρασία δείχνονται στον Πίνακα 20.

Αγροτεμάχιο, Συστάδα	Ταχύτητα Αέρα	r	S_0	Υγρασία	Γεωγραφικό Πλάτος	Θερμοκρασία
A, 1	20	0.06	43	55%	41°	18°C
A, 2	20	0.06	43	55%	41°	18°C
B, 1	20	0.15	43	55%	41°	18°C
B, 2	20	0.15	43	57%	41°	18°C
Γ, 1	21	0.25	43	55%	41°	18°C
Γ, 2	21	0.25	43	57%	41°	18°C
Δ, 1	23	0.3	43	57%	41°	23°C
Δ, 2	23	0.5	43	59%	41°	23°C
E, 1	25	0.5	43	57%	41°	25°C

Πίνακας 20: Οι λεπτομέρειες της ταχύτητας του αέρα, το r , το S_0 , η υγρασία, το γεωγραφικό πλάτος και η θερμοκρασία.



Σχήμα 33. Η ποσότητα του νερού που απαιτείται σε κάθε αγροτεμάχιο με βάση την αλλαγή της πραγματικής διάρκειας σε ηλιακό φως.

4.4 Εκτίμηση Επίδοσης

Σε αυτό το κεφάλαιο, αξιολογείται το προτεινόμενο μοντέλο με τη χρήση του ECHERP, ενός πρωτοκόλλου που επιδιώκει την εξοικονόμηση ενέργειας [157]. Το ECHERP περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.

Οι κόμβοι αισθητήρων που τοποθετούνται σε ένα WSN έχουν την ευθύνη του εντοπισμού ενός συμβάντος, την επεξεργασία και τη διαβίβαση των στοιχείων. Η ενέργεια που δαπανάται για τις ενέργειες αυτές πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με μπαταρία και ως εκ τούτου έχουν περιορισμένη ενέργεια. Ο

συμβολισμός των γύρων χρησιμοποιείται για να περιγράψει την επιτυχή αποστολή των δεδομένων από τους αισθητήρες στο BS. Ως εκ τούτου, ένας γύρος είναι η αποστολή των δεδομένων μία φορά από όλους τους αισθητήρες προς το BS.

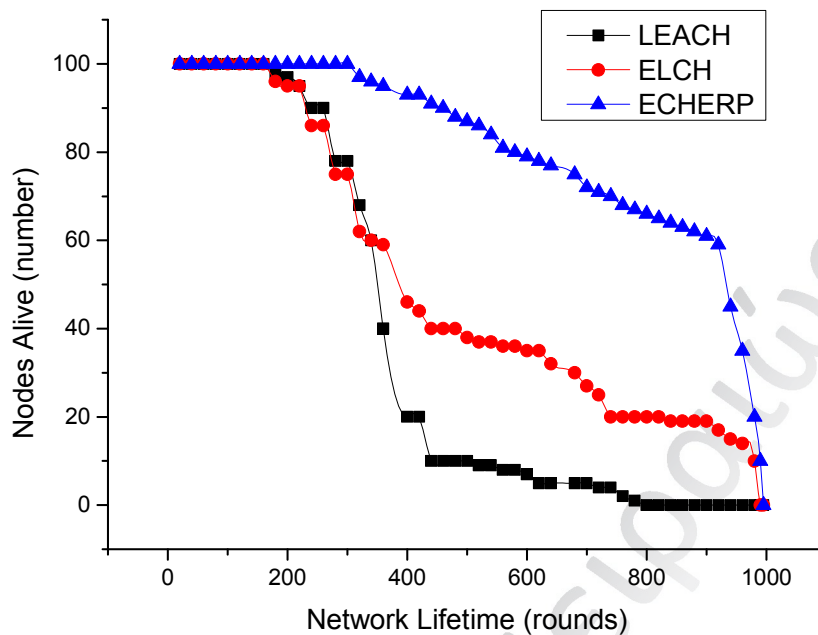
Η ενέργεια $E_{Tx}(k,d)$, που δαπανά ένας κόμβος για τη ραδιομετάδοση ενός μηνύματος από k bits σε μια απόσταση d οφείλεται στην ταυτόχρονη λειτουργία του πομπού $E_{Tx-elec}(k)$ και τον ενισχυτή του πομπού $E_{Tx-amp}(k,d)$ είναι όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.2.1.

Ομοίως, η ενέργεια $E_{Rx}(k)$ που δαπανάται από έναν κόμβο για την υποδοχή μηνύματος k bit οφείλεται στην λειτουργία του δέκτη $E_{Rx-elec}(k)$ και δίνεται στο κεφάλαιο 3.2.1.

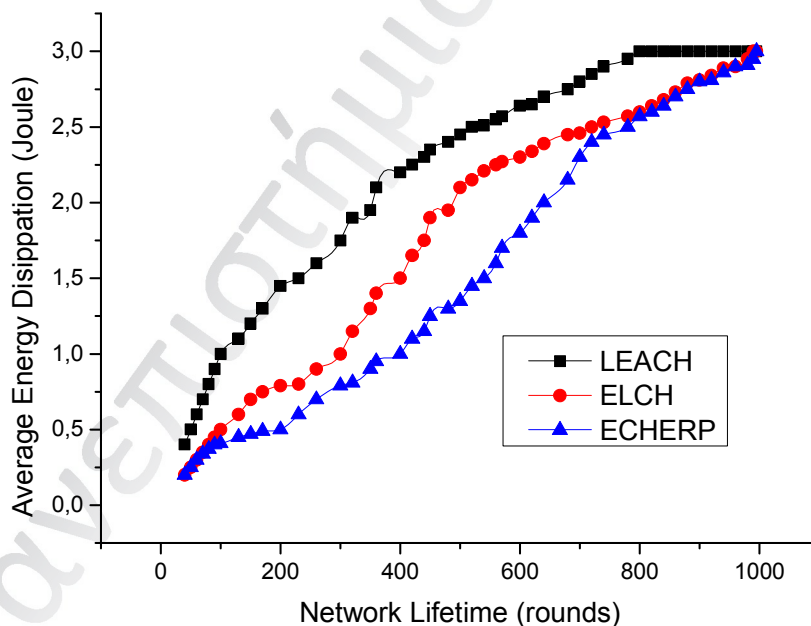
Για να αξιολογήσουμε την επίδοση του ECHERP, έγιναν πάνω από 50 διαφορετικές προσομοιώσεις με διάφορες τοπολογίες δικτύου $100m \times 100m$. Η γενική αρχιτεκτονική του δικτύου που εξετάστηκε είναι η ακόλουθη:

- Ένας σταθερός σταθμός βάσης βρίσκεται μακριά από τους κόμβους αισθητήρων.
- Οι κόμβοι αισθητήρων έχουν περιορισμένη με ομοιόμορφη αρχική κατανομή ενέργεια.
- Κάθε κόμβος ανιχνεύει το περιβάλλον με σταθερό ρυθμό και έχει πάντα δεδομένα να αποστείλει στο σταθμό βάσης.
- Οι κόμβοι αισθητήρων είναι σταθεροί.
- Το δίκτυο είναι ομοιογενές και όλοι οι κόμβοι είναι ισοδύναμοι, δηλαδή έχουν την ίδια υπολογιστική και επικοινωνιακή ικανότητα.
- Το δίκτυο δεν γνωρίζει την θέση των κόμβων εκ των προτέρων.
- Ο πομπός μπορεί να ρυθμίσει τον ενισχυτή ισχύος με βάση την απόσταση μεταφοράς.

Σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης εξετάστηκαν 100 ομοιογενείς κόμβοι με αρχική ενέργεια 3 Joules, τυχαία διασκορπισμένοι σε ένα πεδίο 100×100 m². Ο BS ήταν τοποθετημένος στο σημείο (0,150), έτσι ώστε να είναι τουλάχιστον 100 μέτρα μακριά από το κέντρο του πεδίου και τα πακέτα που αποστέλλονται είναι 36 bytes. Η κατανάλωση ενέργειας που οφείλεται στην επικοινωνία υπολογίζεται με βάση το ενεργειακό μοντέλο πρώτης τάξης [63]. Υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος αισθητήρα δημιουργεί ένα πακέτο δεδομένων ανά γύρο που πρέπει να διαβιβάζεται στον BS. Οι κόμβοι αισθητήρων χωρίστηκαν σε ομάδες που αποτελούνται από επικεφαλής που αποστέλλουν τα δεδομένα σε ανώτερου επίπεδου επικεφαλής μέχρι να φτάσουν τελικά στο BS.



Σχήμα 34. Αριθμός ενεργών κόμβων προς τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.



Σχήμα 35. Μέση κατανάλωση ενέργειας προς τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.

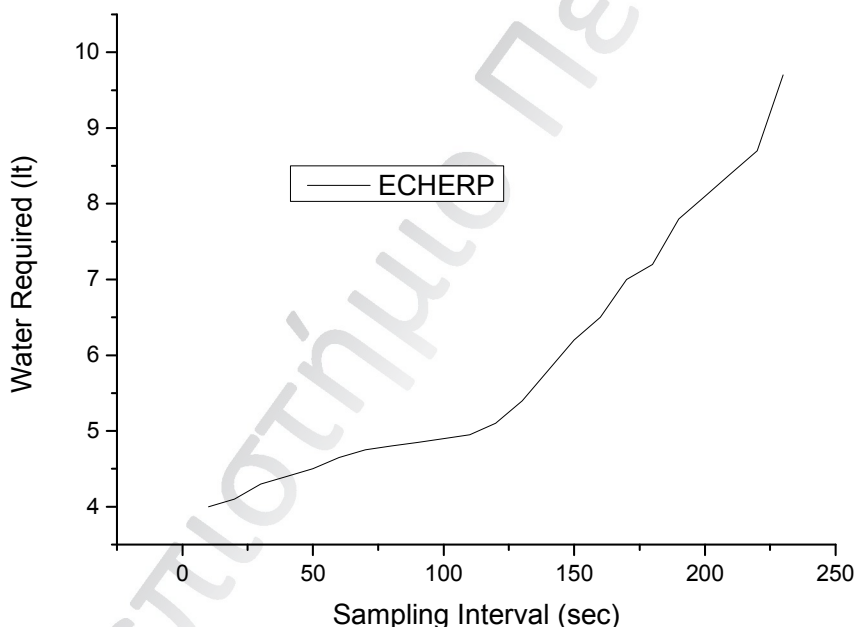
Το Σχήμα 34 δείχνει τον αριθμό των κόμβων που παραμένουν ενεργοί όταν εφαρμόζονται τα LEACH, ELCH και ECHERP. Πιο συγκεκριμένα, η εξάντληση όλων των κόμβων του δικτύου στα LEACH, ELCH και ECHERP λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια του 800^{ου}, 980^{ου} και 995^{ου} γύρου αντίστοιχα. Το Σχήμα 35 δείχνει τη μέση κατανάλωση ενέργειας των συγκρινόμενων πρωτοκόλλων ως συνάρτηση του

χρόνου ο οποίος μετράται σε γύρους. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η απόδοση του ECHERP είναι σημαντικά καλύτερη από αυτή των LEACH και ELCH.

Μια πιο αναλυτική περιγραφή των αποτελεσμάτων από τη χρήση των τριών πρωτοκόλλων μπορεί να εστιαστεί στο χρόνο εξάντλησης του πρώτου κόμβου, του χρόνου εξάντλησης του τελευταίου κόμβου και της μέσης κατανάλωσης ενέργειας. Ο Πίνακας 21 συνοψίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τα οποία απεικονίζονται στα Σχήματα 34 και 35.

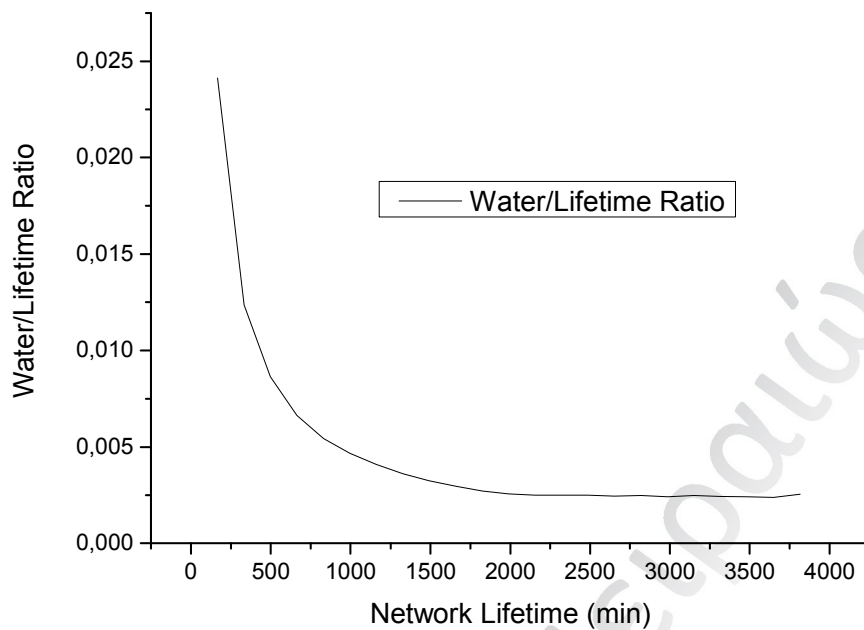
Απόσταση του σταθμού βάσης από το κέντρο του πεδίου (m)	Χρόνος εξάντλησης του πρώτου κόμβου (%)	Χρόνος εξάντλησης του τελευταίου κόμβου (%)	Μέση κατανάλωση ενέργειας (%)	Συγκρινόμενο Πρωτόκολλο
150	+90	+25	-19.5	LEACH
150	+90	+0.5	-0.5	ELCH

Πίνακας 21: Σύγκριση του ECHERP με τα LEACH και ELCH με την απόσταση του σταθμού βάσης από το πεδίο του αισθητήρα, όταν η αρχική ενέργεια του κόμβου έχει οριστεί σε 3J.

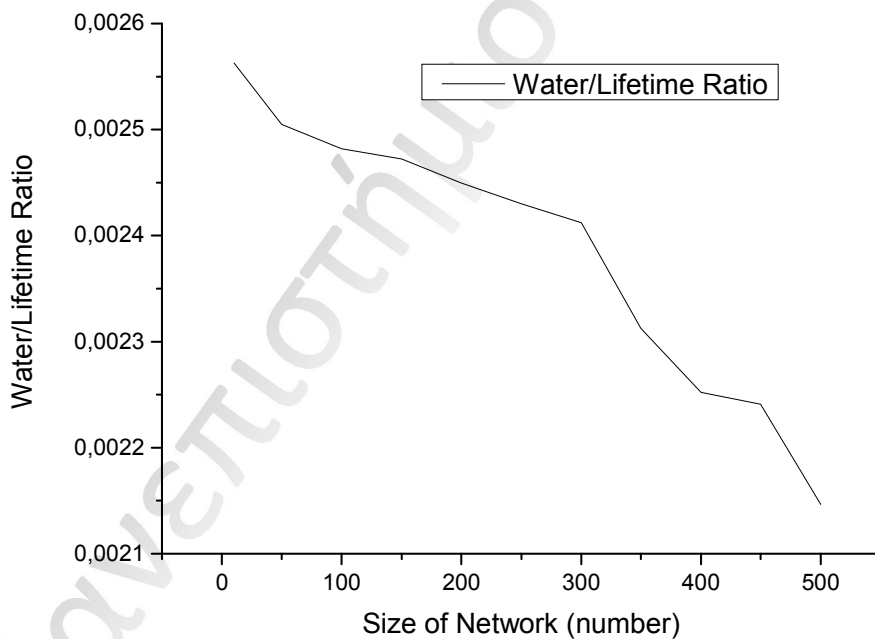


Σχήμα 36. Η ποσότητα νερού που απαιτείται ως συνάρτηση του διαστήματος δειγματοληψίας.

Το Σχήμα 36 δείχνει την ποσότητα νερού που απαιτείται ως συνάρτηση του διαστήματος δειγματοληψίας του ECHERP. Όπως δείχνει το σχήμα, η επίδοση του ECHERP είναι σημαντικά καλύτερη όταν το διάστημα δειγματοληψίας γίνεται μεγαλύτερο.



Σχήμα 37. Διάρκεια ζωής του δικτύου σε συνάρτηση της αναλογίας νερού/διάρκεια.



Σχήμα 38. Μέγεθος του δικτύου σε συνάρτηση της αναλογίας νερού/διάρκεια.

Το Σχήμα 37 δείχνει την διάρκεια ζωής του δικτύου του ECHERP ως συνάρτηση της αναλογίας ποσότητας νερού/διάρκεια ζωής. Όπως απεικονίζεται το σχήμα, η επίδοση του ECHERP είναι καλή μέχρι το 1825 min.

Το Σχήμα 38 δείχνει την απόδοση του μοντέλου με την αλλαγή στο μέγεθος του δικτύου σε αναλογία ποσότητας νερού/διάρκεια ζωής. Όπως απεικονίζεται το σχήμα, η απόδοση του ECHERP είναι καλή σε μικρά δίκτυα.

