



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών και Πληροφορικής

Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Αποδοτική Διαχείριση
Ενέργειας σε Ασύρματα
Επαναφορτιζόμενα Δίκτυα
Αισθητήρων**

Συγγραφέας:
Φίλιππος Βασιλάκης,
ΑΜ: 3895
vasilakis@ceid.upatras.gr

Επιβλέπων:
Σωτήρης Νικολετσέας,
Αναπληρωτής Καθηγητής
nikole@cti.gr

Ιούλιος 2012



UNIVERSITY OF PATRAS
School of Engineering
Computer Engineering and Informatics
Department

Undergraduate Diploma Thesis

**Efficient Energy Management in
Wireless Rechargeable Sensor
Networks**

Author:

Filippos Vasilakis,
RN: 3895
vasilakis@ceid.upatras.gr

Supervisor:

Sotiris Nikoletseas,
Associate Professor
nikole@cti.gr

July 2012

Declaration

The contents of this thesis are the results of original research and have not been submitted for a high degree to any university or institution. Much of the work in this thesis has been published in the following conference paper:

- Constantinos Marios Angelopoulos, Sotiris E. Nikoletseas, Theofanis P. Raptis, Christoforos Raptopoulos, **Filippos Vasilakis**, *Efficient Energy Management in Wireless Rechargeable Sensor Networks*, in the 15th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems 2012 (ACM MSWiM '12), Paphos, Cyprus.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σωτήρη Νικολετσέα, Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πατρών, για την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, τη καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου όταν του ξήτησα μία καινοτόμα διπλωματική. Η εμπιστοσύνη αυτή σίγουρα με έκανε να δουλέψω ακόμα σκληρότερα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υπόλοιπη ομάδα: αρχικά τον έμπειρο διδακτορικό Κωνσταντίνο Μάριο Αγγελόπουλο ο οποίος συνέχεια έδινε σαφής καθοδηγήσεις και σοφές παρατηρήσεις όπου συνέβαλε πολύτιμα στην εργασία αυτή¹ τον συνάδελφο, απόφοιτο, χιουμορίστα Φάνη Ράπτη που βοήθησε σημαντικά να βγουν έγκαιρα τα αποτελέσματα² τον μεταδιδακτορικό Χριστόφορο Ραπτόπουλο που με το αστείρευτο ταλέντο του έδωσε άμεσα λύσεις στα προβλήματα που προκύψαν.

Πάνω από όλους όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τις συμβουλές τους και την στήριξη και που μου παρείχαν καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου. Ξωρίς αυτούς τίποτα από όλα αυτά δεν θα είχε πραγματοποιηθεί.

Abstract

Almost one decade later, wireless sensor networks (WSNs) still challenge scientists to solve the problem of minimizing energy consumption. Efficient routing algorithms, innovate topologies, radical ideas that go beyond classical models, such as mobile sensors, and most recently the exploitation of alternative forms of energy have been proposed in order to reduce energy consumption in the network. The incomplete dream of the scientific community is to realize a wireless sensor network in which all devices have very small, balanced, energy consumption and lifetime close to infinity.

Simultaneously, at the end of 2007 scientists from university of MIT, presented a paper which proved analytically that it is possible to achieve wireless energy transfer over long distances with efficacy close to 40%. In 2008 they presented a real system that was able to transfer power wirelessly in a distance of 2 meters and efficacy of 45% while later other researchers improved the performance even more. Thus, it seems that the dream of perpetual operation of a wireless sensor network can become true by embedding this technology through a mobile node which acts as a charger which charges the static nodes.

In this work, firstly, every possible known technique is presented which can help to minimize the energy consumption in a WSN. Then, a formal definition is provided for the charging problem, which is proved to be computational hard. In order to better understand the impact that charger's integration into WSNs has, it is assumed that the total initial available energy to the network, E_{total} , is $E_{total} = E_{sensors} + E_{MC}^{init}$ where $E_{sensors}$ is the static sensor's initial energy and E_{MC}^{init} is the energy that is given initially to the charger.

Under this model and using 3 completely different routing protocols, the following are investigated:

- Is it better to equip the mobile charger with a part of the total initial energy, E_{total} , in order to charge the sensors?
- Which charging strategy (partial vs full) maximizes network's lifetime?
- What percentage of the total initial energy, E_{total} , best maximizes network's lifetime?

Last but not least, numerous trajectories of mobile charger which use only local information are studied and compared to a heuristic global knowledge charger in respect to network's lifetime, connectivity, coverage and energy balance.

Επιτομή

Σχεδόν μία δεκαετία μετά, τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΔΑ) ακόμα προκαλούν τους επιστήμονες στο θέμα της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης της ενέργειας. Αποδοτικοί αλγόριθμοι, καινοτόμες τοπολογίες, ριζοσπαστικές ιδέες που ξεφεύγουν από τα κλασσικά μοντέλα, όπως κίνηση κάποιων αισθητήρων, ενώ τελευταίως και η εκμετάλλευση εναλλακτικών μορφών ενέργειας έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Το ανολοκλήρωτο όνειρο της επιστημονικής κοινότητας είναι να γίνει πραγματικότητα ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στο οποίο όλες οι συσκευές να έχουν πολύ μικρή, παρόμοια, κατανάλωση ενέργειας και χρόνο ζωής κοντά στο άπειρο.

Ταυτόχρονα, στα τέλη του 2007 επιστήμονες από το πανεπιστήμιο του MIT, παρουσίασαν μια εργασία στην οποία απέδειξαν αναλυτικά ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί ασύρματη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλη απόσταση και με μεγάλη απόδοση, κοντά στο 40%. Το 2008 παρουσίασαν πραγματικό σύστημα που μετέφερε ασύρματα ενέργεια σε απόσταση 2 μέτρων με απόδοση 45% ενώ αργότερα άλλοι ερευνητές βελτίωσαν την απόδοση ακόμα περισσότερο. Φάντασται λοιπόν ότι το όνειρο της αένατης λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, μπορεί να πραγματοποιηθεί αξιοποιώντας αυτή την τεχνολογία μέσω ενός κινητού κόμβου ο οποίος λειτουργεί ως φορτιστής και φορτίζει τους στατικούς κόμβους του δικτύου.

Στην εργασία αυτή, αρχικά παρουσιάζονται όλες οι τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ΑΔΑ προκειμένου να υπάρξει μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας. Στην συνέχεια, ορίζεται αυστηρώς το πρόβλημα του κινητού φορτιστή και αποδεικνύεται ότι είναι NP-πλήρης (NP-complete). Για να υπάρχει καλύτερη σύγκριση στην επίδρασης που έχει η ενσωμάτωση του κινητού φορτιστή στα συστήματα ΑΔΑ, θεωρείται ότι η συνολική αρχική διαθέσιμη ενέργεια του δικτύου, E_{total} , είναι $E_{total} = E_{sensors} + E_{MC}^{init}$ όπου $E_{sensors}$ είναι η αρχική ενέργεια που δίνεται στους στατικούς κόμβους και E_{MC}^{init} η αρχική ενέργεια που δίνεται στον κινητό φορτιστή.

Κάτω από αυτό το μοντέλο και χρησιμοποιώντας 3 τελείως διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, ερευνώνται πειραματικά τα εξής:

- Συμφέρει να διοχετευθεί μέρος της συνολικής ενέργειας, E_{total} , στον φορτιστή ο οποίος να φορτίζει τους κόμβους;
- Ποια στρατηγική φόρτισης (μερική ή ολική) βελτιστοποιεί τον χρόνο ζωής του δικτύου;
- Τι ποσοστό της συνολικής ενέργειας, E_{total} , πρέπει να δοθεί στον φορτιστή για να βελτιστοποιηθεί ο χρόνος ζωής του δικτύου;

Τέλος, ερευνώνται διάφορες τροχιές που μπορεί να κάνει ο κινητός φορτιστής χρησιμοποιώντας μόνο τοπική γνώση και συγκρίνονται με μια ευρετική τροχιά καθολικής γνώσης ως προς την περιαιτέρω αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου, της συνδεσιμότητας, της κάλυψης και την εξισορρόπηση ενέργειας μέσα στο δίκτυο.

Περιεχόμενα

Declaration	i
Ευχαριστίες	ii
Abstract	iii
Επιτομή	iv
Περιεχόμενα	v
1 Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων(ΑΔΑ)	3
1.3 Το Κίνητρο και Σύντομη Ιστορία των ΑΔΑ	5
1.4 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και οι Εφαρμογές τους	7
1.5 Περιβάλλοντα Ανάπτυξης Εφαρμογών	9
1.6 Σχεδιασμός Δικτύου, Προκλήσεις και το Μέλλον	11
1.7 Επισκόπηση της Διπλωματικής	13
2 Τεχνικές Αύξησης της Διάρκειας Ζωής ενός ΑΔΑ	15
2.1 Αποδοτικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης	15
2.1.1 Δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα	15
2.1.2 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα	18
2.1.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοποθεσία	20
2.1.4 Πρωτόκολλα Εξισορρόπησης Ενέργειας	21
2.2 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης με Κινητούς Κόμβους	24
2.2.1 Πρωτόκολλα με Κινητή Πηγή	27
2.2.2 Πρωτόκολλα με Κινητούς Κόμβους	30
2.3 Εναλλακτικές Τεχνικές	34
2.3.1 Τεχνικές εναλλακτικών πηγών ενέργειας	35
2.3.2 Τεχνικές αύξησης των κόμβων του δικτύου	36
2.3.3 Τεχνικές επαναφόρτισης κόμβων	37
3 Ασύρματα Επαναφορτιζόμενα Δίκτυα Αισθητήρων	38
3.1 Η Ιστορία Πίσω Από την Τεχνολογία	38
3.2 Επεξήγηση της Τεχνολογίας	41
4 Ορισμός του Προβλήματος και Στρατηγικές Επίλυσης	44
4.1 Γενικευμένος Ορισμός, Μοντέλο Επίλυσης και Ιδιότητες	44