<i>Διάρκεια ζωής δικτύου σε γύρους</i>	<i>Διάρκεια του γύρου σε sec</i>	<i>Διάρκεια ζωής δικτύου σε sec</i>	<i>Ποσότητα νερού</i>
995	10	9950	4
995	20	19900	4,1
995	30	29850	4,3
995	40	39800	4,4
995	50	49750	4,5
995	60	59700	4,65
995	70	69650	4,75
995	80	79600	4,8
995	90	89550	4,85
995	100	99500	4,9
995	110	109450	4,95
995	120	119400	5,1
995	130	129350	5,4
995	140	139300	5,8
995	150	149250	6,2
995	160	159200	6,5
995	170	169150	7
995	180	179100	7,2
995	190	189050	7,8
995	200	199000	8,1
995	210	208950	8,4
995	220	218900	8,7
995	230	228850	9,7

Πίνακας 22: Η διάρκεια ζωής του δικτύου (σε γύρους), ο χρόνος ενός γύρου (σε sec), η διάρκεια ζωής του δικτύου (σε sec) και η ποσότητα του νερού που απαιτείται όταν χρησιμοποιείται το ECHERP.

Στον Πίνακα 6, παρουσιάζεται η διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους, ο χρόνος του γύρου σε sec, η διάρκεια ζωής του δικτύου σε sec και η ποσότητα του νερού που απαιτείται, με τη χρήση του ECHERP.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδοση του προτεινόμενου μοντέλου, έχουν θεωρηθεί ένας αριθμός προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές του χρόνου που απαιτείται για ένα γύρο. Στις δοκιμές προσομοίωσης ορίζεται ο συμβιβασμός μεταξύ του χρόνου ενός γύρου και του νερού που απαιτείται. Ο κύριος στόχος του μοντέλου αυτού είναι να διατηρηθεί η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων σε χαμηλό επίπεδο, ενώ να έχουν πιο ακριβείς μετρήσεις από τους αισθητήρες για το νερό που απαιτείται. Η συνολική ποσότητα νερού που απαιτείται για άρδευση εκφράζεται ως εξής:

$$TotalWater = MeanWater \cdot rounds, \quad (25)$$

Όπου το *TotalWater* αντιπροσωπεύει την ποσότητα του νερού που απαιτείται με βάση το μοντέλο άρδευσης που παρουσιάστηκε στο (21). Το *MeanWater* αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή του νερού που απαιτείται όταν θεωρούνται διαφορετικές τιμές χρόνου

για ένα γύρο. Επιπλέον, ο γύρος αντιπροσωπεύει τον αριθμό των φορών που γίνεται η ανταλλαγή των δεδομένων από τους αισθητήρες προς το σταθμό βάσης. Η ποσότητα του νερού που απαιτείται για άρδευση υπολογίζεται ως εξής:

$$Water = TotalWater / lifetime . \quad (26)$$

Με βάση τους ανωτέρω τύπους διεξήχθησαν δοκιμές προσομοίωσης για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού που απαιτείται και τη διάρκεια ζωής του δικτύου για διάφορες τιμές του γύρου που κυμαίνεται 10-230 δευτερόλεπτα. Σε όλες τις δοκιμασίες υποτίθεται ότι η διάρκεια της ζωής του δικτύου ήταν ίση με 995 γύρους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 6. Συνεπώς, αν ένας γύρος είναι 110 sec για το ECHERP υπολογίζεται η ενεργειακή απόδοση του δικτύου με λιγότερο νερό.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Προτεινόμενο HYCLRP: Ένα Υβριδικό Διαστρωματικό Πρωτόκολλο Δρομολόγησης για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

5.1 Εισαγωγή

Στην αποστολή των πληροφοριών με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο, βασίζεται η ζωή των ασύρματων κόμβων. Επιπλέον, είναι επίσης σημαντικό οι γειτονικοί κόμβοι να μην παρεμβάλουν ο ένας στον άλλο, ενώ μεταφέρουν τα δεδομένα σε άλλους κόμβους. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητος ένας καλός αλγόριθμος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC) που θα συντονίσει τις ταυτόχρονες μεταδόσεις των διαφορετικών κόμβων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η παρεμβολή μεταξύ των κόμβων.

Το σχήμα πρόσβασης με βάση την διαίρεση χρόνου (TDMA) φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής και αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει λύσεις βασισμένες στο TDMA [158, 159]. Σύμφωνα με το TDMA οι κόμβοι πρέπει να περιμένουν για την δική τους χρονοθυρίδα προκειμένου να στείλουν δεδομένα. Έτσι, απαιτούνται περισσότερες χρονοθυρίδες σε κάθε πλαίσιο, όταν αυξάνεται ο πληθυσμός των κόμβων, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μεγάλες καθυστερήσεις μετάδοσης για κάθε κόμβο. Επιπλέον, για να φιλοξενήσει περισσότερους αισθητήρες σε ένα πλαίσιο, το μήκος μιας χρονοθυρίδας πρέπει επίσης να ελαχιστοποιείται, οδηγώντας σε πιο άκαμπτες απαιτήσεις συγχρονισμού μεταξύ των αισθητήρων. Ταυτόχρονα, το TDMA επιδεικνύει χαμηλή χρησιμοποίηση χρονοθυρίδας, όταν το μέγεθος του δικτύου είναι μεγάλο. Στις περισσότερες εφαρμογές αισθητήρων, ένας κόμβος δεν έχει δεδομένα να μεταδώσει σε κάθε πλαίσιο, έτσι μπορεί να υπάρχουν αχρησιμοποίητες χρονοθυρίδες σε κάθε πλαίσιο. Οι πόροι που διατίθενται, αλλά δεν χρησιμοποιούνται θα μπορούσαν να έχουν χρησιμοποιηθεί από άλλους ενεργούς κόμβους, καθιστώντας τα ποσοστά μετάδοσης τους μικρότερα, και εξοικονομώντας περισσότερη ενέργεια κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας. Τέλος, καθώς αλλάζει ο αριθμός των κόμβων, δεν είναι εύκολο για ένα πρωτόκολλο TDMA να αλλάξει δυναμικά το μήκος του πλαισίου και τις χρονοθυρίδες ανάθεσης του για να φιλοξενήσει αλλαγές στην τοπολογία.

Από την άλλη πλευρά, η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA) είναι καλύτερη επιλογή για δίκτυα μεγάλης κλίμακας, δεδομένου ότι παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα, ευελιξία, επεκτασιμότητα, αξιοπιστία και ασφάλεια από το TDMA [160]. Το CDMA έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στα συστήματα κινητής επικοινωνίας δεύτερης γενιάς και σε μελλοντικά ασύρματα συστήματα εκτάκτου ανάγκης, όπως τα ασύρματα τοπικά δίκτυα και τα ασύρματα δίκτυα κατά περίπτωση. Στο CDMA, τα κανάλια επικοινωνίας έχουν ψευδο-τυχαίους κωδικούς λέξεων, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί προσεκτικά για να αλληλοεξουδετερώνονται στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Σε κάθε επικοινωνία κάθε κομμάτι των δεδομένων πολλαπλασιάζεται με την κωδική λέξη που χρησιμοποιείται από το κανάλι επικοινωνίας και χρησιμοποιείται ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα. Έτσι, διαβιβάζονται πολλά αντίγραφα των ίδιων πληροφοριών για να διασφαλιστεί ότι τουλάχιστον ένα θα φτάσει στον προορισμό. Ο αριθμός των αντιγράφων, ο οποίος είναι ίσος με το μήκος της κωδικής λέξης, είναι

γνωστός ως παράγοντας διασποράς. Το αντίστροφο του μήκους της κωδικής λέξης είναι γνωστό ως ποσοστό της κωδικής λέξης. Υπάρχει μια συσχέτιση με το μήκος των κωδικών λέξεων. Αφενός, μεγάλες κωδικές λέξεις αυξάνουν τον αριθμό των διαθέσιμων διαύλων, καθώς και την ευρωστία των επικοινωνιών. Από την άλλη πλευρά, πολύ μικρές κωδικές λέξεις έχουν ως αποτέλεσμα το χαμηλότερο ρυθμό δεδομένων από τους διαύλους επικοινωνίας.

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται το HYCLRP ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας με την ανάθεση κωδικών λέξεων με μικρότερο μήκος και με την επιλογή επικεφαλής που ελαχιστοποιεί την παρέμβαση στο σύμπλεγμα. Η χρήση ενός γράφου παρεμβολής εκχωρεί κωδικές λέξεις στους κόμβους. Αν δύο κόμβοι δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους, δεν υπάρχει ακμή μεταξύ αυτών των δύο κόμβων στο γράφημα παρεμβολής, μπορεί να χρησιμοποιήσουν την ίδια κωδική λέξη μειώνοντας τον αριθμό των κωδικών λέξεων που απαιτούνται. Από την άλλη πλευρά, εάν υπάρχει μία ακμή στο γράφημα μεταξύ δύο κόμβων, οι κόμβοι δεν θα πρέπει να έχουν την ίδια κωδική λέξη, αφού θα υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ των κόμβων. Η επιλογή επικεφαλής εκτελείται τόσο στο MAC όσο και στο επίπεδο δρομολόγησης. Ο κόμβος από το γράφημα παρεμβολής που έχει την υψηλότερη διαθέσιμη ενέργεια και το μικρότερο μήκος κώδικα επιλέγεται ως επικεφαλής συμπλέγματος.

5.2 Σχετική Βιβλιογραφία

Το κύριο χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων TDMA είναι ότι χρησιμοποιούν χρονοθυρίδες για την αποστολή πληροφοριών στο δίκτυο και έτσι θα αποφύγουν τις συγκρούσεις των μηνυμάτων που αποστέλλονται κατά τη διάρκεια της ανταλλαγής δεδομένων [161]. Η πλειονότητα των πρωτοκόλλων που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία έχουν σχεδιαστεί για δίκτυα μικρής κλίμακας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στο [162] παρουσιάζεται ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης που βασίζεται στο TDMA. Αυτό το πρωτόκολλο αναθέτει χρονοθυρίδες σε έναν κόμβο μόνο όταν πρέπει να λάβει ή να στείλει πληροφορίες, διαφορετικά ο δέκτης και ο πομπός απενεργοποιούνται προκειμένου να αποφεύγονται οι γειτονικές ακροάσεις. Προκειμένου να επιταχυνθεί η απάντηση σε ένα αίτημα, χρησιμοποιούνται πακέτα αφύπνισης για να ενεργοποιήσουν έναν κόμβο. Ο κόμβος πηγή στέλνει ένα πακέτο αφύπνισης στον κόμβο προορισμού στην υποδοχή που συνδέεται με τον προορισμό. Μετά την παραλαβή του πακέτου, ο προορισμός προσδιορίζει τον κόμβο πηγή και αρχίζει να ακούει κατά τη διάρκεια της σχισμής του κόμβου πηγής. Αυτό το πρωτόκολλο αποφεύγει τις συγκρούσεις των δεδομένων που αποστέλλονται από τους κόμβους, ωστόσο οδηγεί σε υψηλή καθυστέρηση στην περίπτωση που αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν στην διαδρομή αποστολής. Στο [163], παρουσιάζεται ένα σύστημα προγραμματισμού TDMA που εξισορροπεί την εξοικονόμηση ενέργειας και την καθυστέρηση. Αυτή η ισορροπία επιτυγχάνεται με κατάλληλο προγραμματισμό της διαδρομής, η οποία αποδίδεται με μια μέθοδο χρωματισμού γραφήματος. Το προτεινόμενο μέτρο μειώνει την καθυστέρηση, δεδομένου ότι αποφεύγει μεγάλες διαδρομές, ωστόσο η διαδρομή σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας μπορεί να αυξηθεί.

Στην περίπτωση των δικτύων μεγάλης κλίμακας τα πρωτόκολλα CDMA μπορεί να παρέχουν μια πιο ευέλικτη λύση. Κάθε κόμβος έχει μια κωδική λέξη που χρησιμοποιείται για να πολλαπλασιάσει κάθε bit δεδομένων πριν τη μετάδοση στους άλλους κόμβους και έτσι οδηγεί σε χαμηλή καθυστέρηση. Στο [164], παρουσιάζεται ένα νέο σύστημα CDMA για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για τη μείωση των

παρεμβολών. Σε αυτό το πρωτόκολλο κάθε κόμβος έχει μια μοναδική συχνότητα λήψης η οποία είναι διαφορετική από τις συχνότητες του ενός και δύο βημάτων γειτόνων. Όλοι οι γείτονες ενός κόμβου στέλνουν μηνύματα χρησιμοποιώντας τη μοναδική συχνότητα λήψης αυτού του κόμβου. Ο δέκτης αυτού του κόμβου παίρνει ένα ρόλο παρόμοιο με αυτό του σταθμού βάσης (BS) στο κυψελοειδές σύστημα. Οι ταυτόχρονες μεταδόσεις από διαφορετικούς γείτονες σε αυτό τον κόμβο διακρίνονται από τη χρήση διαφορετικών κωδικών. Αυτό το πρωτόκολλο επιτρέπει σε κάθε κόμβο να ξεκινήσει τη μετάδοση αμέσως όταν λάβει ένα πακέτο. Ωστόσο, η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται καθώς το μήκος των κωδικών λέξεων δεν λαμβάνεται υπόψη από τους κόμβους.

Η υλοποίηση ενός υβριδικού πρωτοκόλλου TDMA/CDMA έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών καθώς συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των TDMA και CDMA και μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικό και ευέλικτο από ένα TDMA ή ένα CDMA. Στο [165], παρουσιάζεται ένα υβριδικό πρωτόκολλο MAC για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, που ονομάζεται Z-MAC, που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του TDMA και CSMA. Στο Z-MAC ένας κόμβος ξεκινά μια απλή ανακάλυψη γείτονα για να εντοπίσει τους δύο βήματα γείτονες. Ο κατάλογος γείτονα χρησιμοποιείται ως είσοδος σε ένα αλγόριθμο κατανομής χρονοθυρίδων. Στη συνέχεια, το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί αυτήν τη λίστα για να εκχωρήσει χρονοθυρίδες σε κάθε κόμβο του δικτύου. Ως εκ τούτου, αποφεύγεται η μετάδοση από ένα κόμβο σε οποιοδήποτε από τους γείτονες που παρεμβάλουν με κάποιον από τους γείτονες. Ένα πρόγραμμα μετάδοσης μπορεί να χειριστεί οποιαδήποτε αλλαγή δρομολόγησης μεταξύ των γειτόνων. Το πρωτόκολλο αυτό μειώνει τις συγκρούσεις δεδομένου ότι οι κόμβοι αποστέλλουν δεδομένα εκ των προτέρων για την αποφυγή συγκρούσεων, αλλά στην περίπτωση των μη χρησιμοποιούμενων χρονοθυρίδων άλλοι κόμβοι μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν.

Στο [166], προτείνεται ένα υβριδικό πρωτόκολλο TDMA/CDMA που βελτιώνει την επεκτασιμότητα του πρωτοκόλλου TDMA και έχει χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας. Ο μηχανισμός μειώνει τον αριθμό των χρονοθυρίδων σε ένα πλαίσιο με κατανομή των χρονοθυρίδων σε ομάδες αισθητήρων και όχι σε μεμονωμένους ενεργούς αισθητήρες. Η ταυτόχρονη μετάδοση από πολλαπλούς ενεργούς αισθητήρες μέσα σε μια σχισμή επιλύεται χρησιμοποιώντας το CDMA. Με κατάλληλο έλεγχο της ενέργειας, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή μεταξύ των κόμβων στην ίδια χρονοθυρίδα. Παρ'όλα αυτά, αν και αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί κόμβους με υψηλή ενέργεια ως επικεφαλής, δεν χρησιμοποιεί αποτελεσματικό μηχανισμό για να επιλεγεί ένας κόμβος ως επικεφαλής.

Όλα τα παραπάνω πρωτόκολλα προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιώντας διάφορους αλγόριθμους. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορεί να θεωρηθούν καλή λύση, δεδομένου ότι μπορούν να χρησιμοποιούν TDMA και CDMA για την εξασφάλιση της ενεργειακής απόδοσης, ενώ αποφεύγουν τις συγκρούσεις στην συστάδα. Ωστόσο, αυτό δεν εξασφαλίζει τη μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου. Ως εκ τούτου, αν ο επικεφαλής κόμβος με την υψηλότερη ενέργεια είναι ένας κόμβος που βρίσκεται στην άκρη του συμπλέγματος, οι άλλοι κόμβοι θα δαπανήσουν σημαντική ποσότητα ενέργειας και ο αριθμός των συγκρούσεων θα αυξηθεί καθώς οι κόμβοι προσπαθούν να επικοινωνήσουν με αυτό τον κόμβο, γεγονός που δεν είναι ενεργειακά αποδοτικό για ολόκληρο το δίκτυο. Για το λόγο αυτό προτείνουμε ένα πρωτόκολλο που εκλέγει ως επικεφαλής κόμβους που

ελαχιστοποιούν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και χρησιμοποιούν μικρότερους κώδικες CDMA σε κάθε συστάδα.