4.1.1	Γενικευμένος Ορισμός	44
4.1.2	Μοντέλο Ανάπτυξης, Ενέργειας και Φόρτισης Κόμβων	45
4.1.3	NP-πληρότητα του Προβλήματος	46
4.2	Σχετική Έρευνα	48
4.3	Στρατηγικές Επίλυσης	51
4.3.1	Ολική και Μερική Φόρτιση	51
4.3.2	Ποσοστό Ενέργειας στον Φορτιστή	51
4.3.3	Διαδρομές του Φορτιστή	52
4.3.3.1	Φορτιστής με Καθολική Γνώση	52
4.3.3.2	Σπειροειδής Φορτιστής	52
4.3.3.3	Διαμετρικός Φορτιστής	53
4.3.3.4	Φορτιστής σε Τυχαίο Περίπατο	53
4.3.3.5	Προσαρμοστικός Φορτιστής	53
5	Πειραματική Αξιολόγηση	55
5.1	Με και Χωρίς Φόρτιση	56
5.2	Ολική και Μερική Φόρτιση	60
5.3	Ποσοστό Ενέργειας στον Φορτιστή	63
5.4	Σύγκριση Διαδρομών Φορτιστή	66
5.5	Παραμετροποιώντας την Τεχνολογία Φόρτισης	69
5.6	Αυξάνοντας τον αριθμό των κόμβων	72
5.6.1	Με και Χωρίς Φόρτιση	73
5.6.2	Ολική και Μερική Φόρτιση	76
5.6.3	Ποσοστό Ενέργειας στον Φορτιστή	78
5.6.4	Σύγκριση Διαδρομών Φορτιστή	80
5.6.5	Παραμετροποιώντας την Τεχνολογία Φόρτισης	82
6	Επίλογος και Ανοιχτά Προβλήματα	85
6.1	Ανασκόπηση και Συμπεράσματα	85
6.2	Μελλοντικές Αναζητήσεις	86
Αναφορές		88

1

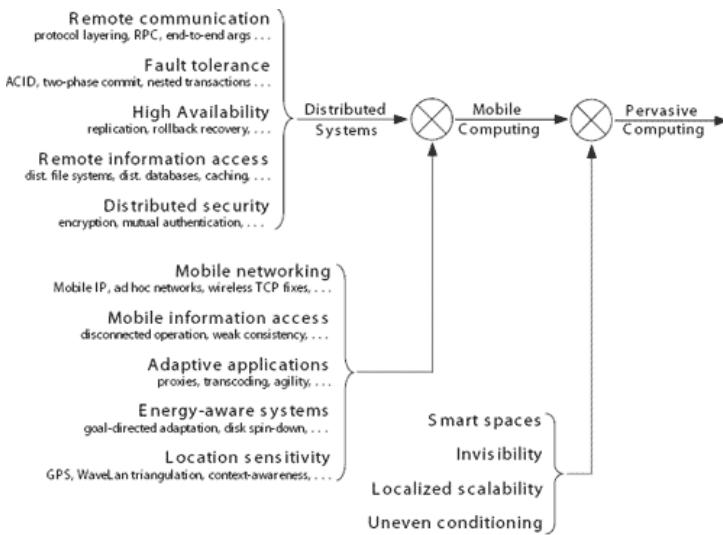
Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

1.1 Εισαγωγή

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 αναπτύχθηκαν στον κόσμο των υπολογιστών και της πληροφορικής, αμφότερα τα οράματα "Περιφρέουσα Νοημοσύνη" (Ambient Intelligence) και του "Διάχυτου Υπολογισμού" (Pervasive Computing ή πιο συχνά Ubiquitous Computing). Οι έννοιες αυτές αναφέρονται αφηρημένα σε ένα περιβάλλον το οποίο είναι ικανό να "νιώθει" και να καταλαβαίνει τους ανθρώπους, και γενικότερα τις οντότητες, που βρίσκονται σε αυτό [1]. Λίγο πιο συγκεκριμένα, σε ένα τέτοιο περιβάλλον υπάρχουν αυθαίρετα πολλές συσκευές οι οποίες επικοινωνούν και συνεργάζονται μεταξύ τους με κοινό στόχο την εξυπηρέτηση του ανθρώπου. Η εξυπηρέτηση αυτή έχει να κάνει από τις καθημερινές εργασίες, όπως αυτόματος οπλισμός/αφοπλισμός συναγερμού, αυτόματο πότισμα, αυτόματο άνοιγμα των φώτων, παραθύρων και ρύθμιση της θερμοκρασίας του σπιτιού όταν εισέρχεται ο ιδιοκτήτης του, αλλά και πιο προηγμένες τεχνολογίες όπως αντικειμενική πυρκαγιάς σε ένα δημόσιο κτήριο ή υπόδειξη νέων κατάλληλων προϊόντων σύμφωνα με τις καταναλωτικές συνήθειες μιας οικογένειας.

Γίνεται επομένως εμφανές ότι το όραμα αυτό, αν και αρκετά ελπιδοφόρο, στην τελική του μορφή περιλαμβάνει πολλές τεχνολογίες και επιστήμες μαζί, αποτελεί δηλαδή ένα σχετικά καινούργιο διεπιστημονικό πεδίο. Συγκεκριμένα για την υλοποίηση του οράματος χρειάζονται βασικά εργαλεία (γνώσεις και αλγόριθμοι) από επιστήμες όπως η Θεωρία Πληροφορίας, της Ανοχής σε Σφάλματα, τα Δίκτυα, τα Ασύρματα Κινητά Δίκτυα, τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, τα Κατανεμημένα Συστήματα, της Ασφάλειας και πολλών άλλων. Ένας παραστατικός συνδυασμός αυτών των επιστημών με τελικό αποτέλεσμα αυτών των Διάχυτου Υπολογισμό φαίνεται στην εικόνα 1.1.

Ένα από τα πιο σημαντικά, αν όχι το πιο σημαντικό, εργαλεία του Διάχυτου Υπολογισμού είναι τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων(ΑΔΑ). Τα ΑΔΑ αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων οι οποίοι καλύπτουν επαρκώς το περιβάλλον το οποίο είναι σε επιτήρηση. Είναι το υποσύστημα το οποίο καταγράφει όλες τις πληροφορίες από το περιβάλλον αλλά και ταυτόχρονα είναι το ίδιο υποσύστημα που εκτελεί τις λειτουργίες που είναι απαραίτητες κάθε στιγμή. Ένα από τα κρισιμότερα συστατικά των ΑΔΑ είναι ο αισθητήρας: είναι το υποσύστημα του κόμβου το οποίο μετατρέπει μια φυσική ποσότητα όπως η υγρασία, η θερμοκρα-



Εικόνα 1.1: Ο Διάχυτος Υπολογισμός ως συνδυασμός επιστημών¹

σία κλπ σε ηλεκτρονικό δεδομένο. Η επιστημονική κοινότητα από τις αρχές του 2000, αφού έχει μελετήσει σε βάθος τις προηγούμενες επιστήμες, σε σχέση με τα ΑΔΑ, όπως τα Δίκτυα, Ασύρματα Δίκτυα, Κατανεμημένα Συστήματα κλπ έχει εστιάσει μεγάλο μέρος της προσοχή της στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων αφού αποτελούν απαραίτητο εργαλείο για τον Διάχυτο Υπολογισμό.

Τα τελευταία αυτά 10 χρόνια, τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων γνώρισαν τρομερή πρόοδο σε όλο το διάστημα. Εφευρέθηκαν μαθηματικά μοντέλα που προσομοιώνουν πλήρως τα ΑΔΑ[2], αλγόριθμοι οι οποίοι εκμεταλλεύονται πλήρως τις ιδιότητές τους ώστε να έχουν καλύτερη απόδοση, άνω και κάτω φράγματα σε αποδόσεις αλγορίθμων και πολλά άλλα. Ο πιο σημαντικός περιορισμός τους, ο οποίος διαπιστώθηκε από την αρχή της έρευνας, είναι οι περιορισμένοι πόροι των κόμβων ειδικά σε θέματα ενέργειας. Η περιορισμένη χωρητικότητα ενέργειας ενός κόμβου είναι το σημείο κλειδί το οποίο μάλιστα διαφοροποιεί τα ΑΔΑ από τα κλασσικά Ασύρματα Δίκτυα. Επομένως η περισσότερη έρευνα πάνω στα ΑΔΑ, ακόμα και 10 χρονιά μετά, έχει σχέση με την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ενέργειας. Είναι πλέον αποδεκτό ότι με την σημερινή τεχνολογία τα ΑΔΑ δεν γίνεται να λειτουργούν επ' απέιρον χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση κάτι που επηρεάζει σημαντικά το όραμα του Διάχυτου Υπολογισμού. Διότι αν ο κάθε κόμβος σε ένα ΑΔΑ χρειάζεται ανθρώπινη παρέμβαση ανά τακτά χρονικά διαστήματα τότε το κόστος του συνολικού συστήματος αυξάνεται σημαντικά, ένας τομέας που από την έναρξη μαζικής παραγωγής τέτοιων συστημάτων λαμβάνεται σοβαρά υπόψη και καθορίζει τελικά την επιτυχία τους. Όμως ακόμα και αν εξαιρέσουμε τον παράγοντα του κόστους, ένα ΑΔΑ στο οποίο οι κόμβοι λόγω περιορισμένης ενέργειας διακόπτουν τη λειτουργία τους απρόσμενα μετά το ίδιο το δίκτυο γίνεται αναξιόπιστο αποτυγχάνοντας τον αρχικό του στόχο: να βοηθά τον άνθρωπο.

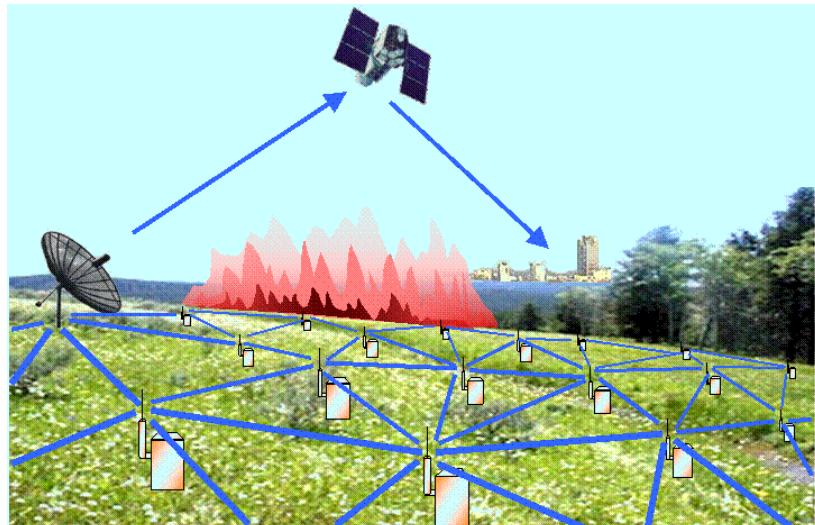
Ωστόσο μια καινούργια τεχνολογία που εφευρέθηκε από τους επιστήμονες του

¹Η εικόνα παρουσιάζεται στην ιστοσελίδα του εργαστηρίου Διάχυτου Υπολογισμού του πανεπιστημίου Carnegie Mellon (CMU)

MIT [3] έρχεται να αλλάξει άρδην τις προσδοκίες στο πεδίο των ΑΔΑ. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την ασύρματη μετάδοση ενέργειας από μια Πηγή σε έναν δέκτη με πολύ μικρές απώλειες ενέργειας.

1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων(ΑΔΑ)

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων(ΑΔΑ) αποτελείται από αυτόνομους κατανεμημένους κόμβους(ή αισθητήρες) όπου ο καθένας λαμβάνει μετρήσεις για το κοντινό του περιβάλλον, όπως θερμοκρασία, υγρασία, επίπεδα θορύβου, σεισμικές δονήσεις, πίεση ακόμα και κίνηση με την προϋπόθεση πάντα ότι υπάρχει το απαραίτητο υλικό πάνω στον κόμβο ώστε να μπορεί να λαμβάνει εκάστοτε μέτρηση. Οι κόμβοι λαμβάνουν μετρήσεις περιοδικά με περίοδο που εξαρτάται από το είδος το δικτύου και ρυθμίζεται από τον αρχικό σχεδιαστή του δικτύου. Για ένα δίκτυο οι κόμβοι μπορεί να λαμβάνουν μετρήσεις ανά μια ώρα ενώ σε κάποιο άλλο δίκτυο οι αισθητήρες μπορεί να λαμβάνουν μετρήσεις ανά ένα δευτερόλεπτο. Σε ένα ΑΔΑ σχεδόν πάντα θεωρείται ότι υπάρχει ένα ακόμα πολύ σημαντικό στοιχείο: η Πηγή. Ο κάθε κόμβος αφού λάβει και καταγράψει ένα μέγεθος μετρήσεων στέλνει τα δεδομένα αυτά, δοιπλά σε πακέτα μέσα από ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, στην Πηγή χρησιμοποιώντας ως διαμεσολαβητές άλλους κόμβους. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο κάθε κόμβος δεν γνωρίζει την συνολική διαδρομή που θα ακολουθήσουν τα πακέτα αλλά γνωρίζει μόνο τον πρώτο γείτονα στον οποίο στέλνει κάθε φορά ένα πακέτο που έχει προορισμό την Πηγή. Ένα παράδειγμα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων φαίνεται στην εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2: Ένα τυπικό σενάριο ενός ΑΔΑ

Τα βασικά κριτήρια που χαρακτηρίζουν ένα δίκτυο ως ΑΔΑ είναι τα εξής:

- μεγάλοι περιορισμοί ως προς την κατανάλωση ενέργειας για τους κόμβους
- ικανότητα του δικτύου να μπορεί να αντιμετωπίζει αποδοτικά δυσλειτουργίες και σφάλματα κόμβων

- ικανότητα αντιμετώπισης αποτυχιών και προβλήματα επικοινωνίας μεταξύ κόμβων
- ανοιμοιογένεια ως προς τους κόμβους
- τοπικότητα στην πληροφορία
- επεκτασιμότητα του δικτύου σε πολύ μεγάλα μεγέθη
- εύκολη εγκατάσταση και χρήση του συνολικού δικτύου από έναν χειριστή

Ο αριθμός των κόμβων μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέχρι και αρκετές χιλιάδες. Η κατανομή των κόμβων, δηλαδή ο τρόπος που τοποθετούνται, συνήθως είναι ομοιόμορφη αλλά αυτό δεν ισχύει πάντα. Για παράδειγμα έχει αποδεχτεί ότι μια διαφορετική κατανομή όπως η Gaussian μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση σε ένα ΑΔΑ, όσον αφορά κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά [4]. Ο κάθε κόμβος αποτελείται συνήθως από κάποια τυπικά μέρη:

- πομπό/δέκτη που να χρησιμοποιεί χαμηλής ενέργειας ασύρματα πρωτόκολλα
- μικροελεγκτή χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, από πολύ απλούς των 8bit μέχρι και σύγχρονους με μεγάλη υπολογιστική δύναμη. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η μικρή κατανάλωση ενέργειας
- μπαταρία και γενικά ένας πόρος ενέργειας
- αισθητήρες όπως θερμόμετρο, βαρόμετρο, κάμερα κλπ

Αν και υπάρχει η τεχνολογία να φτιαχτεί το υλικό ενός κόμβου σε μέγεθος "ψείρας", οι μπαταρίες αυξάνουν δραματικά το μέγεθος ούτως ώστε ένας κόμβος να λειτουργεί απροβλημάτιστα για πολύ καιρό. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και θεωρούμε ότι υπάρχουν κάποιοι περιορισμένοι πόροι όσον αφορά το υλικό όπως για παράδειγμα τις δυνατότητες του μικροεπεξεργαστή και κατά συνέπεια του μικροελεγκτή που φέρει ένας κόμβος, στα ΑΔΑ δεν μελετώνται περιπτώσεις όπου οι κόμβοι δεν έχουν έλεγχο της κίνησής τους ή δεν έχουν καθόλου μνήμη και ικανότητα εκτέλεσης βασικών πράξεων. Τέτοιες περιπτώσεις υπάγονται σε άλλα μοντέλα όπως τα Πρωτόκολλα Πληθυσμών [5].

Η Πηγή είναι ένα ξεχωριστό στοιχείο του δικτύου, το οποίο έχει τεράστια υπολογιστική ικανότητα σε σχέση με τους κόμβους, δεν έχει κανέναν περιορισμό πόρων ενώ ταυτόχρονα έχει εμβέλεια επικοινωνίας πολύ μεγαλύτερη από τους κόμβους. Σε μερικά δίκτυα η Πηγή συμμετέχει στο πρωτόκολλο δρομολόγησης ή βοηθάει μερικώς το συνολικό δίκτυο χρησιμοποιώντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της. Στην Πηγή φθάνουν τελικά όλες οι πληροφορίες και είναι υπεύθυνη για την διαχείριση αυτών των πληροφοριών όπως για παράδειγμα εκτέλεση ειδικών επερωτημάτων (queries) επάνω στα δεδομένα για ασφαλή και γρήγορη εξαγωγή συμπερασμάτων για το δίκτυο.

Τα βασικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων σταματάνε σε αυτό το σημείο. Ο διαχειρισμός των δεδομένων καθώς και η εξαγωγή μετά-πληροφοριών από αυτά τα δεδομένα κλπ αποτελούν μέρη των διεπιστημονικών πεδίων του Διάχυτου Υπολογισμού και Περιφρέουσας Νοημοσύνης. Γίνεται επομένως σαφές λόγω του ότι τα ΑΔΑ αποτελούν το πιο κρίσιμο συστατικό για τις προαναφερθείσες επιστήμες.

Τέλος, να σημειωθεί ότι γενικώς στα ΑΔΑ θεωρείται ότι οι αισθητήρες έχουν συνεργατικές τάσεις, δηλαδή συνολικά το δίκτυο έχει κοινό στόχο. Αντίθετα πολύ

σπάνια μελετώνται περιπτώσεις όπου ο κάθε κόμβος κοιτάει μεμονωμένα και εγωιστικά το δικό του συμφέρον. Η ανάλυση αυτών των περιπτώσεων χρησιμοποιεί συνήθως θεωρία παγνίων [6], ενώ υποδεικνύει ένα πλήρως ανομοιογενές δίκτυο διαφορετικό από την αρχική φιλοσοφία των ΑΔΑ.