5.3 Το Πρωτόκολλο HYCLP

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται το HYCLRP, ένα πρωτότυπο TDMA/CDMA διαστρωματικό ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο. Το HYCLRP λειτουργεί σε τρεις φάσεις, τη φάση της επιλογής του επικεφαλής, τη φάση επιλογής του κώδικα και τη φάση της δρομολόγησης. Κατά τη διάρκεια της φάσης επιλογής του επικεφαλής, επιλέγονται οι επικεφαλής που ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της φάσης της επιλογής κώδικα χρησιμοποιείται το γράφημα παρεμβολής για την ανάθεση κωδικών στους κόμβους. Ενώ κατά τη διάρκεια της φάσης της δρομολόγησης οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα στον σταθμό. Η κύρια διαφορά με τα άλλα πρωτόκολλα είναι ότι το HYCLRP χρησιμοποιεί ένα διαστρωματικό μηχανισμό για να επιλέξει ένα κόμβο ως επικεφαλής και ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές στο δίκτυο. Αυτό γίνεται με την εξέταση της συνολικής απόστασης κάθε κόμβου από τους άλλους κόμβους της συστάδας. Επιπλέον, παρουσιάζεται το μοντέλο της ενέργειας που χρησιμοποιείται στο προτεινόμενο μοντέλο. Το υπόλοιπο αυτής της ενότητας περιγράφει τις τρεις φάσεις του προτεινόμενου πρωτοκόλλου και την ανάλυση της πολυπλοκότητάς του.

5.3.1 Το Ενεργειακό Μοντέλο του πρωτοκόλλου

Σε αυτή την έρευνα, χρησιμοποιούμε το ενεργειακό μοντέλο που παρουσιάζεται στο [63]. Ειδικότερα, θεωρούμε το E_{elec} ως την ενέργεια που δαπανάται για να ενεργοποιηθεί ο πομπός ή ο δέκτης και E_{amp} ο ενισχυτής εκπομπής. Η ενέργεια που διαχέεται από έναν κόμβο για τη ραδιομετάδοση $E_{Tx(m,d)}$ ενός μηνύματος m bits σε μια απόσταση d οφείλεται στο κύκλωμα πομπού $E_{Tx-elec(m)}$ και τον ενισχυτή πομπού $E_{TX-amp(m,d)}$ είναι το ίδιο με αυτό στο κεφάλαιο 3.2.1.

Ομοίως, ένας κόμβος διαχέει ενέργεια για την υποδοχή $E_{Rx(m)}$ ενός μηνύματος m bits λόγω του κύκλωμα δέκτη $E_{Rx-elec(m)}$ που εκφράζεται όμοιως όπως στο κεφάλαιο 3.2.1. Ως εκ τούτου, η συνολική ενέργεια που ένας κόμβος i καταναλώνει σε κάθε γύρο δίνεται από:

$$E_{total}(i) = \delta(i) \cdot E_{Tx}(m, d) + \delta(i) \cdot n_nodes \cdot E_{Rx}(m) \quad (27)$$

όπου

$$\delta(i) = \begin{cases} 1, & \text{ο κόμβος επιλέγεται ως επικεφαλής} \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (28)$$

και n_nodes δηλώνει τον αριθμό των κόμβων της συστάδας.

Στο HYCLRP, ο BS υποτίθεται ότι έχει απεριόριστη εναπομένουσα ενέργεια. Υποτίθεται επίσης ότι ο BS βρίσκεται σε μία σταθερή θέση μακριά από το πεδίο. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ του BS από το κέντρο του πεδίου τόσο υψηλότερη είναι η δαπάνη ενέργειας για τη μετάδοση κάθε κόμβου στο BS.

5.3.2 Φάση Επιλογής Επικεφαλής Συμπλέγματος

Στο HYCLRP, όλοι οι κόμβοι του δικτύου ομαδοποιούνται δυναμικά σε ομάδες των k κόμβων. Ένας κόμβος σε κάθε ομάδα εκλέγεται ως επικεφαλής του συμπλέγματος. Ως εκ τούτου, ο αριθμός των επικεφαλής συμπλέγματος είναι ίσος με τον αριθμό των συστάδων. Ο ρόλος του επικεφαλής συμπλέγματος είναι να παρέχει επικοινωνία υψηλού επιπέδου και μειώσει την κίνηση στο δίκτυο.

Για να επιλέξουμε τον επικεφαλής του συμπλέγματος υπολογίζουμε δύο κριτήρια: την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων και τη συνολική Ευκλείδεια απόσταση κάθε κόμβου από τους άλλους του συμπλέγματος. Συγκεκριμένα, πρώτα θεωρούμε τους πρώτους l κόμβους που έχουν την υψηλότερη υπολειμματική ενέργεια από άλλους κόμβους του συμπλέγματος ως υποψήφιους επικεφαλής. Το l είναι μια αριθμητική τιμή που κυμαίνεται μεταξύ l και n_nodes . Στη συνέχεια, για κάθε κόμβο n του συμπλέγματος υπολογίζουμε την Ευκλείδεια απόσταση του από τους άλλους. Από τους l υποψήφιους κόμβους επιλέγουμε επικεφαλής τον κόμβο που έχει την ελάχιστη συνολική απόσταση. Το Σχήμα 39 παρουσιάζει τον ψευδοκώδικα του προτεινόμενου αλγορίθμου επιλογής επικεφαλής.

```
Input
n_nodes = number of nodes in the cluster
l = number of candidates cluster heads

Output
Clusterhead
  Create Nodelist = {n_nodes belongs to the
  cluster E_total > 0} and CandidateList = {}

  Sort Nodelist in descending E_total

  Put the l first nodes from the Nodelist to the
  CandidateList
  distance = Infinity
  clusterhead = 0;

  For every u node of the CandidateList

  Calculate Distance =  $\min_{i \in Nodelist} \sum d(u, i)$ 

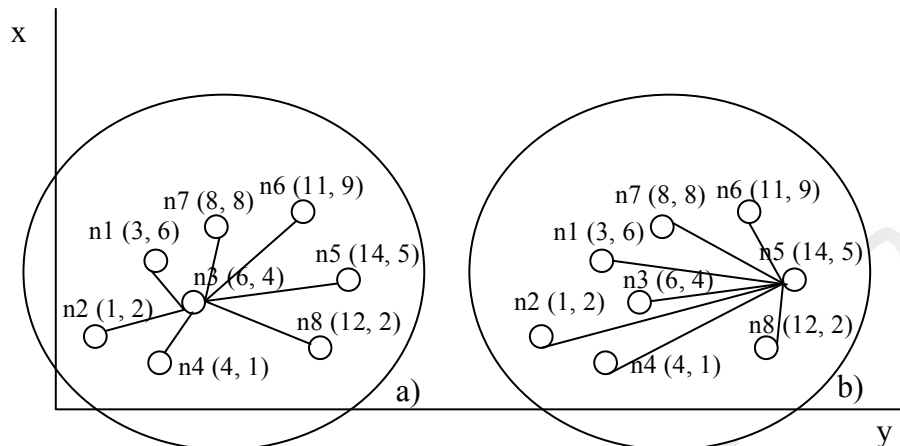
  If distance < min
  min = distance
  clusterhead = u

Return clusterhead
```

Σχήμα 39. Ο ψευδοκώδικας επιλογής επικεφαλής του HYCLRP.

Το Σχήμα 40 παρουσιάζει ένα παράδειγμα του προτεινόμενου αλγορίθμου επιλογής επικεφαλής. Ο αριθμός των κόμβων είναι ίσος με οκτώ και θεωρούμε δύο επιλογές. Στην πρώτη επιλογή χρησιμοποιούμε το προτεινόμενο μοντέλο για να επιλέξουμε τον κόμβο n_3 ως επικεφαλής και στη δεύτερη επιλογή το κόμβο n_5 με την υψηλότερη

ενέργεια ως επικεφαλής. Όταν επιλεγεί ο κόμβος n_3 ως επικεφαλής συμπλέγματος υπολογίζουμε τη συνολική απόσταση των κόμβων από τον κόμβο επικεφαλής n_3 .



Σχήμα 40. Συστάδα κόμβων: α) κόμβος n_3 είναι ο επικεφαλής, β) ο κόμβος n_5 είναι ο επικεφαλής.

Για παράδειγμα, εάν εκλεγεί ο κόμβος n_3 ως επικεφαλής η συνολική απόστασή του από τους άλλους κόμβους υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 d(n_3, u) &= d(n_3, n_1) + d(n_3, n_2) + d(n_3, n_4) + d(n_3, n_5) + \\
 &\quad + d(n_3, n_6) + d(n_3, n_7) + d(n_3, n_8) \\
 &= 3,6 + 5,4 + 3,6 + 8 + 7 + 4,5 + 6,3 \\
 &= 38,4
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Διαφορετικά, αν εκλεγεί ο κόμβος n_5 ως επικεφαλής η συνολική απόστασή του από τους άλλους κόμβους του συμπλέγματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 d(n_5, u) &= d(n_5, n_1) + d(n_5, n_2) + d(n_5, n_3) + d(n_5, n_4) + \\
 &\quad + d(n_5, n_6) + d(n_5, n_7) + d(n_5, n_8) \\
 &= 11 + 13,4 + 8,1 + 10,7 + 5,1 + 6,8 + 3,6 \\
 &= 58,7
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

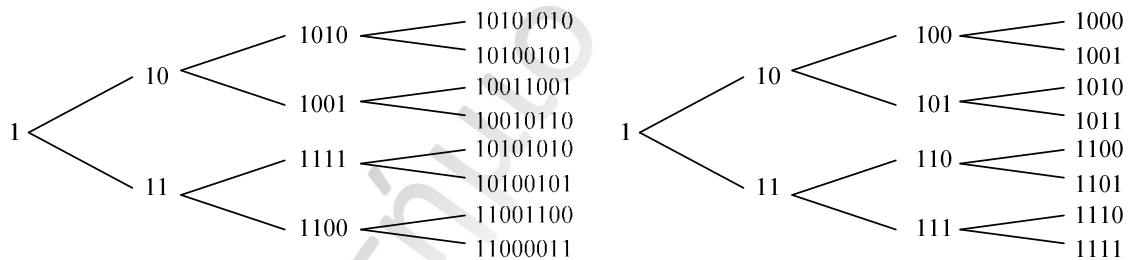
Δεδομένου ότι, η απόσταση του κόμβου n_3 είναι μικρότερη από την απόσταση του κόμβου n_5 , η επιλογή του κόμβου n_3 θα οδηγήσει σε μικρότερες κωδικές λέξεις συμπλέγματος και σε πιο αποτελεσματικά μονοπάτια.

5.3.3 Φάση Επιλογής Κώδικα

Το CDMA βασίζεται στη Διασπορά Φάσματος (SS), όπου κάθε χρήστης καταλαμβάνει όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Ο πομπός χρησιμοποιεί έναν κώδικα και πολλαπλασιάζει τα δεδομένα που αποστέλλει στον επικεφαλής. Ο κώδικας είναι μια δυαδική ακολουθία που μπορεί να αναπαραχθεί στον επικεφαλής, μέσω ακριβείς μαθηματικούς κανόνες. Χρησιμοποιώντας ένα τοπικά παραγόμενο κώδικα, ο επικεφαλής αποκωδικοποιεί τα δεδομένα και ανακτά από αυτά την αρχική πληροφορία. Η βελτίωση στην απόδοση από τη διάδοση του σήματος καθιστά δυνατή

για πολλά, ανεξαρτήτως κωδικοποιημένα σήματα, να καταλαμβάνουν το ίδιο εύρος ζώνης καναλιού στον επικεφαλής, υπό την προϋπόθεση ότι κάθε σήμα έχει ένα ξεχωριστό κώδικα.

Προκειμένου το προτεινόμενο μοντέλο να υποστηρίξει δεδομένα μεταβλητού μήκους με χαμηλό κόστος, εφαρμόζεται ο κώδικας μεταβλητού μήκους γνωστός ως OVFSF που παρουσιάστηκε στο [167]. Το OVFSF χρησιμοποιείται για την παροχή μεταβλητού μήκους κωδικών λέξεων. Ένα αίτημα με υψηλότερο ποσοστό εκχωρεί μικρότερη κωδική λέξη. Ως εκ τούτου, το OVFSF, απαιτείται μόνο από ένας πομποδέκτης ανά κόμβο. Η ανάθεση του OVFSF απεικονίζεται σε δομή δέντρου κώδικα (Σχήμα 41α). Το κωδικό-δέντρο είναι ένα ισορροπημένο δυαδικό δέντρο, όπου οι ακμές του δέντρου αντιπροσωπεύουν τις κωδικές λέξεις. Η ρίζα συνδέεται με την κωδική λέξη "1". Αναδρομικά, αν ένας κόμβος έχει κωδική λέξη x , τότε τα δύο παιδιά του έχουν τις κωδικές λέξεις xx και $\bar{x}x$ αντίστοιχα, όπου το \bar{x} είναι το συμπλήρωμα του x . Έτσι, στο επίπεδο t υπάρχουν $2t$ κωδικές λέξεις, με μήκος 2^t bit. Επιπλέον, για να απλουστευθεί αυτό υιοθετείται η i -οστή OVFSF-CDMA κωδική λέξη στο [168], σύμφωνα με την οποία το στρώμα t έχει $(t+1)$ bit δυαδικής αναπαράστασης, όπου το πιο σημαντικό bit είναι πάντα 1 και τα υπόλοιπα m bits είναι η δυαδική αναπαράσταση του ακέραιου $i-1$. Για παράδειγμα, η $1^{\text{η}}$ κωδική λέξη στο στρώμα 3 του δέντρου κωδικής λέξης είναι 10101010, το οποίο το συμβολίζουμε 1000 σε δυαδική αναπαράσταση, η $3^{\text{η}}$ κωδική λέξη στο στρώμα 3 του δέντρου κωδικής λέξης είναι 10011001, το οποίο συμβολίζουμε 1010 σε δυαδική αναπαράσταση (Σχήμα 41β).



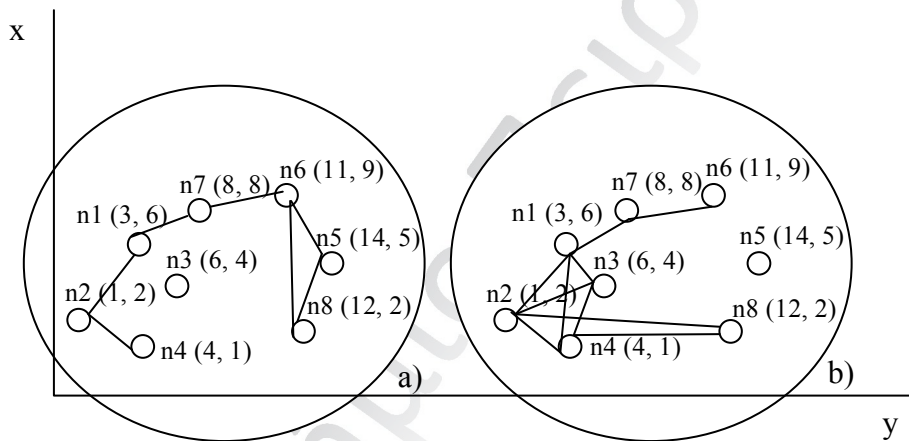
Σχήμα 41. Κώδικας OVFSF: α) δομή του δέντρου, β) δυαδική απεικόνιση των χρωμάτων.

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ένας κόμβος i μπορεί να λάβει ένα σήμα από έναν κόμβο j εάν ο λόγος της ισχύος που λαμβάνει από τον j προς την ολική ισχύ P_i που λαμβάνεται από όλους τους άλλους κόμβους είναι πάνω από ένα όριο. Ανάλογα με τη θέση του [169], τον αριθμό των γειτόνων, και το επίπεδο της μπαταρίας, κάθε κόμβος i θα προσαρμόσει την ισχύ εκπομπής P_i σε ένα δεδομένο εύρος $[0, P]$, όπου P είναι η μέγιστη ισχύς ενός κόμβου. Η ισχύς του σήματος που εκπέμπεται από τον κόμβο i και παραλήφθηκε από τον κόμβο j είναι $P_i L(x_i - x_j)$, όπου x_i και x_j είναι οι θέσεις των κόμβων i και j , αντίστοιχα, και $L(x)$ είναι η συνάρτηση εξασθένησης σε ασύρματο μέσο. Υποθέτουμε ότι ο κόμβος i μπορεί να μεταδώσει τα δεδομένα στον κόμβο j εάν το σήμα που λαμβάνεται από τον j είναι αρκετά ισχυρό, σε σύγκριση με το θερμικό θόρυβο. Επισήμως, αυτή η κατάσταση είναι γραμμένη ως

$$\frac{P_i L(x_i - x_j)}{N_0 + \gamma \sum_{k \neq i, j} P_k L(x_k - x_j)} \geq \beta, \quad (31)$$

όπου N_0 είναι η δύναμη του θερμικού θορύβου και β είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο που απαιτείται για την επιτυχή αποκωδικοποίηση. Ο συντελεστής γ είναι το αντίστροφο του κέρδους επεξεργασίας του συστήματος, και δίνει βάρη στην επίδραση των παρεμβολών, ανάλογα με την ορθογωνιότητα μεταξύ των κωδικών που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια ταυτόχρονης μεταδόσης. Είναι ίσος με 1 σε ένα στενό σύστημα ζώνης, και είναι μικρότερο από 1 σε ένα ευρυζωνικό σύστημα που χρησιμοποιεί CDMA. Το φυσικό μοντέλο του Gurta και Kumar [168] υποθέτει $\gamma = 1$; άλλα μοντέλα [170] επιτρέπουν το γ να είναι μικρότερο από 1.