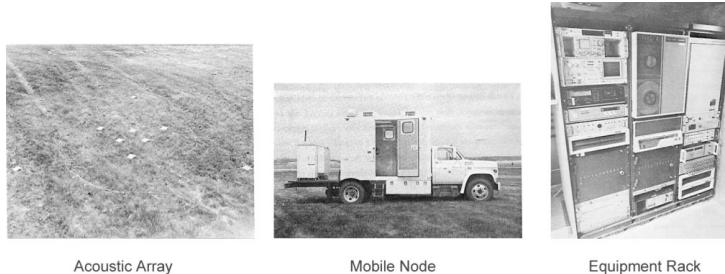
1.3 Το Κίνητρο και Σύντομη Ιστορία των ΑΔΑ

Το βασικό κίνητρο των ΑΔΑ ήταν κατά κύριο λόγο οι στρατιωτικές εφαρμογές. Επισκόπηση του πεδίου μάχης, αναγνώριση στόχων, παρακολούθηση και καταγραφή των στρατιωτικών δυνάμεων και των διαθέσιμων πυρομαχικών τους ήταν από τις πρώτες εφαρμογές που είχαν πυροδοτήσει την απόσπαση κονδυλιών, από κυβερνήσεις ηγετικών κρατών, για την έρευνα τέτοιων μηχανισμών. Συγκεκριμένα η πρώτη πραγματική έρευνα πάνω στα δίκτυα αισθητήρων ξεκίνησε μέσα στην δεκαετία του 1980 στην υπηρεσία του υπουργείου Αμύνης των Η.Π.Α, την DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Η υπηρεσία αυτή ξεκίνησε ένα καινούργιο πρόγραμμα το οποίο λεγόταν Κατανεμημένα Δίκτυα Αισθητήρων (DSN, Distributed Sensor Networks). Ταυτόχρονα το ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) δίκτυο ήταν πλήρως λειτουργικό με 200 πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα συνδεδεμένα. Η βασική ιδέα των DSN ήταν ένα δίκτυο πολλών κατανεμημένων συνδεδεμένων κόμβων οι οποίοι συνεργάζονταν μεταξύ τους αλλά ο κάθε κόμβος λειτουργούσε ανεξάρτητος. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκε βασιζόταν στην μέθοδο της πλημμύρας.

Αν συνυπολογισθεί ότι εκείνη την περίοδο δεν υπήρχαν προσωπικοί υπολογιστές, πόσο μάλλον φορητοί υπολογιστές, ενώ το Ethernet μόλις άρχιζε και αποκτούσε φήμη, το πρόγραμμα DSN μάλλον ήταν πολύ φιλόδοξο. Η τεχνολογία για την υλοποίηση αυτού του εγχειρήματος είχε βρεθεί σε ένα σχετικά πρόσφατο συνέδριο [7]. Ουσιαστικά περιελάμβανε έναν αισθητήρα ήχου, ικανότητα αποστολής και λήψης σημάτων χαμηλής ενέργειας και το απαραίτητο λογισμικού κατανεμημένου χαρακτήρα. Επιστήμονες από το πανεπιστήμιο Carnegie Mellon (CMU), εστίασαν το ενδιαφέρον τους στη κατασκευή ενός λειτουργικού συστήματος το οποίο θα απευθυνόταν σε τέτοιες συσκευές, δηλαδή συσκευές συνδεδεμένες σε ένα δίκτυο, στις οποίες υπάρχει εύκολη και ενιαία πρόσβαση στους κατανεμημένους πόρους ενός αξιόπιστου DSN συστήματος. Το αποτέλεσμα αυτού του συστήματος ήταν να δημιουργηθεί το λειτουργικό σύστημα Mach το οποίο για την εποχή του είχε αρκετά πρωτοπόρα στοιχεία [8] ενώ είχε μάλιστα και κάποια περιορισμένη εμπορική επιτυχία.

Λίγο καιρό αργότερα, επιστήμονες στο πανεπιστήμιο MIT επικεντρώθηκαν στην αναγνώριση (εχθρικών) ελικοπτέρων μέσα από επεξεργασία ακουστικών σημάτων. Το σύστημα που χρησιμοποιήσαν ήταν μικρόφωνα κατανεμημένα διασπαρτά σε ένα χώρο τα οποία στέλναν τις πληροφορίες τους σε έναν κεντρικό υπολογιστή. Χρησιμοποίησαν ευρετικούς αλγόριθμους και τεχνικές ταυριάσματος για να μπορέσουν να πετύχουν αποδεχτά αποτελέσματα στην αναγνώριση ελικοπτέρων. Επιπλέον επέκτειναν το σύστημα DSN προσθέτοντας αλγόριθμους για επεξεργασία σημάτων και τεχνικών ταυριάσματος [9]. Για την επίδειξη του συστήματος το εργαστήριο Lincoln στο MIT κατασκεύασε ένα πραγματικό δοκιμαστικό σενάριο για την ακουστική αναγνώριση ελικοπτέρων χαμηλής πτήσης και αεροπλάνων [10]. Χρησιμοποιήθηκαν κόμβοι που στην πραγματικότητα ήταν μικρόφωνα τα οποία έστελναν με ασύρματη τεχνολογία τα σήματα ήχου σε 3 σταθερούς υπολογιστές(επεξεργαστής MC68000, 256KB μνήμη και 512KB κοινή μνήμη). Στην

εικόνα 1.3 [11] φαίνεται το δοκιμαστικό σενάριο. Τελικά το συνολικό σύστημα δούλεψε επιτυχώς και κατάφερε να εντοπίσει τα χαμηλής πτήσης ελικόπτερα και αεροσκάφη.



Εικόνα 1.3: Το δοκιμαστικό πείραμα του εργαστηρίου Lincoln του MIT

Ενώ οι ερευνητές είχαν κατανοήσει ότι τέτοια συστήματα θα έπρεπε να περιλαμβάνουν πολλά μικρά δίκτυα αισθητήρων τα οποία θα έχουν εκατοντάδες κόμβους, η τεχνολογία για αυτά τα συστήματα δεν ήταν πλήρως έτοιμη. Ωστόσο στρατιωτικοί παράγοντες είχαν αναγνωρίσει την τεράστια χρησιμότητα αυτών των συστημάτων καθώς και την υπερτερότητα των δικτυακών όπλων: χιλιάδες αισθητήρες που συνεργάζονται και μαζεύουν πληροφορίες σε σχέση με τον εχθρό και τις αποστέλλουν στο κέντρο επιχειρήσεων, το οποίο μπορεί να είναι χιλιόμετρα μακριά από το πεδίο μάχης. Το προβάδισμα αυτό θα μπορούσε να λειτουργήσει μοιραία στην εξέλιξη μιας μάχης.

Το πρώτο πραγματικό σύστημα που υλοποιήθηκε με αυτόν τον σκοπό και έχει αρκετή σχέση με τα ΑΔΑ είναι το CEC (Cooperative Engagement Capability) το οποίο κατασκευάστηκε από το ναυτικό των Η.Π.Α. στα μέσα της δεκαετίας του 1990. Το σύστημα αποτελείται από πολλά ραντάρ τα οποία συλλέγουν πληροφορίες για στόχους αέρος όπως αεροσκάφη, ελικόπτερα πύραυλοι κλπ. Οι μετρήσεις αυτές αποστέλνονται σε έναν κόμβο αρχιγό (ουσιαστικά πρόκειται για μία Πηγή) ο οποίος επεξεργάζεται και φιλτράρει τις πληροφορίες. Ο κόμβος αυτός είναι κοινός σε όλους τους άλλους κόμβους που μαζεύουν πληροφορίες. Το σημαντικό στοιχείο του συστήματος είναι ότι όλοι οι κόμβοι έχουν πρόσβαση σε όλες τις πληροφορίες δημιουργώντας ένα πραγματικά κατανεμημένο σύστημα το οποίο δίνει την ίδια εικόνα σε όλους τους στρατιωτικούς οι οποίοι βρίσκονται σε ένα κόμβο ο καθένας. Το σύστημα αυτό ακολούθησαν και άλλα στρατηγικά συστήματα με παρόμοιους στόχους όπως το REBMASS (Remote Battlefield Sensor System) και το TRSS (Tactical RemoteSensor System).

Ταυτόχρονα η τεχνολογία στους υπολογιστές εξελισσόταν ραγδαία. Είχαν κατασκευαστεί ασύρματα δίκτυα, είχε δημιουργηθεί το Internet, οι μικροεπεξεργαστές είχαν πλέον αρκετή υπολογιστική ισχύ ενώ υπήρχε η δυνατότητα κατασκευής μικρουπολογιστικών συστημάτων που είχαν μέγεθος όσο μια παλάμη. Αυτές οι εξελίξεις σε συνδυασμό με τα οράματα της Περιφρέουσας Νοημοσύνης και του Διάχυτου Υπολογισμού έκαναν τους επιστήμονες να οραματιστούν μια διαφορετική πλευρά των δικτύων αισθητήρων: ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία θα συλλέγαν πληροφορίες με στόχο να βοηθήσουν τον άνθρωπο. Τα ΑΔΑ δηλαδή θα είχαν στόχο να κάνουν πιο εύκολη την ζωή του ανθρώπου από κάθε μεριά αναλαμβάνοντας αυτά κάποιες λειτουργίες σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχουν συλλέξει χωρίς όμως ο άνθρωπος να αλληλεπιδρά με το συνολικό σύστημα. Έγινε

όμως αιμέσως αντιληπτό ότι τέτοια συστήματα θα ήταν άμεσα ευπαθή στην διαχείριση της ενέργειας. Διότι ενώ όλες οι υπόλοιπες τεχνολογίες είχαν εξελιχθεί ραγδαία, η πρόοδος στις τεχνολογίες της μπαταρίας είχαν πολύ μικρότερη πρόοδο ενώ ταυτόχρονα τέτοια συστήματα θα έπρεπε να λειτουργούν σχεδόν για πάντα χωρίς την αλληλεπίδραση του ανθρώπου. Επίσης διαπιστώθηκε ότι αλγόριθμοι για τα κλασσικά ασύρματα δίκτυα (όπως ALOHA, slotted ALOHA κλπ) δεν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν καθώς τα ασύρματα δίκτυα έχουν στόχο την μεγιστοποίηση της απόδοσης ενώ τα ΑΔΑ έχουν στόχο την μεγιστοποίηση των χρονικών διαστημάτων που οι κόμβοι, με περιορισμένους πόρους ενέργειας, αποστέλλουν πληροφορίες προς την Πηγή.