Στο προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιείται το γράφημα παρεμβολής προκειμένου να οριστούν οι κωδικοί OVSF στους κόμβους. Αν δύο κόμβοι δεν παρεμβάλλουν (δεν υπάρχει ακμή μεταξύ αυτών των δύο κόμβων στο γράφημα παρεμβολής), τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τους δύο κόμβους η ίδια κωδική λέξη και να μειωθεί ο αριθμός των κωδικών λέξεων που απαιτούνται. Από την άλλη πλευρά, εάν υπάρχει μία ακμή στο γράφημα μεταξύ δύο κόμβων, τότε οι κόμβοι δεν πρέπει να έχουν την ίδια κωδική λέξη, αφού θα υπάρχουν παρεμβολές.



Σχήμα 42. Γράφημα παρεμβολής για τις συστάδες: α) $n3$ είναι ο επικεφαλής, β) $n5$ είναι ο επικεφαλής.

Το παραπάνω γράφημα αποδεικνύει ότι ο αριθμός των διαφορετικών χρωμάτων που απαιτείται (δηλαδή ο μέγιστος βαθμός του γραφήματος) εξαρτάται από την επιλογή του επικεφαλής συμπλέγματος. Έτσι, σε περίπτωση που ο κόμβος $n3$ εκλεγεί ως επικεφαλής του συμπλέγματος απαιτούνται 4 χρώματα, διαφορετικά, σε περίπτωση που ο κόμβος $n5$ εκλέγεται ως επικεφαλής του συμπλέγματος απαιτούνται 5 χρώματα. Δεδομένου ότι, χρησιμοποιούμε TDMA/CDMA, ο αριθμός των χρονοθυρίδων του πλαισίου TDMA/CDMA υπολογίζεται ως εξής:

$$timeslots = \frac{n_nodes}{color}, \quad (32)$$

όπου n_nodes είναι ο αριθμός των κόμβων του συμπλέγματος και $color$ είναι ο αριθμός των χρωμάτων που απαιτούνται για το γράφημα.

```

G = (V, E);
Degree(v);
uncolored = V;
currentColor = 0;
while uncolored nodes;
    A = first element of uncolored;
    remove A from uncolored;
    Color(A) = currentColor;
    coloredWithCurrent = {A};
    for each v in uncolored;
        if v is not adjacent to anything in coloredWithCurrent;
            Color(v)=currentColor;
            add v to currentColor;
            remove v from uncolored;
            end if
    end for
    currentColor = currentColor + 1;
end while

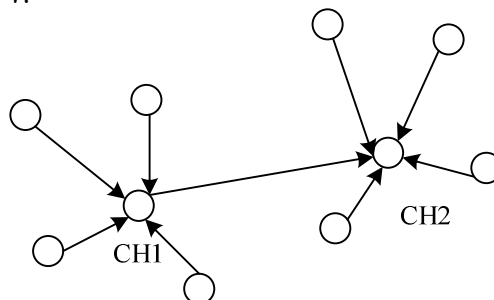
```

Σχήμα 43. Ο αλγόριθμος επιλογής κώδικα που χρησιμοποιείται στο HYCLRP [171].

5.3.4 Φάση Δρομολόγησης

Η διαδικασία της δρομολόγησης στο HYCLRP αποτελείται από δύο φάσεις: της αρχικοποίησης και της σταθερής κατάστασης. Κατά τη διάρκεια της φάσης της προετοιμασίας ο BS εκπέμπει ένα αίτημα χρονοδιαγράμματος στους κόμβους για να διαφημίσουν τον εαυτό τους. Οι κόμβοι μεταδίδουν τις διαφημίσεις τους χρησιμοποιώντας την ίδια ενέργεια εκπομπής και έτσι καθορίζονται οι σχετικές αποστάσεις μεταξύ τους. Μετά από αυτό ο BS επιλέγει τυχαία έναν προκαθορισμένο αριθμό υψηλού και χαμηλού επιπέδου επικεφαλής και μεταδίδει τα στοιχεία των νέων επικεφαλής και τις τιμές της ενέργειάς τους. Κατά τη διάρκεια της σταθερής κατάστασης, ο επικεφαλής του συμπλέγματος καθορίζει την πλέον ενεργειακά αποδοτική διαδρομή που θα ακολουθήσει το μήνυμα προς το σταθμό βάσης.

Οι κόμβοι του δικτύου ομαδοποιούνται σε συστάδες. Στο Σχήμα 44 οι κόμβοι του χαμηλού επιπέδου συμπλέγματος αποστέλλουν τα δεδομένα στον επικεφαλής CH1 που είναι ο επικεφαλής του χαμηλότερου επιπέδου συμπλέγματος. Ο CH1 συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους κόμβους του συμπλέγματος του και τα αποστέλλει στον CH2 ο οποίος είναι ο επικεφαλής ανώτερου επίπεδου. Ο CH2 αποστέλλει τα δεδομένα που λαμβάνει από τον χαμηλότερου επιπέδου επικεφαλής και από τους κόμβους από το σύμπλεγμα του στο BS.



Σχήμα 44. Κατώτερου και ανώτερου επιπέδου συστάδες.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι εκλέγει επικεφαλής συμπλέγματος λαμβάνοντας υπόψη την εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων και την απόστασή τους από τους άλλους κόμβους. Οι l κόμβοι που έχουν την μεγαλύτερη υπολειμματική ενέργεια στη συστάδα είναι οι υποψήφιοι επικεφαλής. Ο κόμβος από τους l που έχει τη μικρότερη συνολική απόσταση από τους άλλους κόμβους εκλέγεται ως επικεφαλής. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται η εξισορρόπηση ενέργειας και η κατανάλωση της ενέργειας των κόμβων γίνεται σε πιο ομοιόμορφο τρόπο. Επιπλέον, η παρεμβολή ελαχιστοποιείται και χρησιμοποιούνται λιγότερες κωδικές λέξεις.

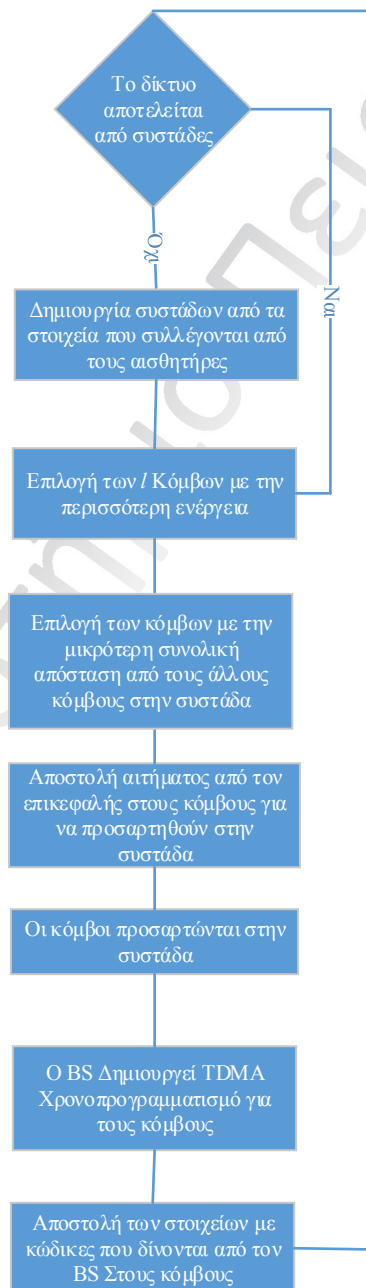
Τα βήματα της φάσης αρχικοποίησης είναι τα ακόλουθα:

1. Ο BS δημιουργεί ένα χρονοδιάγραμμα TDMA και ζητάει από όλους τους κόμβους του δικτύου να διαφημίσουν τον εαυτό τους, μια διαδικασία που είναι παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται από άλλα πρωτόκολλα.
2. Κάθε κόμβος μεταδίδει ένα μήνυμα για να διαφημίσει το επίπεδο της ενέργειας και της θέση του σε γειτονικούς κόμβους. Ως εκ τούτου, κάθε κόμβος δημιουργεί ένα πίνακα πληροφοριών με το επίπεδο της ενέργειας και τις θέσεις των γειτόνων του και στέλνει αυτό το πίνακα μαζί με τις αντίστοιχες πληροφορίες του σε γείτονες κόμβους. Η ενημέρωση όλων των κόμβων του δικτύου αποστέλλεται στο BS, επιτρέποντάς του να έχει μια σφαιρική γνώση του δικτύου.
3. Ο BS χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που συλλέγονται από τους κόμβους και φτιάχνει το γράφημα παρεμβολών του δικτύου. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης χρησιμοποιείται για να εκλέξει τον επικεφαλής κάθε ομάδας με βάση το διάγραμμα παρεμβολής και την υπολειμματική ενέργεια των κόμβων. Επιπλέον, καθορίζει τις κωδικές λέξεις που οι κόμβοι πρέπει να υιοθετήσουν, προκειμένου να αποφευχθεί η παρεμβολή. Στο πρώτο στάδιο της επιλογής του επικεφαλής ο BS επιλέγει τους κόμβους πιο κοντά στον εαυτό του να είναι οι επικεφαλής υψηλού επιπέδου. Επιπλέον, κάποιοι από τους κόμβους από τους οποίους ο BS δεν έχει λάβει κανένα μήνυμα άμεσης διαφήμιση θεωρούνται χαμηλού επιπέδου επικεφαλής. Ο συνολικός αριθμός των κόμβων που έχουν επιλεγούν να είναι επικεφαλής είναι 5% του συνολικού αριθμού των κόμβων στο δίκτυο, καθώς αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για την επίτευξη καλών επιδόσεων σε ένα ομοιογενές δίκτυο με διάφορες ρυθμίσεις παραμέτρων [63]. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλα ποσοστά.
4. Ο BS μεταδίδει τους κωδικούς των νεοεπιλεγμένων επικεφαλής και των μελών των ομάδων τους και οι κόμβοι χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για να σχηματίσουν και να προσαρτηθούν σε ένα σύμπλεγμα.

Τα βήματα της σταθερής κατάστασης είναι τα ακόλουθα:

1. Οι κόμβοι με βάση τον κώδικα που τους έχει ανατεθεί, χρησιμοποιούν το CDMA για να στείλουν τα δεδομένα στον επικεφαλής. Η ισχύς εκπομπής του κάθε κόμβου ρυθμίζεται στο ελάχιστο αναγκαίο για να επικοινωνήσει με τον επόμενο γείτονα του. Με αυτόν τον τρόπο, τόσο η παρεμβολή με άλλες μεταδόσεις όσο και η κατανάλωση της ενέργειας είναι μειωμένη.
2. Οι επικεφαλής του χαμηλότερου επιπέδου δεν επικοινωνούν άμεσα με τον BS. Χρησιμοποιούν τους επικεφαλής ανώτερου επιπέδου ως ενδιάμεσους αναμεταδότες των δεδομένων τους στο BS. Επιπλέον, ο ραδιοπομπός κάθε κόμβου απενεργοποιείται σε όλες τις χρονικές περιόδους, εκτός της μεταφοράς των δεδομένων. Ως εκ τούτου, μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας κάθε κόμβου.

3. Κάθε επικεφαλής χαμηλότερου επιπέδου συγκεντρώνει τα στοιχεία από τους κόμβους της συστάδας του και στη συνέχεια μεταδίδει τα δεδομένα συμπιεσμένα στον επικεφαλής ανώτερου επιπέδου μέχρι τα δεδομένα να προσεγγίσουν το σταθμό βάσης. Ένας γύρος διαβίβασης των δεδομένων έχει ολοκληρωθεί και το πρωτόκολλο συνεχίζει από το βήμα 4 της φάσης αρχικοποίησης στον επόμενο γύρο.
4. Σε περίπτωση που υπάρχει αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου, είτε λόγω μεταβολής της θέσης κάποιου κόμβου ή απενεργοποίησης ενός κόμβου, ο BS χρησιμοποιεί και πάλι τον αλγόριθμο για να καθορίσει την κατάλληλη εκλογή κώδικα.
5. Η εκτέλεση του πρωτοκόλλου τερματίζεται όταν όλοι οι κόμβοι του δικτύου ξεμείνουν από ενέργεια.



Σχήμα 45. Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου μοντέλου.

5.4 Ανάλυση Πολυπλοκότητας

Η πολυπλοκότητα του πρωτοκόλλου σχετίζεται με τον αριθμό n των κόμβων του δικτύου. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε τα άνω και κάτω όρια της πολυπλοκότητας του προτεινόμενου συστήματος. Ειδικότερα, η υπολογιστική πολυπλοκότητα αξιολογείται με βάση τον αριθμό των αναμενόμενων πράξεων. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο έχει δύο κύρια μέρη όπου πρέπει να αξιολογηθεί η υπολογιστική πολυπλοκότητα: το τμήμα επιλογής επικεφαλής και το τμήμα επιλογής του κώδικα.

Στο πρώτο μέρος το πρωτόκολλο πρέπει να υπολογίσει την συνολική απόσταση κάθε κόμβου από τους άλλους κόμβους του δικτύου όπως περιγράφεται στην (28). Αν ο αριθμός των κόμβων είναι l , τότε πρέπει να γίνουν $l-1$ πράξεις ανά κόμβο. Στη χειρότερη περίπτωση το l είναι ίσο με το συνολικό αριθμό των κόμβων που είναι n . Τότε η συνολική πολυπλοκότητα CAs των n κόμβων έχει ως εξής:

$$C_{selection_worst} = n(n-1) = n^2 - n. \quad (33)$$

Στην καλύτερη περίπτωση το l είναι ίσο με 1 κόμβο του συμπλέγματος. Τότε η συνολική CAs των κόμβων έχει ως εξής:

$$C_{selection_best} = 1. \quad (34)$$

Τότε οι κόμβοι ταξινομούνται με βάση την υπολειπόμενη ενέργεια και ο κόμβος με την υψηλότερη υπολειμματική ενέργεια και τη μικρότερη συνολική απόσταση επιλέγεται ως επικεφαλής. Η πολυπλοκότητα αυτής της διαδικασίας είναι ως εξής:

$$C_{sort} = n^2. \quad (35)$$

Ως εκ τούτου, η πολυπλοκότητα χειρότερης περίπτωσης του πρώτου μέρους έχει ως εξής:

$$C_{head_selection_worst} = n^2 - n + n^2 = 2n^2 - n. \quad (36)$$

Ως εκ τούτου, η πολυπλοκότητα καλύτερης περίπτωσης του πρώτου μέρους έχει ως εξής:

$$C_{head_selection_best} = n^2 + 1. \quad (37)$$

Στο τμήμα επιλογής του κώδικα η πολυπλοκότητα του πρωτοκόλλου είναι $O(1)$ και περιγράφεται ως εξής:

$$C_{code_selection} = n-1 + n-2 + n-3 + \dots + 1 = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (38)$$

Η συνολική πολυπλοκότητα χειρότερης περίπτωσης του πρωτοκόλλων από το πρώτο και το δεύτερο μέρος είναι ως εξής:

$$C_{total_worst} = C_{head_selection_worst} + C_{code_selection} = 2n^2 - n + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{2} = \frac{5n^2}{2} - \frac{3n}{2}. \quad (39)$$

Η συνολική πολυπλοκότητα καλύτερης περίπτωσης του πρωτοκόλλου από το πρώτο και δεύτερο μέρος έχει ως εξής:

$$C_{total_best} = C_{head_selection_best} + C_{code_selection} = n^2 + 1 + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{2} = 2n^2 - \frac{n}{2} + 1. \quad (40)$$

5.5 Εκτίμηση Επίδοσης του προτεινόμενου μοντέλου

Για να αξιολογήσουμε την επίδοση του HYCLRP, έγιναν προσομοιώσεις σε διαφορετικές τοπολογίες δικτύου 100mx100m. Η γενική αρχιτεκτονική του δικτύου που εξετάστηκε είναι η ακόλουθη:

- Ένας σταθερός σταθμός βάσης βρίσκεται μακριά από τους κόμβους.
- Η ενέργεια των κόμβων είναι περιορισμένη με ομοιόμορφη αρχική κατανομή.
- Κάθε κόμβος ανιχνεύει το περιβάλλον με σταθερό ρυθμό και έχει πάντα δεδομένα να στείλει στο σταθμό.
- Οι κόμβοι είναι στατικοί.
- Το δίκτυο είναι ομοιογενές και όλοι οι κόμβοι είναι ισοδύναμοι, δηλαδή έχουν την ίδια υπολογιστική και επικοινωνιακή δυνατότητα.
- Το δίκτυο αγνοεί την θέση των κόμβων, δηλαδή η φυσική θέση των κόμβων δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων.
- Ο πομπός μπορεί να ρυθμίσει την ισχύ του με βάση την απόσταση μεταφοράς.

Παράμετρος	Τιμή
Πεδίο Κόμβων	100x100 m ²
Απόσταση Σταθμού από Αισθητήρες	100 m
Αρχική Ενέργεια Κόμβων	1 Joule
Μήκος Πακέτου	500 Bits
E _{elec}	50 nJ/bit
E _{amp}	100 pJ/bit/m ²

Πίνακας 23. Οι παράμετροι προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση του πρωτοκόλλου.

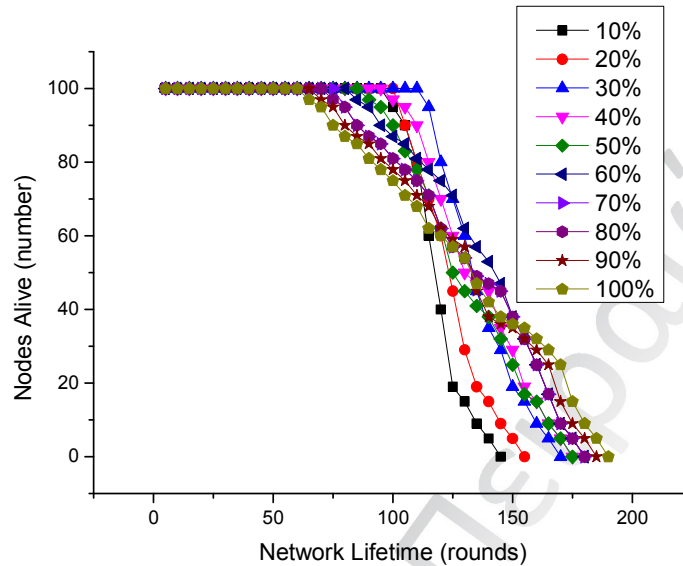
<i>Ποσοστό των κόμβων που είναι υποψήφιοι επικεφαλής l</i>	<i>Χρόνος που εξαντλείται ο πρώτος κόμβος (rounds)</i>	<i>Χρόνος που εξαντλείται ο τελευταίος κόμβος (rounds)</i>
10	100	145
20	105	155
30	115	170
40	110	175
50	90	175
60	85	180
70	80	180
80	75	180
90	70	185
100	65	190

Πίνακας 24. Ποσοστό κόμβων που είναι υποψήφιοι επικεφαλής l συναρτήσει του χρόνου που εξαντλείτε ο πρώτος και τελευταίος κόμβος.

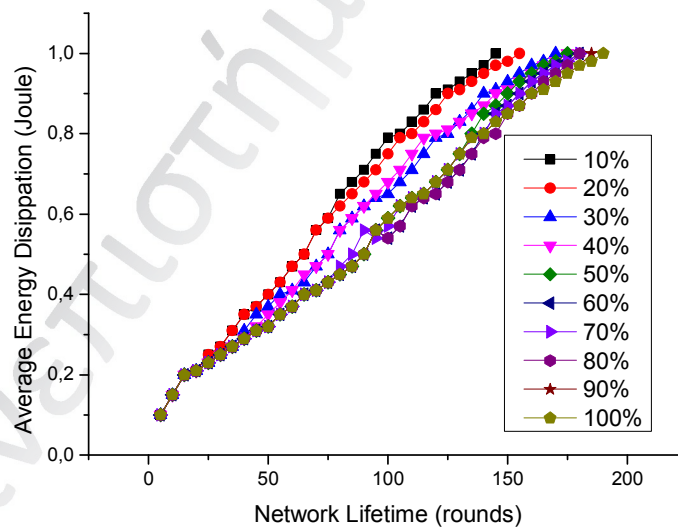
Σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης, εξετάσαμε διαφορετικό αριθμό ομοιογενών κόμβων με αρχική ενέργεια 1J, τυχαία διασκορπισμένους σε ένα πεδίο 100x100 m². Ο BS ήταν τοποθετημένος στο σημείο (0,150), έτσι ώστε να είναι τουλάχιστον 100 μέτρα μακριά από το κέντρο του πεδίου και τα πακέτα που αποστέλλονται είναι 500 bits. Η κατανάλωση ενέργειας που οφείλεται στην επικοινωνία υπολογίζεται με βάση το ενεργειακό μοντέλο πρώτης τάξης. Υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος δημιουργεί ένα πακέτο δεδομένων ανά γύρο που πρέπει να διαβιβάζεται στον BS. Οι κόμβοι αισθητήρων χωρίζονται σε ομάδες που αποτελούνται από επικεφαλής που στέλνουν τα δεδομένα σε επικεφαλής ανώτερου επιπέδου, ώστε να φτάσουν τελικά στο BS. Η απόδοση των πρωτοκόλλων αξιολογούνται από 100 διαφορετικές προσομοιώσεις για κάθε σενάριο, όπου οι κόμβοι είναι τυχαία κατανομημένοι στην επιφάνεια χρησιμοποιώντας μέσες τιμές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Πριν από τη σύγκριση της απόδοσης του προτεινόμενου πρωτοκόλλου με άλλα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα, πρέπει να οριστεί ο αριθμός των κόμβων l που είναι οι υποψήφιοι επικεφαλής. Για να καθορίσουμε αυτή την τιμή έγινε ένας αριθμός προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές του l σε τυχαία τοπολογία. Τα Σχήματα 46 και 47 δείχνουν την απόδοση του HYCLRP σε τυχαία τοπολογία 100 κόμβων σε μια περιοχή 100x100 m². Η απόδοση του HYCLRP εκφράζεται ως ποσοστό των κόμβων που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιοι επικεφαλής l και το συνολικό αριθμό των κόμβων του συμπλέγματος. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των κόμβων l που είναι οι κόμβοι με την υψηλότερη ενέργεια που είναι οι υποψήφιοι επικεφαλής αυξάνεται προκειμένου να επαληθεύσει το βέλτιστο αριθμό. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο έχει μια πιο ομοιόμορφη κατανάλωση ενέργειας, όταν το ποσοστό των υποψήφιων κόμβων l είναι ίσο με 30% των κόμβων του συμπλέγματος. Ωστόσο, στην περίπτωση των διαφορετικών ποσοστών η διάρκεια ζωής του δικτύου μπορεί να επεκταθεί, αλλά ο πρώτος κόμβος μένει από ενέργεια ταχύτερα από τους άλλους κόμβους (Πίνακας 24). Αν λάβουμε υπόψη το Σχήμα. 42, τότε ο κόμβος n_5 που βρίσκεται στην άκρη του συμπλέγματος δεν είναι αποδοτικό να είναι επικεφαλής σύμπλεγμα αφού θα οδηγήσει τους άλλους κόμβους να καταναλώσουν περισσότερη ενέργεια. Επιπλέον, το μήκος των κωδικών λέξεων που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι μεγαλύτερο με βάση το βαθμό του γραφήματος παρεμβολής. Από την άλλη πλευρά, ένας κόμβος που έχει

μικρότερη συνολική απόσταση από τους άλλους κόμβους είναι πιο αποτελεσματικό να είναι επικεφαλής. Ως εκ τούτου, ελαχιστοποιώντας τη λίστα των κόμβων που είναι υποψήφιοι να είναι επικεφαλής οδηγεί τους κόμβους που έχουν την μικρότερη συνολική απόσταση να είναι επικεφαλής.

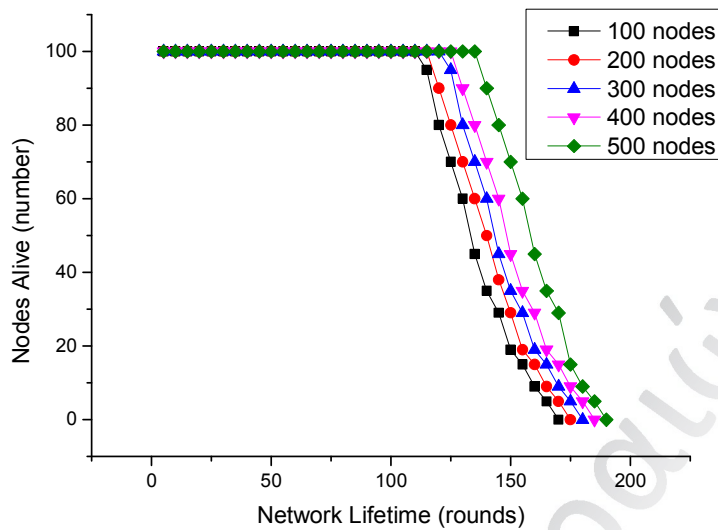


Σχήμα 46. Ενεργοί κόμβοι έναντι του ποσοστού των κόμβων που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιοι επικεφαλής l και του συνολικού αριθμού κόμβων στο σύμπλεγμα.

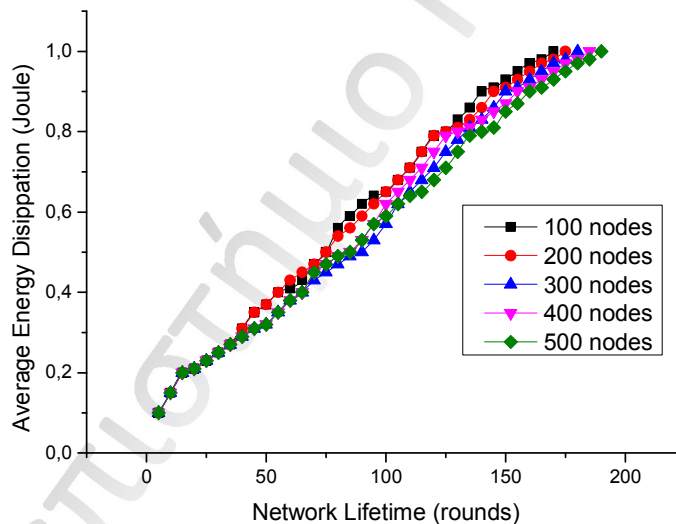


Σχήμα 47. Μέση κατανάλωση ενέργειας έναντι του ποσοστού των κόμβων που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιοι επικεφαλής l και του συνολικού αριθμού κόμβων συμπλέγματος.

Τα Σχήματα 48 και 49 δείχνουν την απόδοση του HYCLRP σε μια τυχαία τοπολογία 100, 200, 300, 400 και 500 κόμβων σε μια περιοχή 100x100 m². Η απόδοση του HYCLRP αξιολογείται λαμβάνοντας υπόψη το l ίσο με το 30% των κόμβων στο σύμπλεγμα που επιλέγονται ως υποψήφιοι επικεφαλής. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η απόδοση του πρωτοκόλλου είναι καλύτερη σε περίπτωση που αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου.

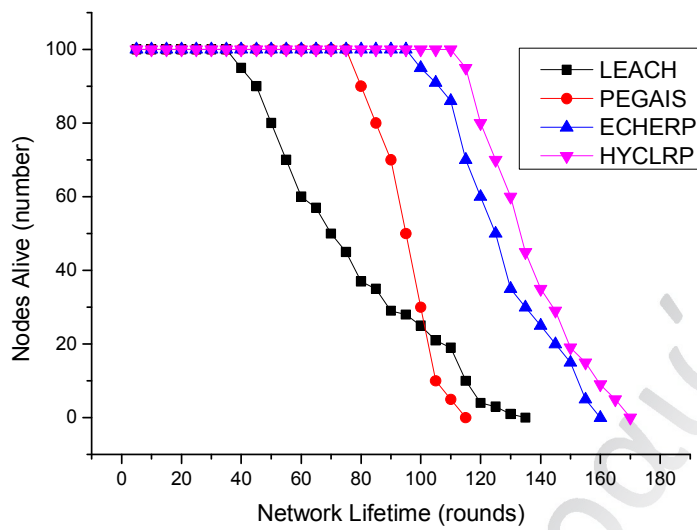


Σχήμα 48. Ενεργοί κόμβοι όταν το ποσοστό των κόμβων που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιοι επικεφαλής είναι ίσο με 30%, ενώ αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου.

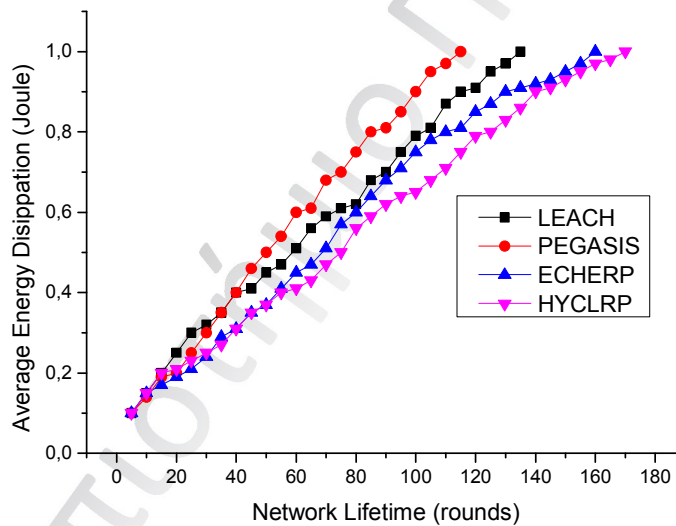


Σχήμα 49. Μέση κατανάλωση ενέργειας όταν το ποσοστό των κόμβων που χρησιμοποιούνται ως υποψήφιοι επικεφαλής είναι ίσο με 30%, ενώ η αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου.

Τα Σχήματα 50 και 51 δείχνουν τη μέση κατανάλωση ενέργειας και τον αριθμό των κόμβων που παραμένουν ενεργοί όταν χρησιμοποιούνται τα LEACH, PEGASIS, ECHERP και HYCLRP [63, 67, 157]. Αυτά τα πρωτόκολλα ακολουθούν το ίδιο μοντέλο ενέργειας για την αποστολή και λήψη δεδομένων. Όπως δείχνουν αυτά τα σχήματα, η απόδοση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου είναι σημαντικά καλύτερη από τα LEACH και PEGASIS και κοντά στις επιδόσεις του ECHERP. Ακριβέστερα, στην περίπτωση των LEACH, PEGASIS και ECHERP, όλοι οι κόμβοι του δικτύου εξαντλούνται από το τέλος του 135^{ου}, 115^{ου} και 160^{ου} γύρου, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, όταν εφαρμόζεται το πρωτόκολλο, ο τελευταίος κόμβος εξαντλείται στον 170^ο γύρο.



Σχήμα 50. Ενεργοί κόμβοι σε σύγκριση με τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.



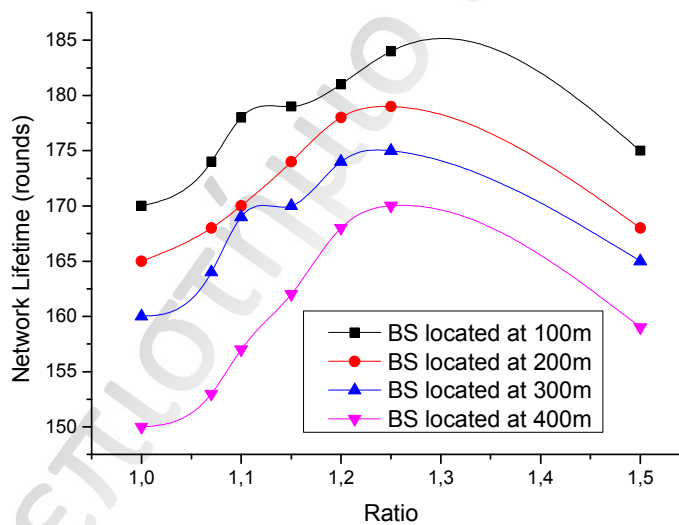
Σχήμα 51. Μέση κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τη διάρκεια ζωής του δικτύου σε γύρους.

Μια πιο αναλυτική περιγραφή μπορεί να προέρχεται εστιάζοντας στον πρώτο κόμβο που μένει από ενέργεια, στον τελευταίο κόμβο που μένει από ενέργεια και στη μέση κατανάλωση ενέργειας. Ο Πίνακας 25 συνοψίζει τα αποτελέσματα, όσον αφορά αυτές τις μετρήσεις οι οποίες απεικονίζονται στα Σχήματα 50 και 51 στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής της ενέργειας.