Από το 2000 και μετά η προσοχή της επιστημονικής κοινότητας επικεντρώθηκε κυρίως στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ενέργειας στα ΑΔΑ είτε αυτό επιτυγχάνεται μέσα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης είτε από τον τρόπο ανάπτυξης των αισθητήρων είτε με οποιαδήποτε άλλη τεχνική που θα μπορούσε να κάνει τα ΑΔΑ να αντισταθούν ακόμα περισσότερο στο χρόνο. Επίσης ξεκίνησαν να κατασκευάζονται μαζικά αισθητήρες οι οποίοι ήταν εμπορικά διαθέσιμη για πρακτικούς και ερευνητικούς σκοπός ενώ ταυτόχρονα δημιουργήθηκε το πρώτο λειτουργικό σύστημα ειδικά για ΑΔΑ, το TinyOS. Άμεσα οι πρώτες πειραματικές εφαρμογές που δημιουργήθηκαν με τα ΑΔΑ οι οποίες αφορούσαν σχεδόν όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας.

1.4 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και οι Εφαρμογές τους

Η τεχνολογία των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές εφαρμογές του πραγματικού κόσμου και να φέρει στην επιφάνεια κάποιες εντελώς καινούριες. Ενα κρίσιμο και πρωτεύον συστατικό των κόμβων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ο αισθητήρας. Για πολλές παραμέτρους του φυσικού περιβάλλοντος υπάρχει η κατάλληλη τεχνολογία αισθητήρα που μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα ΑΔΑ. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι είναι οι αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, ήχου, πίεσης και οι χημικοί αισθητήρες. Μια σύντομη λίστα με τις πιο βασικές εφαρμογές παρουσιάζεται παρακάτω:

- Πρόληψη Καταστροφών:** Μια από τις πιο συχνά αναφερόμενες εφαρμογές των ΑΔΑ είναι στην πρόληψη καταστροφών. Ένα τυπικό σενάριο για εφαρμογές αυτής της κατηγορίας είναι η ανίχνευση πυρκαγιών. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι εξοπλισμένοι με θερμόμετρα και μπορούν να υπολογίσουν τη θέση τους τρέχοντας κάποιον αλγόριθμο εντοπισμού θέσης (localization). Τους κόμβους αυτούς μπορούμε να τους απλώσουμε σε ένα δάσος, πετώντας τους από ένα αεροπλάνο. Έτσι σχηματίζεται ένας θερμοκρασιακός χάρτης της περιοχής και σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλής υγρασίας που υπονοούν πυρκαγιά ενημερώνουν τους πυροσβέστες.
- Έλεγχος του περιβάλλοντος και της βιοποικιλότητας:** Τα ΑΔΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγχουν το περιβάλλον ως προς τους χημικούς ρύπους ή ακόμα και για το σχηματισμό μιας εικόνας ως προς τον αριθμό των διαφορετικών ειδών πανίδας και χλωρίδας μιας περιοχής.
- Ενφυή Κτίρια:** Τα μεγάλα κτίρια συχνά καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας εξαιτίας λανθασμένης χρήσης των συσκευών Air Conditioning (HVAC). Μια αποδοτικότερη, πραγματικού-χρόνου και ακριβέστερη παρακολούθηση

της θερμοκρασίας, της υγρασίας και άλλων παραμέτρων μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των μηχανικών καταπονήσεων σε κτίρια ή γέφυρες που βρίσκονται σε σεισμικά ενεργές ζώνες, ενώ άλλου τύπου αισθητήρες μπορούν χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό εγκλωβισμένων ανθρώπων σε περιπτώσεις σεισμού. Οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν στα κτίρια τη στιγμή της κατασκευής τους ή αφού έχουν κατασκευαστεί. Σε αυτές τις εφαρμογές η εξοικονόμηση ενέργειας για τους αισθητήρες είναι πολύ σημαντική απαίτηση.

- **Διαχείριση Εγκαταστάσεων:** Τα ΑΔΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές διαχείρισης μεγάλων εγκαταστάσεων, όπως θέματα ασφαλείας. Η εισόδος των ανθρώπων στις εγκαταστάσεις μπορεί να γίνεται χωρίς κλειδιά, αλλά με τη χρήση κάποιου πομπού, ενώ μπορούν να εντοπίζονται πιθανοί εισβολείς. Επίσης σε χημικές εγκαταστάσεις τα ΑΔΑ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό διαρροών.
- **Συντήρηση Μηχανών:** Αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε δυσπρόσιτα σημεία μηχανών για να ελέγχουν τους κραδασμούς που υποδεικνύουν ανάγκη για συντήρηση. Παραδείγματα τέτοιων μηχανών είναι αυτόματες μηχανές ή οι άξονες των τροχών των τρένων.
- **Εφαρμογές στη Γεωργία:** Η εφαρμογή ΑΔΑ σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις με τοποθέτηση αισθητήρων μέτρησης υγρασίας και ανάλυσης της σύστασης του εδάφους επιτρέπει την ακριβέστερη και αποδοτικότερη λίπανση και άρδευση των εκτάσεων. Επίσης, η εκτροφή ζώων μπορεί να ωφεληθεί τοποθετώντας αισθητήρες στα ζώα που ελέγχουν την κατάσταση της υγείας τους.
- **Εφαρμογές στον τομέα της υγείας:** Η χρήση ΑΔΑ στον τομέα της υγείας μπορεί να αποδειχτεί πολύ ωφέλιμη. Όμως υπάρχουν αρκετά ηθικά διλήμματα πάνω στο θέμα αυτό. Οι πιθανές εφαρμογές εκτείνονται από την άμεση τοποθέτηση αισθητήρων στον ίδιο τον ασθενή για την παρακολούθηση της υγείας του και ίσως αυτόματη χορήγηση φαρμάκων, μέχρι την παρακολούθηση των ιατρών και των ασθενών στα νοσοκομεία.
- **Ευφυή οδικά συστήματα:** Στα ευφυή οδικά συστήματα αισθητήρες τοποθετούνται στους δρόμους, ακόμα και στα κράσπεδα των δρόμων οι οποίοι συλλέγουν πληροφορίες για την κίνηση και την κατάσταση του οδικού δικτύου γενικότερα και επικοινωνούν με τους οδηγούς δίνοντάς τους χρήσιμες πληροφορίες.
- **Στρατιωτικές Εφαρμογές:** Τα ΑΔΑ μπορούν να είναι ενιαίο και αναπόσπαστο τμήμα των στρατιωτικών συστημάτων. Τα χαρακτηριστικά των ΑΔΑ, όπως είναι η γρήγορη τοποθέτηση τους, η αυτό-οργάνωση και η ανοχή στα σφάλματα, τα μετατρέπουν σε μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τα στρατιωτικά συστήματα. Κάποιες από τις πιθανές στρατιωτικές εφαρμογές τους είναι η παρακολούθηση της κατάστασης των εξοπλισμών και των πολεμοφόδιων, η στενή παρακολούθηση του πεδίου της μάχης, η αναγνώριση των εχθρικών δυνάμεων, η εκτίμηση των καταστροφών μετά από μάχη καθώς και ο εντοπισμός και η αναγνώριση χημικής, ατομικής ή βιολογικής επίθεσης.