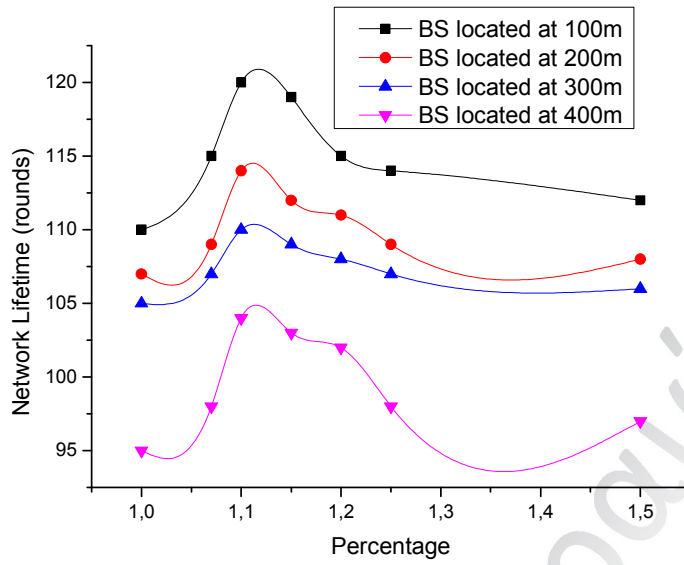
Απόσταση του σταθμού από το πεδίο (m)	Χρόνος που εξαντλείται ο πρώτος κόμβος (%)	Χρόνος που εξαντλείται ο τελευταίος κόμβος (%)	Μέση κατανάλωση ενέργειας (%)	Πρωτόκολλο
100	+97	+25	-37	LEACH
100	+45	+47	-36	PEGASIS
100	+15	+6	-5	ECHERP

Πίνακας 25. Σύγκριση των HYCLRP με LEACH, PEGASIS και ECHERP ως συνάρτηση της απόστασης του σταθμού από το κέντρο του πεδίου, όταν η αρχική ενέργεια κόμβου έχει οριστεί σε 1J.

Τα Σχήματα 52 και 53 περιγράφουν την επίδοση του HYCLRP ως μια αναλογία που εκφράζεται ως ένα κλάσμα του αριθμού των κόμβων από το ανώτερο επίπεδο με τον αριθμό των κόμβων από το κατώτερο επίπεδο. Στο σενάριο που εξετάζεται το σύμπλεγμα ανώτερου επιπέδου έχει περισσότερους κόμβους από το χαμηλότερου επιπέδου και αυτό παρουσιάζεται ως αναλογία. Πιο συγκεκριμένα, είναι αλήθεια ότι οι επικεφαλής ανώτερου επιπέδου μεταδίδουν όχι μόνο τα δικά τους δεδομένα στο σταθμό βάσης, αλλά διαβιβάζουν, επίσης, τα στοιχεία των χαμηλότερων επιπέδων που προορίζονται για το σταθμό βάσης. Ως εκ τούτου, έχουν υψηλότερη μέση κατανάλωση ενέργειας από τους χαμηλότερου επιπέδου.



Σχήμα 52. Χρόνος εξάντλησης τελευταίου κόμβου σε γύρους σε συνάρτηση των κόμβων ανώτερου επιπέδου με τους κόμβους κατώτερου επιπέδου όταν ο BS βρίσκεται 100μ, 200μ, 300μ και 400μ από το κέντρο της περιοχής.



Σχήμα 53. Χρόνος εξάντλησης πρώτου κόμβου γύρους σε συνάρτηση των κόμβων ανώτερου επιπέδου με τους κόμβους κατώτερου επιπέδου όταν ο BS βρίσκεται 100μ, 200μ, 300μ και 400μ από το κέντρο της περιοχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα Διατριβής

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό και παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή των δεδομένων και την αποτελεσματική παράδοσή τους. Η ενεργειακή απόδοση είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα για τα δίκτυα, ιδίως για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία χαρακτηρίζονται από περιορισμένες δυνατότητες ενέργειας. Η πολυπλοκότητα και η εξάρτηση των εργασιών από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων απαιτούν τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών δρομολόγησης και πρωτοκόλλων, τα οποία θα εγγυώνται την συνδεσιμότητα με το δίκτυο και τη διακίνηση των πληροφοριών με την λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια.

Σε αυτή την έρευνα, επικεντρωθήκαμε στα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν αναπτυχθεί για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα κατατάσσουμε σε επίπεδα, ιεραρχικά, με βάση το ερώτημα, συνεκτικά και μη συνεκτικά, με βάση τη διαπραγμάτευση, με βάση την τοπολογία, που βασίζονται σε κινητούς πράκτορες, που βασίζονται πολλαπλές διαδρομές, με βάση το QoS.

Τα επίπεδα πρωτόκολλα μπορεί να είναι ιδανικά για ένα μικρό δίκτυο με σταθερούς κόμβους. Ωστόσο, σε ένα μεγάλο δίκτυο είναι αναποτελεσματικά λόγω της επεξεργασίας. Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα προσπαθούν να λύσουν αυτό το πρόβλημα και να παράγουν κλιμακούμενες και αποτελεσματικές λύσεις. Χωρίζουν το δίκτυο σε ομάδες και διατηρούν αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων αισθητήρων και εκτελούν τη συνάθροιση των δεδομένων, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των μεταδιδόμενων μηνυμάτων στο σταθμό βάσης. Οι συστάδες διαμορφώνονται με βάση το απόθεμα ενέργειας των αισθητήρων και του επικεφαλής του συμπλέγματος. Έτσι, τα ιεραρχικά πρωτόκολλα είναι κατάλληλα για δίκτυα αισθητήρων με βαρύ φορτίο και μεγάλη περιοχή κάλυψης. Από την άλλη πλευρά, τα πρωτόκολλα με βάση τη θέση μπορεί να είναι χρήσιμα για δυναμικά δίκτυα, καθώς δεν χρειάζονται την κατάσταση των δρομολογητών, ούτε την επικεφαλίδα του πακέτου και δεν προκαλούν πλημμύρες στην αναζήτηση. Αυτά χρησιμοποιούν τις πληροφορίες θέσης, προκειμένου να υπολογίσουν την απόσταση μεταξύ των κόμβων, ελαχιστοποιώντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στην διαπραγμάτευση μπορούν να αποδώσουν κοντά στο θεωρητικό βέλτιστο. Από την άλλη πλευρά, δεν μπορούν να εγγυηθούν την επιτυχή παράδοση των δεδομένων. Τα πρωτόκολλα πολλαπλών διαδρομών διατηρούν πολλαπλές διαδρομές από τους κόμβους. Αυτό εξασφαλίζει ανοχή σε σφάλματα και εύκολη ανάκτηση, αλλά επειδή πρέπει να βρουν πολλές διαδρομές υποφέρουν από την επιβάρυνση της συντήρησης των πινάκων. Από την άλλη πλευρά, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης με βάση το ερώτημα στέλνουν ένα ερώτημα για τα δεδομένα από έναν κόμβο μέσω του δικτύου και ο κόμβος που έχει αυτά τα δεδομένα τα αποστέλλει πίσω στους κόμβους προορισμού. Χρησιμοποιείται σε δίκτυα με δυναμικές τοπολογίες δικτύου, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ένα χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων αυτών είναι η υποστήριξη για πολλαπλές απαντήσεις διαδρομής. Το πρόβλημα της ακριβούς παράδοσης των δεδομένων από την πηγή στον προορισμό επιλύεται με τα πρωτόκολλα QoS. Εξασφαλίζουν βελτιστοποιημένες μετρήσεις QoS, όπως καθυστέρηση, ενεργειακή απόδοση και χαμηλή κατανάλωση εύρους ζώνης, επιτυγχάνοντας παράλληλα την ενεργειακή απόδοση στα ασύρματα δίκτυα

αισθητήρων. Τα συνεκτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι ένας μηχανισμός ενεργειακά αποδοτικός όπου μόνο η ελάχιστη επεξεργασία γίνεται από τον κόμβο αισθητήρα. Σε μη – συνεκτικά, οι κόμβοι του δικτύου επεξεργάζονται τοπικά τα πραγματικά δεδομένα και στη συνέχεια τα στέλνουν στους άλλους κόμβους για περαιτέρω επεξεργασία.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι:

- *Η δυναμική του δικτύου:* Τα κύρια συστατικά στοιχεία σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι οι κόμβοι του δικτύου, ο σταθμός βάσης και η καταγραφή περιστατικών. Στις περισσότερες από τις αρχιτεκτονικές δικτύου οι κόμβοι αισθητήρων υποτίθεται ότι είναι σταθεροί. Από την άλλη πλευρά είναι απαραίτητη, η υποστήριξη της κινητικότητας των κόμβων ή του σταθμού βάσης. Τα μηνύματα δρομολόγησης που αποστέλλονται ή λαμβάνονται από τους κόμβους είναι σημαντικά για την κατανάλωση ενέργειας και του εύρους της ζώνης. Η ανίχνευση στην αλλαγή των δεδομένων μπορεί να είναι στατική ή δυναμική και αυτό εξαρτάται από την εφαρμογή. Έτσι, σε μια εφαρμογή ανίχνευσης στόχου, είναι δυναμική, αλλά η παρακολούθηση των δασών για την έγκαιρη πρόληψη των πυρκαγιών είναι στατική.
- *Η ανάπτυξη των κόμβων:* Αυτό επηρεάζει την απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Η ανάπτυξη μπορεί να είναι ντετερμινιστική ή να γίνεται με αυτό-οργάνωση. Σε ντετερμινιστικές καταστάσεις, οι αισθητήρες τοποθετούνται με το χέρι και όλα τα δεδομένα δρομολογούνται μέσω προκαθορισμένων διαδρομών. Σε αυτό-οργάνωση συστημάτων, οι κόμβοι αισθητήρων διασκορπίζονται τυχαία και δημιουργείται υποδομή με ad hoc τρόπο.
- *Η εκτίμηση της ενέργειας:* Η δημιουργία μιας διαδρομής επηρεάζεται από τις εκτιμήσεις της ενέργειας. Δεδομένου ότι η ισχύς μετάδοσης ενός ασύρματου εξαρτάται από το τετράγωνο της απόστασης η δρομολόγησης πολλαπλών-hop θα καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από ότι η άμεση επικοινωνία. Ωστόσο, η δρομολόγηση πολλαπλών hop μπορεί να προσθέσει επιβάρυνση για τον έλεγχο της διαχείρισης τοπολογίας και το μέσο πρόσβασης. Σε αντίθεση, η άμεση δρομολόγηση εκτελείται αρκετά καλά, αν όλοι οι κόμβοι είναι πολύ κοντά στο σταθμό βάσης.
- *Τα μοντέλα παράδοσης δεδομένων:* Το μοντέλο παράδοσης των δεδομένων στο σταθμό βάσης, ανάλογα με την εφαρμογή του δικτύου αισθητήρων, μπορεί να είναι συνεχές, event-driven, με γνώμονα το ερώτημα και υβριδικό. Στο συνεχές πρότυπο παράδοσης, κάθε αισθητήρας στέλνει περιοδικά δεδομένα. Στο μοντέλο με γνώμονα το ερώτημα και το event-driven, η μετάδοση των δεδομένων ενεργοποιείται όταν συμβεί ένα γεγονός ή με ένα ερώτημα που παράγεται από το σταθμό βάσης. Επιπλέον, υπάρχουν ορισμένα δίκτυα που εφαρμόζουν υβριδικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό της συνεχούς, event-driven και με γνώμονα το ερώτημα για την παράδοση των δεδομένων. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης βασίζεται στο μοντέλο παροχής δεδομένων, ιδίως σε σχέση με την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και της σταθερότητας διαδρομής.
- *Οι δυνατότητες του κόμβου:* Σε ένα δίκτυο αισθητήρων, διαφορετικές λειτουργίες μπορεί να συνδέονται με τους κόμβους αισθητήρων. Στα περισσότερα δίκτυα, ένας κόμβος μπορεί να έχει μια συγκεκριμένη ειδική λειτουργία, όπως η μετεγκατάσταση, η αίσθηση και η ομαδοποίηση, όπως την

εμπλοκή των τριών λειτουργιών ταυτόχρονα σε έναν κόμβο που μπορεί να καταναλώσει γρήγορα την ενέργεια αυτού του κόμβου.

- *Η συνάθροιση των δεδομένων:* Οι κόμβοι του δικτύου μπορεί να δημιουργήσουν παρόμοια πακέτα από πολλαπλούς κόμβους που μπορούν να συγκεντρωθούν ώστε να μειωθεί ο αριθμός των μεταδόσεων. Η συνάθροιση των δεδομένων είναι ο συνδυασμός των δεδομένων από διαφορετικές πηγές. Αυτό μπορεί να εκπληρωθεί με τη χρήση λειτουργιών, όπως η καταστολή, min, max και ο κατά μέσο όρος. Αυτές οι λειτουργίες μπορούν να εκτελούνται είτε εν μέρει ή πλήρως σε κάθε κόμβο αισθητήρα. Ο υπολογισμός μπορεί να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από την επικοινωνία και η ουσιαστική εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί μέσω της συνάθροισης των δεδομένων. Αυτή η τεχνική μπορεί να επιτύχει ενεργειακή αποδοτικότητα και βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας σε μια σειρά πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Σε πολλές αρχιτεκτονικές δικτύου όλες οι συναρτήσεις συνάθροισης επιτελούνται στον πιο ισχυρό κόμβο.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ωστόσο, υπάρχει ακόμη πολλή δουλειά που πρέπει να γίνει, όχι μόνο στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης, αλλά επίσης, και σε άλλους τομείς. Μερικοί παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν κατά την ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης μπορεί να είναι η εξής:

- *Ενεργειακά ισορροπημένο δίκτυο.* Κατά την ανάπτυξη ενός ενεργειακά αποδοτικού πρωτοκόλλου δρομολόγησης η εξισορρόπηση του φορτίου της ενέργειας που καταναλώνουν οι αισθητήρες θα πρέπει να είναι ένας από τους κύριους στόχους του πρωτοκόλλου. Αυτό σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου επιλέγοντας όχι μόνο τις μικρότερες διαδρομές αλλά και τις διαδρομές που θα οδηγήσουν στην παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου.
- *Ασφάλεια του δικτύου.* Ένας σημαντικός παράγοντας, εκτός από την κατανάλωση ενέργειας, είναι η ασφάλεια από υποκλοπές και κακόβουλη συμπεριφορά που προσφέρουν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που θα αναπτυχθούν.
- *Κινητικότητα των κόμβων.* Οι κόμβοι του WSN υποτίθεται ότι είναι στατικοί. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές που υποστηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών. Ένα παράδειγμα αυτού είναι οι εφαρμογές ιατρικής φροντίδας όπου οι κινητοί αισθητήρες που συνδέονται με τους ασθενείς πρέπει να στέλνουν συνεχώς δεδομένα από τον ασθενή στο γιατρό. Υπάρχουν μερικά πρωτόκολλα που το καλύπτουν αυτό, αλλά ακόμα υπάρχουν πολλά περιθώρια για τη μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτό.
- *Αξιολόγηση της απόδοσης σε πραγματικό περιβάλλον.* Η πλειονότητα των πρωτοκόλλων για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν αξιολογηθεί μέσω προσομοιώσεων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί η απόδοση αυτών των πρωτοκόλλων σε πραγματικό περιβάλλον με πολλούς χρήστες.
- *Real-Time εφαρμογές και QoS.* Είναι μια συνεχιζόμενη ανάγκη για την ανάπτυξη εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο που θα προσφέρουν υψηλό επίπεδο QoS στους τελικούς χρήστες. Έτσι, είναι σημαντικό οι επιστήμονες να κάνουν πολλές προσπάθειες για να αναπτυχθούν πρωτόκολλα δρομολόγησης που θα προσφέρουν QoS σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

- *Ενσωμάτωση των σταθερών με κινητά δίκτυα.* Οι περισσότερες από τις εφαρμογές, για παράδειγμα, στην παρακολούθηση της υγείας, απαιτούν από τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες να μεταδίδονται σε ένα διακομιστή, έτσι ώστε ο γιατρός να μπορεί να έχει πρόσβαση και να κάνει μια διάγνωση ή να στείλει φαρμακευτική αγωγή στους ασθενείς. Στην περίπτωση αυτή, οι απαιτήσεις της δρομολόγησης σε κάθε περιβάλλον είναι διαφορετικές, είναι απαραίτητη περαιτέρω έρευνα για το χειρισμό αυτού του είδους της κατάστασης.
- *QoS πρωτόκολλα δρομολόγησης.* Το QoS είναι σημαντικό για την παράδοση των δεδομένων σε κρίσιμες εφαρμογές όπως η υγειονομική περίθαλψη. Έτσι, η ανάπτυξη των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που να λαμβάνουν υπόψη τόσο την ενεργειακή απόδοση όσο και την ακριβή παράδοση των δεδομένων θα βοηθήσει προς αυτή την κατεύθυνση.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Αναφορές

- [1] N. A. Pantazis, D. D. Vergados, "A Survey on Power Control Issues in Wireless Sensor Networks", *IEEE Communications Surveys*, 2007, Vol. 9, Issue 4, pp. 86-107.
- [2] Q. Wang, M. Hempstead, W. Yang, "A Realistic Power Consumption Model for Wireless Sensor Network Devices", In the Proceedings of 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, Reston, 2006, Vol. 1, pp. 286-295.
- [3] A. Dunkels, F. Osterlind, N. Tsiftes, Z. He, "Software-Based On-Line Energy Estimation for Sensor Nodes", In the Proceedings of 4th workshop on Embedded Networked Sensors, New York, USA, 2007, pp. 28-32.
- [4] S. Kellner, M. Pink, D. Meier, E. Blass, "Towards a Realistic Energy Model for Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of 5th Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, Garmisch, 2008, pp. 97-100.
- [5] Q. Wang, W. Yang, "Energy Consumption Model for Power Management in Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, San Diego, 2007, pp. 142-151.
- [6] A. Shareef, Y. Zhu, "Energy Modeling of Wireless Sensor Nodes Based on Petri Nets", In the Proceedings of 39th International Conference on Parallel Processing, San Diego, 2010, pp. 101-110.
- [7] H. Zhou, D. Luo, Y. Gao, D. Zuo, "Modeling of Node Energy Consumption for Wireless Sensor Networks", *Wireless Sensor Network*, 2011, Vol. 3, pp. 18-23.
- [8] T. Lee, "The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits", Cambridge University Press, 1998.
- [9] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring", In the Proceedings of 1st International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta, 2002, pp. 88-97.
- [10] P. Wang, I. Akyildiz, "Effects of Different Mobility Models on Traffic Patterns in Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of the IEEE Global Communications Conference Exhibition and Industry Forum (GLOBECOM), 2010, pp. 1-5.
- [11] E. Shi, A. Perrig, "Designing Secure Sensor Networks", In *IEEE Wireless Communications*, December 2004, pp. 38-43.
- [12] A. Basharat, N. Catbas, M. Shah, "A Framework for Intelligent Sensor Network with Video Camera for Structural Health Monitoring of Bridges", In the Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), March 2005, pp. 385-389.
- [13] J. Paek, K. Chintalapudi, R. Govindan, J. Caffrey, S. Masri, "A Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring: Performance and Experience", In the Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors EmNetS-II, Sydney Australia, May 2005, pp. 1-10.
- [14] S. Dengler, A. Awad, F. Dressler, "Sensor/Actuator Networks in Smart Homes for Supporting Elderly and Handicapped People", In the Proceedings of 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2007, pp. 863-868.

- [15] S. Li, "Wireless Sensor Actuator Network for Light Monitoring and Control Application", In the Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2006, pp. 974-978.
- [16] C. Lombriser, N. Bharatula, D. Roggen, G. Tröster, "On-Body Activity Recognition in a Dynamic Sensor Network", In the Proceedings of 2nd International Conference on Body Area Networks (BodyNets), Florence, Italy, June 2007, pp. 1-6.
- [17] P. Gibbons, B. Karp, Y. Ke, S. Nath, S. Seshan, "IrisNet: AN Architecture for a Worldwide Sensor Web", *IEEE Pervasive Computing*, 2003, Vol. 2, Issue 4, pp. 22-33.
- [18] M. Srivastava, M. Hansen, J. Burke, A. Parker, S. Reddy, G. Saurabh, M. Allman, V. Paxson, D. Estrin, "Wireless Urban Sensing System", CENS Technical Report 65, pp. 1-20.
- [19] A. Dunkels, R. Gold, S. Marti, A. Pears, M. Uddenfeldt, "Janus: An Architecture for Flexible Access to Sensor Nnetwork", In the Proceedings of 1st ACM Workshop on Dynamic Interconnection of Networks, Cologne, Germany, September 2005, pp 48-52.
- [20] D. Kandris, P. Tsioumas, A. Tzes, G. Nikolakopoulos, D. Vergados, Power Conservation through Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks, *Sensors* 2009, 9, 7320-7342.
- [21] Z. Jin, Y. Ping, Z. Wang, L. Ping, L. Guang, A Survey on position-based Routing Algorithms in wireless sensor networks. *Algorithms* 2009, 2, 158-182.
- [22] W. Liao, K. Chang, S. Kedia, An Object Tracking Scheme for Wireless Sensor Networks using Data Mining Mechanism. In Proceedings of the Network Operations and Management Symposium, Maui, HI, USA, 2012; pp. 526-529.
- [23] M. Tubaishat, P. Zhuang, Q. Qi, Y. Shang, Wireless Sensor Networks in Intelligent Transportation Systems, *Wireless Communication Mobile Computing*, 2009, 9, 287-315.
- [24] A. Wood, J. Stankovic, G. Virone, L. Selavo, H. Zhimin, C. Qiuhua, D. Thao, W. Yafeng, F. Lei, R. Stoleru, Context-Aware Wireless Sensor Networks for Assisted Living and Residential Monitoring, *Network*, 2008, 22, 26-33.
- [25] A. Alemdar, M. Ibnkahla, Wireless Sensor Networks: Applications and Challenges. In Proceedings of the 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications, Sharjah, United Arab Emirates, 2007; pp. 1-7.
- [26] R. Vidhyapriya, P. Vanathi, Energy Aware Routing for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the International Conference on Signal Processing, Communications and Networking, Chennai, India, 2007; pp. 545-550.
- [27] S. Nikolettseas, P. Spirakis, Probabilistic Distributed Algorithms for Energy Efficient Routing and Tracking in Wireless Sensor Networks, *Algorithms*, 2009, 2, 121-157.
- [28] Al-Karaki, A. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor networks: A Survey", *International Journal of Security and Networks*, 2004, Vol. 11, Issue 6, pp. 6- 28.
- [29] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey", *Computer Networks*, 2002, Vol. 38, pp. 399-422.
- [30] K. Akkaya, M. Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks", *Elsevier Ad Hoc Network*, 2005, Vol. 3, Issue 3, pp. 325-349.
- [31] S. Guo, O. Yang, "Energy-Aware Multicasting in Wireless Ad hoc Networks: A Survey and Discussion", *Elsevier Computer Communications Journal*, 2007, Vol. 30, Issue 9, pp. 2129-2148.

- [32] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, "Wireless Sensor Network Survey", *Computer Networks*, 2008, Vol. 52, pp. 2292-2330.
- [33] G. Anastasi, M. Conti, M. Francesco, A. Passarella, "Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A survey", *Ad Hoc Networks*, 2009, Vol. 7, pp. 537-568.
- [34] R. V. Biradar, V. C. Patil, S. R. Sawant, R. R. Mudholkar, "Classification and Comparison of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks", *In Special Issue on Ubiquitous Computing Security Systems*, 2009, Vol. 4, pp. 704-711.
- [35] R. Yadav, S. Varma, N. Malaviya, "A Survey of MAC Protocols for Wireless Sensor Networks", *UbiCC Journal*, 2009, Vol. 4, Issue 3, pp. 827-833.
- [36] S. Ehsan, B. Hamdaoui, "A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoS Assurances for Wireless Multimedia Sensor Networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, Vol. 15, Issue 2, pp. 265-278.
- [37] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva, D. Patel, S. Roundy, "PicoRadio Supports Ad hoc Ultralow Power Wireless Networking," *IEEE Computer*, vol. 33, no. 7, pp. 42-48, July 2000.
- [38] A. P. Chandrakasan, R. Min, M. Bhardwaj, S. Cho, A. Wang, "Power Aware Wireless Microsensor Systems," Keynote paper at ESSCIRC, Florence, Italy, Sept. 2002.
- [39] L. Alazzawi, A. Elkateeb, "Performance Evaluation of the WSN Routing Protocols Scalability", *Computer Systems, Networks, and Communications*, Vol. 14, pp. 1-9.
- [40] S.C. Ergen, P. Varaiya, "On Multi-Hop Routing for Energy Efficiency", *IEEE Communications Letter*, 2005, Vol. 9, Issue 10, pp. 880-881.
- [41] Y. J. Zhai, R. Govindan, D. Estrin, "Residual Energy Scans for Monitoring Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02), Orlando, USA, 2002, Vol. 1, pp. 356-362.
- [42] R. Mini, M. Machado, A. Loureiro, B. Nath, "Prediction-Based Energy Map for Wireless Sensor Networks", *Ad Hoc Networks*, 2005, Vol.3, Issue 2, pp. 235-253.
- [43] D. Guidoni, R. Mini, A. Loureiro, "Creating Small-World Models in Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of 19th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Cannes, France, 2008, pp. 1-6.
- [44] L. Junhai, X. Liu, Y. Danxia, "Research on Multicast Routing Protocols for Mobile ad-hoc Networks", *Computer Networks*, 2008, Vol. 52, Issue 5, pp. 988-997.
- [45] A. Savvides, C. Han, M. Srivastava, "Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors", In the Proceedings of the 7th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), July 2001, Italy, pp. 166-179.
- [46] P. Arce, J. Guerri, A. Pajares, O. Lázaro, "Performance Evaluation of Video Streaming Over Ad Hoc Networks Using Flat and Hierarchical Routing Protocols", Book: *Mobile Networks and Applications*, 2008, pp. 324-336.
- [47] S. Murphy, L. Aceves, "An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks", *ACM Journal of Mobile Networks and Applications*, USA, Hingham, 1996, Vol. 1, Issue 2, pp. 183-197.

- [48] B. Bellur, R. Ogier, "A Reliable, Efficient Topology Broadcast Protocol for Dynamic Networks", In the Proceedings of IEEE INFOCOM '99, New York, USA, 1999, vol.1 pp.178-186.
- [49] R. Ogier, F. Templin, M. Lewis, "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)", RFC Editor 2004.
- [50] H. Pucha, S. Das, Y. Hu, "The Performance Impact of Traffic Patterns on Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks", *Computer Networks*, 2007, Vol. 51, Issue 12, pp. 3595-3616.
- [51] D. Park, S. Corson, "A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks", In the Proceedings of 16th Conference on Computer and Communications Societies, Japan, 1997, pp. 1405-1413.
- [52] S. Bali, "Performance Comparisons of DSR and TORA", *Wireless Networks and Mobile Computing*, South Carolina, 2001.
- [53] S. Hedetniemi, A. Liestman, "A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks", Book: Networks, 1998, Vol. 18, Issue 4, pp. 319-349.
- [54] H. Lim, C. Kim, "Flooding in Wireless Ad Hoc Networks", *Computer Communications*, 2001, Vol. 24, pp. 353-363.
- [55] M. Ma, Y. Yang, C. Ma, "Single-Path Flooding Chain Routing in Mobile Wireless Networks", *International Journal of Sensor Networks*, 2006, Vol. 1, pp. 11-19.
- [56] D. Braginsky, D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks", In the Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, USA, Atlanta, 2002, pp. 22-31.
- [57] F. Yu, Y. Li, F. Fang, Q. Chen, "A New TORA-Based Energy Aware Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks", In the Proceedings of 3rd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet (ICI), September 2007, pp. 1-4.
- [58] K. Yadav, J. Singh, B. Singla, "Proactive vs Reactive Protocols for Ad-Hoc Networks", In the Proceedings of the World Congress on Science, Engineering and Technology, Germany, August 2008.
- [59] S. Lee, Y. Yu, S. Nelakuditi, Z. Zhang, C. Chuah, "Proactive vs Reactive Approaches to Failure Resilient Routing", In the Proceeding of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, China, 2004, Vol. 1, pp. 176-186.
- [60] Li Layuan, Li Chunlin, Yaun Peiyan, "Performance Evaluation and Simulations of Routing Protocols in Ad Hoc Networks", *Computer Communications*, 2007, Vol. 30, Issue 8, pp. 1890-1898.
- [61] Z.J. Haas, "A New Routing Protocol for the Reconfigurable Wireless Networks", In the Proceedings of 6th International Conference on Universal Personal Communications Record, San Diego, CA, 1997, Vol. 2, pp. 562-566.
- [62] Z. Haas, M. Pearlman, "The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol", In the Proceedings of IEEE/ACM Transactions on Networking, USA, Piscataway, August 2001, Vol. 9, Issue 4, pp. 427-438.
- [63] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", In the Proceedings of 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, HI, USA, 2000, pp. 1-10.
- [64] M. J. Handy, M. Haase, D. Timmermann, "Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection", In the Proceedings of 4th

- International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network, 2002, pp. 368-372.
- [65] D. A. Vidhate, A. K. Patil, S. S. Pophale, "Performance Evaluation of Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol for Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET 2010) – TCET, Mumbai, India, 2010, pp. 59-63.
- [66] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1, Issue 4, 2002, pp. 60-70.
- [67] S. Lindsey, C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems", In the Proceedings of IEEE Aerospace Conference, USA, Montana, March 2002, Vol. 3, pp. 1125-1130.
- [68] S. Jung, Y. Han, T. Chung, "The Concentric Clustering Scheme for Efficient Energy Consumption in the PEGASIS", In the Proceedings of 9th International Conference on Advanced Communication Technology, Gangwon-Do, February 2007 Vol. 1, pp. 260-265.
- [69] L. Almazaydeh, E. Abdelfattah, M. Al-Bzoor, A. Al-Rahayfeh, "Performance Evaluation of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks", *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 2010, Vol. 2, Issue 2, pp. 64-73.
- [70] A. Manjeshwar, D. Agrawal, "Teen: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'01) Workshops, USA, California, 2001, pp. 2009-2015.
- [71] A. Manjeshwar, D. Agrawal, "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2002, pp. 195-202.
- [72] J.N Al-Karaki, R. Mustafa, A. Kamal, "Data Aggregation in Wireless Sensor Networks – Exact and Approximate Algorithms", In the Proceedings of IEEE Workshop High Performance Switching and Routing 2004, Phoenix, AZ, Apr. 18-21, 2004.
- [73] H. Luo, F. Ye, J. Cheng, S. Lu, L. Zhang, "TTDD: Two-Tier Data Dissemination in Large-Scale Wireless Sensor Networks", *Wireless Networks*, Springer Netherlands, 2005, Vol. 11, pp. 161-175.
- [74] S. Muruganathan, D. Ma, R. Bhasin, A. Fapojuwo, "A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", *IEEE Communication Magazine*, 2005, Vol. 43, Issue 3, pp. 8-13.
- [75] Y. Yuan, Z. He, M. Chen, "Virtual MIMO-based Cross-layer Design for Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, Vol. 55, Issue 3, pp. 856-864.
- [76] Q. Li, J. Aslam, D. Rus, "Hierarchical Power-aware Routing in Sensor Networks", In the Proceedings of DIMACS Workshop on Pervasive Networking, May 2001.
- [77] Y. Wu, S. Fahmy, N. Shroff, "Energy Efficient Sleep/Wake Scheduling for Multi-Hop Sensor Networks: non-Convexity and Approximation Algorithm", In the Proceedings of 26th Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007), Anchorage, Alaska, 2007, pp. 1568-1576.
- [78] S. Zhao, L. Tan, J. Li, "A Distributed Energy Efficient Multicast Routing Algorithm for WANETs", *Sensor Networks*, 2006, Vol. 2, pp. 62- 67.

- [79] Y. Yang, H. Wu, H. Chen, "SHORT: Shortest Hop Routing Tree for Wireless Sensor Networks", *Sensor Networks*, Vol. 2, pp. 368-374, 2007.
- [80] Y. Jia, L. Zhao, B. Ma, "A Hclustering-Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Supporting Multiple Data Aggregation Qualities", *Sensor Networks*, 2008, Vol. 4, pp. 79-91.
- [81] W. El-Hajj, D. Kountanis, A. Al-Fuqaha, S. Guizani, "A Fuzzy-Based Virtual Backbone Routing for Large-Scale MANETs", *Sensor Networks*, 2008, Vol. 4, Issue 4, pp. 250-259.
- [82] J. Liu, X. Hong, "An Online Energy-Efficient Routing Protocol with Traffic Load Prospects in Wireless Sensor Networks", *Sensor Networks*, 2009, Vol. 5, Issue 3, pp. 185-197.
- [83] S. Giannoulis, C. Antonopoulos, E. Topalis, S. Koubias, "ZRP versus DSR and TORA: A comprehensive survey on ZRP performance", In the Proceedings of the 10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Catania, 2005, pp. 1017-1024.
- [84] N. Sadagopan, B. Krishnamachari, A. Helmy, "Active Query Forwarding in Sensor Networks" *Ad Hoc Networks*, January 2005, Vol. 3, Issue 1, pp. 91-113.
- [85] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks", In the Proceedings of 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, Massachusetts, 2000, pp. 56-67.
- [86] Y. Yao, J. Gehrke, "The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks", In SIGMOD Record, 2002, Vol. 31, Issue 3, pp. 9-18.
- [87] Nikolaos A. Pantazis, Dimitrios J. Vergados, Dimitrios D. Vergados, "Increasing Intelligent Wireless Sensor Networks Survivability by Applying Energy-Efficient Schemes," In the Proceedings of 3rd IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications & Innovations, Springer IFIP (International Federation for Information Processing) 2006, Vol. 204, pp. 657-664.
- [88] N. Sadagopan, B. Krishnamachari, A. Helmy, "Active Query Forwarding in Sensor Networks (ACQUIRE)", *Ad Hoc Networks*, Elsevier, 2005, Vol. 3, Issue 1, pp. 91-113.
- [89] K. Sohrabi, J. Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network", *IEEE Personal Communications*, 2000, Vol. 7, Issue 5, pp 16-27.
- [90] V. Jolly, S. Latifi, "Comprehensive Study of Routing Management in Wireless Sensor Networks - Part-2", In the Proceedings of International Conference on Wireless Networks, Las Vegas, Nevada, USA, 2006, pp. 49-62.
- [91] D. Cevizovic, S. Galovic, S. Zekovic, Z. Ivic, "Boundary Between Coherent and Noncoherent Small Polaron Motion: Influence of the Phonon Hardening", *Physica B: Condensed Matter*, February 2009, Vol. 404, Issue 2, pp. 270-274.
- [92] J. Kulik, W. Rabiner, H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Massachusetts Institute of Technology, USA, Washington, 1999, pp. 174-185.
- [93] F. Bokhari, "Energy-Efficient QoS-based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", *Parallel and Distributed Computing*, Department of Computer Science, Lahore University of Management Sciences, August 2010, Vol. 70, Issue 8, pp. 849-85.
- [94] C. M. Cordeiro, D. P. Agrawal, "Ad hoc & Sensor Networks: Theory and Applications Edition: Illustrated", World Scientific, 2006.