1.5 Περιβάλλοντα Ανάπτυξης Εφαρμογών

Ένα δίκτυο αισθητήρων προκειμένου να είναι εύκολα προγραμματίσμιο και να δίνει πληθώρα επιλογών στον προγραμματιστή αλλά και στο χρήστη θα πρέπει να τρέχει ένα λειτουργικό σύστημα (ΛΣ) το οποίο είναι φτιαγμένο ειδικά για συστήματα ΑΔΑ. Να σημειωθεί ότι το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να καλύπτει τόσο τους χρήστες (οι οποίοι π.χ. θα θέλουν να τρέξουν ειδική εφαρμογή για την καλλιέργεια των φυτών τους) αλλά και τους προγραμματιστές οι οποίοι θέλουν να φτιάξουν δυνατές και αξιόπιστες εφαρμογές εύκολα και σε σύντομο χρονικό διάστημα. Γενικώς ένα λειτουργικό σύστημα προορισμένο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Μικρή έκταση κώδικα:** Δεδομένης της περιορισμένης μνήμης ενός κόμβου, ο πυρήνας του λειτουργικού θα πρέπει να υλοποιηθεί με τον ελάχιστον δυνατό κώδικα.
- **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:** Λόγω της φύσης και των περιορισμών των ΑΔΑ ένα ΛΣ προορισμένο για τα ΑΔΑ θα πρέπει να κάνει από μόνο του σωστή διαχείριση των πόρων της ενέργειας.
- **Αξιόπιστη αρχιτεκτονική:** Τα μονολιθικά ΛΣ πλέον θεωρούνται ξεπερασμένα λόγω της αρχιτεκτονικής τους. Τα σύγχρονα ΛΣ προκειμένου να προσφέρουν αξιόπιστία θα πρέπει να έχουν αρχιτεκτονική μικροπυρήνα (microkernel). Με αυτή την αρχιτεκτονική μόνο τα βασικά συστατικά του ΛΣ φορτώνονται στον πυρήνα ενώ όλα τα υπόλοιπα (σύστημα αρχείων, σύστημα επικοινωνίας κλπ) τρέχουν ως διακομιστές (servers). Επομένως αν κάποιο υποσύστημα πάθει βλάβη, όπως το σύστημα αρχείων, ενώ σε ένα μονολιθικό ΛΣ θα τίθονταν εκτός λειτουργίας όλος ο κόμβος, σε ένα ΛΣ αρχιτεκτονικής μικροπυρήνα το σύστημα αρχείων θα έκανε μια επανεκκίνηση και ο κόμβος θα συνέχιζε την λειτουργία του.
- **Εύκολο προγραμματιστικό μοντέλο:** Το προγραμματιστικό μοντέλο έχει σημαντική επιρροή στην δημιουργία εφαρμογών. Το πιο γνωστό προγραμματιστικό μοντέλο είναι το πολυυηματικό με χαμηλές απαιτήσεις σε πόρους [13].
- **Αποδοτική χρονοδρομολόγηση:** Η χρονοδρομολόγηση ορίζει την διάταξη με την οποία εισέρχονται οι διαδικασίες στον πυρήνα του κεντρικού επεξεργαστή. Επειδή όμως τα ΑΔΑ χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών, υπάρχουν εφαρμογές που χρειάζονται ελαστική χρονοδρομολόγηση η οποία εξουκονομεί περισσότερη ενέργεια ενώ άλλες χρειάζονται, λόγω της φύσης τους, χρονοδρομολόγηση πραγματικού χρόνου η οποία εξαντλεί την ενέργεια ενός κόμβου γρηγορότερα. Το ΛΣ θα πρέπει να επιτρέπει στον προγραμματιστή τον τύπο της χρονοδρομολόγησης που θέλει να χρησιμοποιήσει.
- **Αφηρημένη διεπαφή επικοινωνίας:** Η διεπαφή επικοινωνίας αναφέρεται τόσο στην επικοινωνία των διεργασιών μέσα σε έναν κόμβο όσο και στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Επειδή οι κόμβοι μπορεί να είναι τελείως ετερογενής μεταξύ τους, με άλλο υλικό και αρχιτεκτονική ο καθένας τους, το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να αφαιρέσει τέτοιες λεπτομέρειες από την διεπαφή του προγραμματιστή.

Όπως φάνηκε και στο κεφάλαιο 1.3 από το ξεκίνημα των ΑΔΑ οι επιστήμονες προσπαθούσαν να δημιουργήσουν ένα λειτουργικό σύστημα το οποίο να έχει χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά που αναφέρθηκαν. Τα πρώτο λειτουργικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε μαζικά ήταν το TinyOS το 2000. Μετέπειτα δημιουργήθηκαν και άλλα ΛΣ για δίκτυα αισθητήρων καθένα με διαφορετικό κίνητρο και στόχο. Συνοπτικά τα πιο γνωστά λειτουργικά συστήματα για δίκτυα αισθητήρων είναι τα εξής:

- **TinyOS:** Αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Berkeley σε συνεργασία με την Intel και την Crossbow Technology. Είναι ανοιχτού κώδικα και πρώτη έκδοσή του κυκλοφόρησε το 2000. Υποστηρίζει έναν τεράστιο αριθμό από πλατφόρμες υλικού ενώ οι απαιτήσεις του σε μνήμη RAM είναι μόλις 2KB. Η ανάπτυξη εφαρμογών TinyOS γίνεται στην γλώσσα nesC (Network Embedded Systems C) μία παραλλαγή της C αλλά με αντικειμενοστραφή χαρακτηριστικά και προορισμένη ειδικά για ΑΔΑ [14].
- **Contiki:** Είναι ένα μικρό, ανοιχτού κώδικα, πολυνηματικό και πλήρως φορητό ΛΣ σχεδιασμένο ειδικά για συσκευές με περιορισμένους πόρους. Μία τυπική εγκατάσταση χρειάζεται μόλις 2KB RAM και 40 KB ROM. Είναι γραμμένο σε C, υποστηρίζει πλήρως το IPv6 ενώ μπορεί να εγκατασταθεί γραφικό περιβάλλον, περιηγητής, web server και πολλά ακόμα. Η πρώτη έκδοση κυκλοφόρησε το 2005 ενώ έχει μεγάλη κοινότητα που ασχολείται με την περαιτέρω ανάπτυξή του [15].
- **Mantis:** Πολυνηματικό λειτουργικό σύστημα ειδικά σχεδιασμένο για μικροελεγκτές με πολύ περιορισμένους πόρους. Συγκεκριμένα μπορεί να τρέξει ακόμα και με 500Bytes RAM ενώ απαιτεί μόλις 14KB μνήμη ROM. Ο δρομολογητής κάνει αποδοτική χρήση της διαθέσιμης ενέργειας θέτοντας σε λειτουργία ύπουν τον μικροελεγκτή όποτε χρειάζεται. Είναι γραμμένο σε γλώσσα C [16].
- **SOS:** Το λειτουργικό σύστημα αναπτύχθηκε στα πλαίσια ενός έργου του πανεπιστημίου UCLA σε συνεργασία με άλλα πανεπιστήμια. Το κύριο κίνητρο για την ανάπτυξή του ήταν το γεγονός ότι μια εφαρμογή για ένα λειτουργικό σύστημα ΑΔΑ είχε άμεση σχέση με το ίδιο το ΛΣ. Επομένως η μεταφορά του σε άλλο ΛΣ ήταν απαγορευτική. Το ΛΣ SOS έχει δημιουργήσει διεπαφές οι οποίες συναντούνται στα σύγχρονα λειτουργικά συστήματα όπως runtime error checking, garbage collection κλπ. Έχει μεταφερθεί σε μικροελεγκτές αλλά η ανάπτυξή του γίνεται με αργά βήματα κυρίως λόγω περιορισμένης χρήσης του [17].
- **Nano-RK:** Αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο Carnegie Mellon με πλήρη υποστήριξη multi-hop δικτύου. Υποστηρίζει τις πλατφόρμες FireFly και MicaZ. Περιλαμβάνει πυρήνα πολύ μικρού μεγέθους αλλά με αρκετές δυνατότητες ενώ μπορεί να τρέξει σε συστήματα με 2KB RAM και 18KB ROM. Υποστηρίζει σταθερής προτεραιότητας preemptive δρομολογητή διασφαλίζοντας έτοι ότι όλες οι προθεσμίες συναντώνται. Το ΛΣ μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας μέσω της ιδιότητας που παρέχει οι εφαρμογές να μπορούν να ορίσουν τις απαιτήσεις τους σε πόρους που θα χρειαστούν κατά την εκτέλεσή τους [18].

- **Maté:** Η βασική ιδέα αυτού του εγχειρήματος είναι να φτιαχτεί μια εικονική μηχανή(virtual machine) που να μπορεί να εγκατασταθεί επάνω από ΛΣ για δίκτυα αισθητήρων. Επομένως το Maté θα λειτουργούσε όπως η Java λειτουργεί στα σύγχρονα λειτουργικά συστήματα. Όμως ενώ η Java προσφέρει σωρεία από κλάσεις δημιουργεί ένα πολύ μεγάλο αρχείο bytecode απαγορευτικού μεγέθους για τους μικροελεγκτές που χρησιμοποιούνται στα ΑΔΑ. Αντίθετα η ιδέα στο Maté είναι ότι θα επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει σε ποια γλώσσα προγραμματισμού θα γράψει το πρόγραμμά του, ποιες κλάσεις να συμπεριλάβει κλπ ώστε να μειωθεί το μέγεθος της εικονικής μηχανής και του τελικού αρχείου bytecode [19].

Φυσικά υπάρχουν και άλλα εργαλεία για την γρήγορη ανάπτυξη εφαρμογών σε λειτουργικά συστήματα ΑΔΑ. Για παράδειγμα έχουν αναπτυχθεί αναπτυχθεί εξομοιωτές διακριτού χρόνου όπως ο ns-2 [20] και ο νεότερος ns-3 [21], ο OMNeT++ [22], ο NetSim [23] και ο J-Sim [24]. Παράλληλα έχουν αναπτυχθεί frameworks που περιέχουν έτοιμες υλοποιήσεις αλγορίθμων και μοντέλων για δίκτυα αισθητήρων και ασύρματα δίκτυα γενικότερα. Ένα από τα πιο γνωστά είναι το wiselib [25], μια βιβλιοθήκη η οποία περιέχει συναρτήσεις για αλγορίθμους δρομολόγησης, localization, κατανεμημένους αλγόριθμους κλπ ενώ παρέχει πλήρη υποστήριξη για όλες σχεδόν τις πλατφόρμες δικτύων αισθητήρων.

1.6 Σχεδιασμός Δικτύου, Προκλήσεις και το Μέλλον

Κατά το σχεδιασμό ενός νέου δικτύου αισθητήρων ο σχεδιαστής έχει μια πληθώρα επιλογών να κάνει ώστε να πετύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα σε σχέση με τις απαιτήσεις του. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν άρθρα που μελετάνε κάθε πρόβλημα των ΑΔΑ ξεχωριστά αλλά κρατάνε όλους τις άλλες παραμέτρους σταθερές. Επομένως όταν ο σχεδιαστής αναμίξει διάφορους αλγορίθμους και μοντέλα κατά την σχεδίαση (πχ έναν αλγόριθμο για την δρομολόγηση των πακέτων και ένα μοντέλο για την τοπολογία των δικτύου) μπορεί να έχει χειρότερα αποτελέσματα από τα αναμενόμενα. Οι πιο σημαντικές παράμετροι που ένας σχεδιαστής θα πρέπει να ρυθμίσει είναι οι εξής:

- **Ανάπτυξη των κόμβων:** Καθώς οι κόμβοι σε ένα ΑΔΑ γίνονται ολοένα και μικρότεροι, η ανάπτυξή τους μέσα σε έναν χώρο μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα μπορούν να αναπτυχθούν ομοιόμορφα τυχαία (π.χ. να ριχθούν από ένα αεροπλάνο) ή να εγκατασταθούν σε συγκεκριμένα σημεία το οποίο είναι πιο δύσκολο ειδικά αν ο αριθμός των κόμβων είναι μεγάλος. Όμως η ανάπτυξη των κόμβων μπορεί να είναι συνεχόμενη. Για παράδειγμα σε ένα ΑΔΑ μπορεί να διαπιστωθεί ότι μετά από κάποιο καιρό λειτουργίας ένα σημείο ίσως χρειάζεται περισσότερους κόμβους για να το επιβλέπουν. Ο τρόπος που θα τοποθετηθούν τελικά οι κόμβοι (δηλαδή αν θα είναι ομοιόμορφοι ή ανομοιόμορφη η κατανομή τους) επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του δικτύου.
- **Κινητικότητα:** Η κινητικότητα μπορεί να είναι απρόσμενη (π.χ. μέσω του αέρα ή του νερού) ή να είναι προσχεδιασμένη για μερικούς κόμβους. Η κίνηση μερικών κόμβων σε ένα δίκτυο μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του δικτύου αφού μέσω της κίνησής τους μπορούν να ξεκουράζουν τους υπόλοιπους κόμβους πηγαίνοντας πολύ κοντά σε αυτούς και παίρνοντας τα δεδομένα τους. Όμως οι κόμβοι που κινούνται θα πρέπει να έχουν

μεγάλους πόρους ενέργειας ή να μπορούν να επαναφορτίζονται με κάποιο τρόπο γιατί αλλιώς η ενέργεια τους θα τους τελειώσει πολύ πιο γρήγορα από την ενέργεια των υπολοίπων κόμβων.

- **Κόστος, Αριθμός κόμβων και Διαθέσιμοι πόροι:** Οι 3 έννοιες αυτές είναι αλληλένδετα συνδεδεμένες. Μεγαλύτερο μέγεθος δικτύου, δηλαδή περισσότεροι κόμβοι, ή μεγαλύτερο μέγεθος διαθέσιμων πόρων συνεπάγεται άμεσα στην δραματική αύξηση του κόστους. Κρατώντας το κόστος του δικτύου σταθερό ο σχεδιαστής θα πρέπει να επιλέξει μεταξύ μεγάλου αριθμού κόμβων και μεγάλων διαθέσιμων πόρων, κυρίως ενέργειας.
 - **Τύπος κόμβων** Ένα ακόμα στοιχείο το οποίο έχει άμεση σχέση με το κόστος του δικτύου αλλά ταυτόχρονα και με την λειτουργία και τον σκοπό του ΑΔΑ. Χαρακτηριστικά των κόμβων περιλαμβάνουν την αρχιτεκτονική τους (π.χ. επεξεργαστής, μεγέθη RAM και ROM) αλλά και τις δυνατότητες επικοινωνίας τους όπως WiFi, Zigbee, Laser, Bluetooth, IrDA κλπ.
 - **Ομοιογένεια κόμβων:** Αν και συνήθως τα ΑΔΑ κατασκευάζονται από ίδιο τύπο κόμβων αυτό δεν είναι ο κανόνας. Ένας σχεδιαστής δικτύου μπορεί να προτιμήσει να εισάγει 80% φθηνών κόμβων και 20% ακριβότερων οι οποίοι όμως να έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως κίνηση ή GPS που τελικά το δίκτυο να έχει καλύτερη απόδοση.
 - **Κάλυψη του χώρου:** Ανάλογα με τον σκοπό ενός ΑΔΑ διαφορετικές πολιτικές κάλυψης είναι αναγκαίες. Για παράδειγμα αν ένα ΑΔΑ πρέπει να εντοπίζει κινούμενες οντότητες μέσα στον χώρο του τότε θα πρέπει το κάθε σημείο να είναι τουλάχιστον 3-φορές καλυψμένο (δηλαδή τουλάχιστον 3 κόμβοι να το αντιλαμβάνονται μέσω αισθητήρων) έτσι ώστε να μπορούν να δουλέψουν αλγόριθμοι localization και να μπορεί να βρεθεί η ακριβής θέση της οντότητας. Αντίθετα αν κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο τότε 1-φορά ή 2-φορές κάλυψη είναι αρκετή για τις ανάγκες του δικτύου.
- Ο σχεδιασμός ενός ΑΔΑ έχει άμεση σχέση με την απόδοσή του. Ωστόσο η απόδοση έχει πολλές έννοιες ανάλογα με τον σκοπό του δικτύου. Οι βασικότερες μετρικές απόδοσης είναι οι εξής:
- **Διάρκεια ζωής:** Ο πιο κρίσιμη αλλά ταυτόχρονα η πιο αιμφιλεγόμενη μετρική απόδοσης. Αφηρημένα, η διάρκεια ζωής ενός ΑΔΑ ορίζεται το χρονικό διάστημα μέχρι το δίκτυο να γίνει άχρηστο. Στην βιβλιογραφία οι ορισμοί διαφέρουν σημαντικά. Ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μέχρι να πεθάνει ο πρώτος κόμβος του δικτύου ενώ υπάρχουν και ορισμοί που το ορίζουν ως το χρονικό διάστημα μέχρι να πεθάνει το 70% των κόμβων του δικτύου.
 - **Ομοιόμορφη κατανομή ενέργειας:** Μετρική που έχει άμεση σχέση με την διάρκεια ζωής ενός ΑΔΑ. Μη ανομοιόμορφη κατανομή ενέργειας οδηγεί άμεσα κάποιους κόμβους να εξαντλήσουν την ενέργεια τους πολύ πιο γρήγορα από κάποιους άλλους. Επομένως δημιουργούνται τρύπες (energy holes) στο δίκτυο οι οποίες μπορεί να σπάσουν το δίκτυο σε μικρότερες συνεκτικές συνιστώσες και ως αποτέλεσμα να χάνονται πακέτα.
 - **Χρονοκαθυστέρηση (Latency):** Ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται από την στιγμή που δημιουργηθεί ένα γεγονός (event) στο δίκτυο μέχρι να το μάθει

η Πηγή. Εξαρτάται από τα hops του δικτύου αλλά γενικά είναι κλάσμα του δευτερολέπτου.

- **Λόγος Επιτυχίας (Success rate):** Ορίζεται ως το ποσοστό των ληφθέντων γεγονότων στην Πηγή προς το ποσοστό των συνολικών γεγονότων που δημιουργήθηκαν στο χώρο που καλύπτει το ΑΔΑ. Ή αλλιώς ο αριθμός των πακέτων που αποστάλθηκαν σωστά προς τον συνολικό αριθμό πακέτων που αποστάλθηκαν.
- **Μέσος βαθμός των κόμβων (Node Degree):** Ορίζεται ως ο μέσος αριθμός των γειτόνων ενός κόμβου. Έχει μεγάλη σημασία γιατί αν ο μέσος αριθμός γειτόνων είναι 1 με μικρή διασπορά τότε αν πεθάνει ένας κόμβος με μεγάλη πιθανότητα το δίκτυο θα σπάσει σε 2 μικρότερα υποδίκτυα.

Φυσικά σε όλα αυτά θα πρέπει να συνυπολογίζεται κάθε φορά και η τυπική απόκλιση των εκάστοτε μετρικών.

Το όραμα που υπάρχει για τα ΑΔΑ για το μέλλον είναι ο κάθε άνθρωπος να μπορεί να αγοράσει και να εγκαταστήσει εκατοντάδες κόμβους εύκολα σε σημεία που χρειάζεται ο ίδιος. Οι κόμβοι αυτόματα θα ορίζουν αυτόματα πρωτόκολλα και τους αλγορίθμους που πρέπει να χρησιμοποιήσουν για την λειτουργία που έχουν επιλεχτεί. Ο κάθε κόμβος θα πρέπει να είναι αθάνατος, δηλαδή να μην χρειάζεται ποτέ να αντικατασταθεί για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης τα ΑΔΑ θα χρησιμοποιούνται πολύ στην παρακολούθηση πλανητών. Εκεί ο κάθε κόμβος θα πρέπει να παραμένει ζωντανός για χρόνια ίσως και δεκαετίες. Επομένως οι πλήρης εκμετάλλευση των μηχανισμών που βοηθούν τους κόμβους να κρατήσουν την ενέργειά τους για χρόνια είναι πάγια τοποθέτηση της επιστημονικής κοινότητας.

1.7 Επισκόπηση της Διπλωματικής

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι πιο γνωστές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας. Παρουσιάζονται αποδοτικά πρωτόκολλα (αλγόριθμοι) δρομολόγησης καθώς και τα διάφορα είδη τους. Επίσης παρουσιάζονται πρωτόκολλα τα οποία κάνουν χρήση κινητών οντοτήτων, δηλαδή συσκευές οι οποίες μπορούν να κινούνται στην περιοχή του δικτύου. Τέλος παρουσιάζονται εναλλακτικές τεχνικές όπως η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και η μετέπειτα αύξηση ή αύξηση των κόμβων του δικτύου ενώ γίνεται μία αναφορά στην ασύρματη μετάδοση ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται πλήρως η τεχνολογία της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας. Αρχικά γίνεται μια ιστορική αναδρομή γύρω από αυτήν την τεχνολογία (η οποία έχει τις ρίζες της στον Νικόλα Τέσλα) και παρουσιάζεται η εξέλιξή της. Στην συνέχεια επεξηγείται πλήρως η λειτουργία της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας καθώς και οι ιδιότητές της.