- [95] J. Kulik, W. Heinzelman, H. Balakrishnan, "Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks", *Wireless Networks*, 2004, Vol. 8, Issue 2, pp. 169-185.
- [96] S. Basagni, I. Chlamtac, V. Syrotiuk, B. Woodward, "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)", In the Proceedings of 4th Annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, USA, Texas, 1998, pp. 67-84.
- [97] Y. Yu, R. Govindan, D. Estrin, "Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks", UCLA Computer Science Department Technical Report, 2001, pp. 1-11.
- [98] J. Newsome, D. Song, "GEM: Graph EMbedding for Routing and Data-centric Storage in Sensor Networks Without Geographic Information", In the Proceedings of 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, California, USA, 2003, pp. 76-88.
- [99] B. Blum, T. He, S. Son, J. Stankovic, "IGF: A State-Free Robust Communication Protocol for Wireless Sensor Networks", Technical Report CS-2003-11, Department of Computer Science, University of Virginia, USA, 2003.
- [100] G. Lukachan, M. Labrador, "SELAR: Scalable Energy-Efficient Location Aided Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, USA, FL, 2004, pp. 694-695.
- [101] B. Leong, B. Liskov, R. Morris, "Geographic Routing Without Planarization", In the Proceedings of 3rd Conference on Networked Systems Design & Implementation, San Jose, CA, 2006, Vol. 3, pp. 25-39.
- [102] M. Zimmerling, W. Dargie, J.M. Reason, "Energy-Efficient Routing in Linear Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of 4th IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS 2007), Italy, Pisa, 2007, pp. 1-3.
- [103] D. Chen, P. Varshney, "On-demand Geographic Forwarding for Data Delivery in Wireless Sensor Networks", *Computer Communications*, 2007, Vol. 30, Issue 14-15, pp. 2954-2967.
- [104] L. Zou, M. Lu, Z. Xiong, "PAGER-M: A Novel Location-Based Routing Protocol for Mobile Sensor Networks", In the Proceedings of 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Beijing, China, 2007, pp. 1182-1185.
- [105] I. Stojmenovic, X. Lin, "Loop-free Hybrid Single- Path/Flooding Routing Algorithms with Guaranteed Delivery for Wireless Networks", In the Proceedings of IEEE Transactions, Parallel Distributed Systems, Canada, 2001, Vol. 12, Issue 10, pp. 1023-1032.
- [106] M. Chen, V. Leung, S. Mao, Y. Xiao, I. Chlamtac, "Hybrid Geographical Routing for Flexible Energy-Delay Trade-Offs", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, pp. 4976-4988.
- [107] K. Sha, J. Du, W. Shi, "WEAR: A Balanced, Fault-Tolerant, Energy-Aware Routing Protocol in WSNs", *Sensor Networks*, 2006, Vol. 1, pp. 156-168.
- [108] K. Liu, N. Abu-Ghazaleh, "Aligned Virtual Coordinates for Greedy Geometric Routing in WSNs", *Sensor Networks*, 2008, Vol. 3, Issue 4, pp. 252-265.
- [109] G. Wang, L. Zhang, J. Cao, "Hole-Shadowing Routing in Large-Scale MANETs", *Sensor Networks*, 2008, Vol. 4, Issue 4, pp. 220-229.

- [110] M. Chen, T. Kwon, S. Mao, V. Leung, "Spatial-Temporal Relation-Based Energy-Efficient Reliable Routing Protocol in Wireless Sensor Networks", *Sensor Networks*, 2009, Vol. 5, Issue 3, pp. 129-141.
- [111] M. Al-Otaibi, H. Soliman, "Efficient Geographic Routeless Routing Protocols with Enhanced Location Update Mechanism", *Sensor Networks*, 2010, Vol. 8, pp. 160-171.
- [112] M. Chen, S. Gonzalez, V. Leung, "Applications and Design Issues of Mobile Agents in Wireless Sensor Networks", *IEEE Wireless Communications Magazine*, 2007, pp. 20-26.
- [113] M. Chen, S. Gonzalez, Y. Zhang, V. Leung, "Multi-agent Itinerary Planning in Wireless Sensor Networks", *Computer Science*, 2009, Vol. 22, Issue 10, pp. 584-597.
- [114] M. Chen, L. Yang, T. Kwon, L. Zhou, M. Jo, "Itinerary Planning for Energy-efficient Agent Communication in Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, pp. 1-8.
- [115] M. Tarique, K. Tepe, S. Adibi, S. Erfani, "Survey of Multipath Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks", *Network and Computer Applications*, November 2009, Vol. 32, Issue 6, pp. 1125-1143.
- [116] J. Raju, J. Garcia-Luna-Aceves, "A New Approach to on-Demand Loop-free Multipath Routing", In the Proceedings of 8th International Conference on Computer Communications and Networks, Boston, MA, 1999, pp. 522-527.
- [117] X. Hou, D. Tipper, J. Kabara, "Label-based Multipath Routing (LMR) in Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of 6th International Symposium on Advanced Radio Technologies (ISART), USA, Boulder, March 2004, pp. 113-118.
- [118] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, L. Zhang, "GRAdient Broadcast: A Robust Data Delivery Protocol for Large Scale Sensor Networks", *Wireless Networks*, March 2005, Vol. 11, Issue 3, pp. 285-298.
- [119] Y. Wang, C. Tsai, H. Mao, "HMRP: Hierarchy-Based Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", *Science and Engineering*, 2006, Vol. 9, Issue 3, pp. 255-264.
- [120] J. Zhang, C. Jeong, G. Lee, H. Kim, "Cluster-Based Multi-Path Routing Algorithm for Multi-hop Wireless Network", *Future Generation Communication and Networking*, 2007, Vol. 1, Issue 1, pp. 67-75.
- [121] M. Chen, V. Leung, S. Mao, Y. Yuan, "Directional Geographical Routing for Real-Time Video Communications in Wireless Sensor Networks", *Computer Communications*, 2007, Vol. 30, Issue 17, pp. 1-16.
- [122] M. Chen, V. Leung, S. Mao, "Directional Controlled Fusion in Wireless Sensor Networks", *Mobile Network Application*, April 2009, pp. 220-229.
- [123] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, T. Clausen, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, JP. Vasseur, Internet draft, <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-roll-rpl-18>, February 2011.
- [124] H. Chao, C. Chang, "A Fault-Tolerant Routing Protocol in Wireless Sensor Networks", *Sensor Networks*, 2008, Vol. 2, pp. 66-73.
- [125] H. Soliman, M. Al-Otaibi, "Enhancing AODV Routing Protocol over Mobile ad hoc Sensor Networks", *Sensor Networks*, 2011, Vol. 10, pp. 36-41.
- [126] K. Akkaya, M. Younis, "Energy and QoS Routing for Wireless Sensor Networks", In Cluster Computing, USA, Hingham, 2005, Vol. 8, Issue 2, pp. 179-188.

- [127] G. Shafiullah, A. Agyei, P. Wolfs, "A Survey of Energy-Efficient and QoS-Aware Routing Protocols for Wireless Sensor Networks", Book: Novel Algorithms and Techniques, In Telecommunications, Automation and Industrial Electronics", 2008, pp. 352-357.
- [128] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G. Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network", *IEEE Personal Communications*, 1999, Vol. 7, Issue 5, pp. 16-27.
- [129] T. He, J. Stankovic, C. Lu, T. Abdelzaher, "SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks", In the Proceedings of 23rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2003, pp. 46-55.
- [130] E. Felemban, C. Lee, E. Ekici, "MMSPEED: Multipath Multi-SPEED Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, Vol. 5, Issue 6, pp. 738-754.
- [131] M. Chen, M. Guizani, M. Jo, "Mobile Multimedia Sensor Networks: Architecture and Routing", In the Proceedings of Mobility Management in the Networks of the Future World, Shanghai, 2011, pp. 409-412.
- [132] J. Lian, K. Naik, "Skipping Technique in Face Routing for Wireless ad hoc and Sensor Networks", *Sensor Networks*, 2008, Vol. 4, pp. 92-103.
- [133] M. Chen, T. Kwon, S. Mao, Y. Yuan, V. Leung, "Reliable and Energy-Efficient Routing Protocol in Dense Wireless Sensor Networks", *Sensor Networks*, 2008, Vol. 4, pp. 104-117.
- [134] Y. Chen, N. Nasser, T. El Salti, H. Zhang, "A Multipath QoS Routing Protocol in Wireless Sensor Networks", *Sensor Networks*, 2010, Vol. 7, Issue 4, pp. 207-216.
- [135] Y. Yang, M. Cardei, "Delay-Constrained Energy-Efficient Routing in Heterogeneous Wireless Sensor Networks", *Sensor Networks*, 2010, Vol. 7, Issue 4 pp. 236-247.
- [136] M. B. Haider, S. Imahori, K. Sugihara, "Success Guaranteed Routing in Almost Delaunay Planar nets for Wireless Sensor Communication", *Sensor Networks*, 2011, Vol. 9, Issue 2 pp. 69-75.
- [137] X. Shu, W. Liang, Q. Xiao, Z. Yong, W. Liang, Application Research of WSN in Precise Agriculture Irrigation. International Conference in Environmental Science and Information Application Technology, China, 2009, pp. 297-300
- [138] A. Rehman, A. Abbasi, N. Islam, Z. Shaikh, A Review of Wireless Sensors and Networks' Applications in Agriculture, *Computer Standards and Interfaces*, 2011, 5, (3), pp. 1-8
- [139] S. Diaz, J. Perez, A. Mateos, M. Marinescu, B. Guerra, A Novel Methodology for the Monitoring of the Agricultural Production Process based on Wireless Sensor Networks, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, Vol. 2, Issue 4, pp. 252-265
- [140] K. Stone, A. Smajstrla, F. Zazueta, Microcomputer-based Data Acquisition System for Continuous Soilwater Potential Measurements, *Soil Crop Sci. Soc. Fla*, 1985, pp. 49-53
- [141] F. Zazueta, A. Smajstrla, Microcomputer-Based Control of Irrigation Systems, *Application Engineer Agriculture*, 1992, Vol. 8, Issue 1, pp. 593-596
- [142] M. Meron, R. Assaf, B. Bravdo, R. Wallach, R. Hallel, A. Levin, I. Dahan, Soil Sensor Actuated Microirrigation of Apples, *Proc. Int. Microirrigation Congress*, 1995, pp. 486-491

- [143] R. Testezlaf, F. Zazueta, T. Yeager, A Real-Time Irrigation Control System for Greenhouses, *Application Engineer Agriculture*, 1997, Vol. 10, Issue 1, pp. 329-332
- [144] Y. Kim, R. Evans, Software Design for Wireless Sensor-Based Site-Specific Irrigation, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, Vol. 1, Issue 7, pp. 159-165
- [145] M. Sudha, M. Valarmathi, A. Babu, Energy Efficient Data Transmission in Automatic Irrigation System using Wireless Sensor Networks, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, Vol. 7, Issue 9, pp. 215-221
- [146] Y. Kim, R. Evans, W. Iversen, Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network, *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, Vol. 57, Issue 7, pp. 1379-1387
- [147] P. Xiaohong, M. Zhi, X. Laisheng, X., L. Guodong, A Water-saving Irrigation System Based on Fuzzy Control Technology and Wireless Sensor Network. Proc. Int. Conf. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009, Beijing, pp. 1-4
- [148] V. Dubey, N. Dubey, S. Chouhan, Wireless Sensor Network based Remote Irrigation Control System and Automation using DTMF code. Proc. Int. Conf. Communication Systems and Network Technologies, 2011, USA, pp. 34-37
- [149] R. Zhang, J. Guo, L. Zhang, Y. Zhang, L. Wang, Q. Wang, A Calibration Method of Detecting Soil Water Content based on the Information-sharing in Wireless Sensor Network, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, Vol. 1, Issue 10, pp. 161-168
- [150] G. Hargreaves, 1974: Evapotranspiration. *Rev. Geophys. Space Phys.* 13. 487-494
- [151] C. Thornthwaite, F. Hare, 1965, The Loss of Water to the Air. *Meteor. Monog.* 6, 163-180
- [152] J. Caprio, 1974, The Solar Thermal Unit Concept in Problems Related to Plant Development and Potential Evapotranspiration. *Phenology and Seasonality Modeling*, Springer, 353-364
- [153] S. Idso, R. Reginato, R. Jackson, 1977, An Equation for Potential Evaporation from Soil, Water and Crop Surfaces Adaptable to use by Remote Sensing, *Geophys. Res. letters*, 187-188
- [154] J. Monteith, *Evaporation and Environment*, 1965, *Symp Soc Exp Biol.* 19, pp. 205-34
- [155] J. Doorenbos, W. Pruitt, 1977. *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24, FAO, Rome
- [156] C. Priestlet, R. Taylor, On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters, 1972, pp. 81-92
- [157] S. Nikolidakis, D. Kandris, D. Vergados, C. Douligeris, Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks Through Balanced Clustering. *Algorithms*, 2013, Vol. 6, Issue 1, pp. 29-42
- [158] H. Ferng, R. Tendean, A. Kurniawan, Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with Static Clustering and Dynamic Structure, *Wireless Personal Communications*, 2012, Vol. 65, Issue 2, pp. 347-367.
- [159] W. Tan, W. Lau, O. Yue, Performance analysis of an adaptive, energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, *Parallel and Distributed Computing*, 2012, Vol. 72, Issue 4, pp. 504-514.
- [160] M. Hsu, H. Tsai, Performance evaluation of CDMA-based Wireless Sensor Networks with long-thin topologies, *IEEE Sensors*, 2012, pp. 1-4.

- [161] O. Khadera, A. Willig, An energy consumption analysis of the Wireless HART TDMA protocol, *Computer Communications*, 2013, Vol. 36, pp. 804–816.
- [162] C. Zhihui, K. Aslifaq, Self organization and energy efficient TDMA MAC protocol by wake up for wireless sensor networks, *IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2004, pp. 335-341.
- [163] Z. Yan, Z. Shijue, X. Shaojun, A Scheduling Algorithm for TDMA-Based MAC Protocol in Wireless Sensor Networks. International Workshop on Education Technology and Computer Science 2009, Vol. 3, pp. 148-151.
- [164] B. Liu, B. Otis, C. Chou, S. Jha, A Novel Multi-Channel CDMA System for Wireless Sensor Networks, *Transactions on Sensor Networks*, 2006, Vol. 1, pp. 1-30.
- [165] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, M. Sichitiu, Z-MAC: A hybrid MAC for wireless sensor networks, *Transactions on Networking*, 2008, Vol. 16, pp. 511-524.
- [166] T. Shu, M. Krunz, Energy-Efficient Power/Rate Control and Scheduling in Hybrid TDMA/CDMA Wireless Sensor Networks, *Computer Networks*, 2009, Vol. 53, Issue 9, pp. 1395-1408.
- [167] O. Dousse, F. Baccelli, P. Thiran, Impact of Interferences on Connectivity in Ad Hoc Networks, *IEEE Computer and Communications Societies*, 2003, pp. 1724-1733.
- [168] P. Gupta, P. Kumar, The capacity of wireless networks, *Transaction Information Theory*, 2000, Vol. 46, pp. 388-404.
- [169] P. Wan, X. Li, O. Frieder, OVFSF-CDMA Code Assignment in Wireless Ad Hoc Networks, *Algorithmica*, 2007, Vol. 49, pp. 264-285.
- [170] F. Adachi, M. Sawahashi, K. Okawa, Tree-structured generation of orthogonal spreading codes with different lengths for the forward link of DS-SS mobile radio, *Electronics Letters*, 1997, Vol. 33, pp. 27-28.
- [171] M. Laguna, R. Marti, A GRASP for Coloring Sparse Graphs, *Computational Optimization and Applications*, 2001, Vol. 19, pp. 165-178.