Στο κεφάλαιο 4 ορίζεται το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί με την εμφάνιση της καινούργιας αυτής τεχνολογίας. Στην συνέχεια ορίζεται αυστηρά το μοντέλο κάτω από το οποίο θα λυθεί το πρόβλημα και αποδεικνύεται ότι το πρόβλημα είναι υπολογιστικά δύσκολο, ότι δηλαδή ανήκει στην κλάση NP-πλήρης (NP-Complete) των προβλημάτων. Τέλος παρουσιάζονται στρατηγικές επίλυσης, δηλαδή αποδοτικής διαχείρισης της συνολικής ενέργειας του δικτύου και ευρετικές τροχιές που θα μπορούσε να ακολουθεί ο κινητός φορτιστής.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται η πειραματική αξιολόγηση των λύσεων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Αρχικά γίνεται σύγκριση ανάμεσα στο χρόνο ζωής ενός

ασύρματου δικτύου αισθητήρων χωρίς φόρτιση και ενός ΑΔΑ με φόρτιση. Στην συνέχεια γίνονται εκτεταμένα πειράματα ανάμεσα στις προτεινόμενες στρατηγικές και τις τροχιές του κινητού φορτιστή.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6, γίνεται μια επισκόπηση των αποτελεσμάτων που δίνονται και δίνονται προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

2

Τεχνικές Αύξησης της Διάρκειας Ζωής ενός ΑΔΑ

2.1 Αποδοτικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Η αποδοτική δρομολόγηση στα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί ένα από τα πιο προκλητικά προβλήματα λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που τα διαχωρίζουν από τα κλασικά δίκτυα και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Καταρχήν πολλές φορές δεν είναι δυνατό να κτιστεί ένας καθολικός τρόπος διευθυνσιοδότησης λόγω του τεράστιου αριθμού των αισθητήρων. Επομένως πρωτόκολλα τα οποία είναι βασισμένα στην διευθυνσιοδότηση IP δεν μπορούν να εφαρμοστούν στα δίκτυα αισθητήρων. Δεύτερον, σε αντίθεση με τα κλασικά δίκτυα δεδομένων, σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές των ΑΔΑ απαιτούνται δεδομένα από πολλές διαφορετικές περιοχές ανίχνευσης τα οποία προωθούνται σε μία συγκεκριμένη Πηγή. Επιπλέον, στα δεδομένα που αναπαράγονται μπορεί να υπάρχει πλεονασμός πληροφορίας αφού πολλές μικρές περιοχές μπορεί να παράγουν τα ίδια δεδομένα. Αυτός ο πλεονασμός πρέπει να εκμεταλλευθεί από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αποδοτικά έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας και επέκταση του χρόνου ζωής του δικτύου. Στην συνέχεια θα περιγραφούν συνοπτικά τα πιο γνωστά πρωτόκολλα δρομολόγησης.

2.1.1 Δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα

Όπως αναφέρθηκε σε ορισμένες εφαρμογές δεν είναι δυνατόν να ορίσουμε ξεχωριστά αναγνωριστικά (IDs) σε κάθε κόμβο ενός ΑΔΑ κυρίως λόγω του αριθμού των κόμβων. Αυτή η αδυναμία σε συνδυασμό με την τυχαία ανάπτυξη των κόμβων καθιστούν αδύνατη την επιλογή ενός υποσυνόλου κόμβων για την απαίτηση συγκεκριμένων πληροφοριών (queries). Επομένως τα δεδομένα συνήθως μεταδίδονται από κάθε κόμβο και υπάρχει σημαντικός πλεονασμός στην πληροφορία. Επειδή ο πλεονασμός καταναλώνει μεγαλύτερη ενέργεια σε ένα ΑΔΑ, έχουν αναπτυχθεί δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία εκμεταλλεύονται τον πλεονασμό πληροφορίας για να επιλέξουν υποσύνολα κόμβων. Τα πιο γνωστά δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι τα εξής:

Flooding και Gossiping: Τα πρωτόκολλα πλημμύρας (flooding) και κουτσομπολιού (gossiping) [26] είναι δύο κλασικοί μηχανισμοί για την μετάδοση δεδομέ-

νων σε δίκτυα αισθητήρων χωρίς την χρήση κάποιου αλγορίθμου δρομολόγησης ή την συντήρηση κάποιας συγκεκριμένης τοπολογίας. Στην μέθοδο πλημμύρας κάθε κόμβος μόλις λάβει ένα πακέτο δεδομένων το στέλνει σε όλους τους γείτονές του. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το πακέτο να φτάσει στον προορισμό του ή όταν ο αριθμός των βημάτων (hops) που διήνυσε το πακέτο ξεπεράσει έναν συγκεκριμένο αριθμό (συνήθως την διάμετρο του δικτύου). Η μέθοδος του κουτσομπολιού είναι μια λίγο πιο εξελιγμένη μορφή της μεθόδου πλημμύρας. Αντί ένας κόμβος, μόλις λάβει ένα καινούργιο πακέτο, να το στείλει σε όλους τους γείτονές του, το στέλνει σε έναν γείτονα ο οποίος επιλέγεται τυχαία, ομοιόμορφα κατανεμημένα, από το σύνολο των γείτονων του.

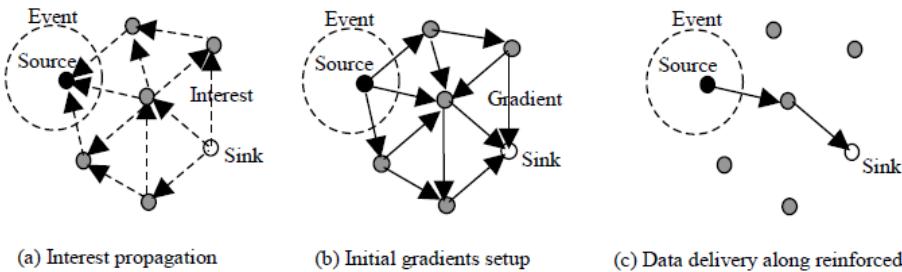
Παρόλο που τα δύο αυτά πρωτόκολλα μπορούν να υλοποιηθούν πάρα πολύ εύκολα, έχουν αρκετά μειονεκτήματα σχετικά με την απόδοσή τους. Συγκεκριμένα, η μέθοδος πλημμύρας έχει πολύ μεγάλο πλεονασμό δεδομένων και επομένως σπαταλάει την ενέργεια του δικτύου. Αντίθετα, η μέθοδος κουτσομπολιού έχει πολύ μεγάλη καθυστέρηση αφού ο τρόπος που επιλέγονται οι επόμενοι κόμβοι είναι τυχαίος.

SPIN: Το πρωτόκολλο SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) [27] είναι από τις πρώτες εργασίες που έγιναν με στόχο να χρησιμοποιηθεί ένας δεδομενοκεντρικός μηχανισμός για την δρομολόγηση στα δίκτυα αισθητήρων. Η ιδέα πίσω από το πρωτόκολλο SPIN είναι να ονομάζει τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας υψηλού επιπέδου περιγραφείς (descriptors) και μετα-δεδομένα (meta-data). Πριν την αποστολή κάποιου πακέτου δεδομένων, τα μετα-δεδομένα ανταλλάσσονται πρώτα ανάμεσα στους κόμβους μέσα από έναν μηχανισμό διαφήμισης. Κάθε κόμβος μόλις λάβει ένα νέο πακέτο δεδομένων το διαφημίζει σε όλους τους γείτονές του. Οι γείτονες που ενδιαφέρονται, ζητάνε τα δεδομένα να τους αποσταλούν.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου SPIN είναι ότι οι τοπολογικές αλλαγές είναι τοπικές αφού ο κάθε γείτονας χρειάζεται να ξέρει ουσιαστικά μόνο τους γείτονες που είναι ένα βήμα (hop) μακριά. Επίσης η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται κατά έναν παράγοντα 3.5 [27] σε σχέση με το πρωτόκολλο της πλημμύρας. Το μειονέκτημα του πρωτοκόλλου είναι ότι ο μηχανισμός διαφήμισης που χρησιμοποιεί δεν επαρκεί για να υπάρχει κάποια εγγύηση στην παράδοση δεδομένων. Διότι αν ένας κόμβος που ενδιαφέρεται στα δεδομένα είναι πολύ μακριά απ' τον κόμβο που τα παράγει τότε όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται στο ενδιάμεσο δεν ενδιαφέρονται και επομένως τα δεδομένα πολύ πιθανόν να μην παραδοθούν καθόλου στον προορισμό τους.

Directed Diffusion: Το πρωτόκολλο Directed Diffusion (DD) [28] αποτελεί ένα σημαντικό ορόσημο στα δεδομενο-κεντρικά πρωτόκολλα και στην έρευνα των δικτύων αισθητήρων. Η ιδέα στοχεύει στη διάχυση δεδομένων μέσα από τους κόμβους χρησιμοποιώντας ένα σχήμα ονομασίας για τα δεδομένα. Ο κύριος λόγος για την χρησιμοποίηση ενός τέτοιου σχήματος είναι για να ξεφορτωθεί το πρωτόκολλο δρομολόγησης από άχρηστες εργασίες χαμηλότερων επιπέδων έτσι ώστε να εξοικονωθεί ενέργεια. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί ζευγάρια ιδιότητας-τιμής σε αναθέσεις επερωτημάτων (queries). Προκειμένου να γίνει ένα επερώτημα, ένα "ενδιαφέρον" (interest) ορίζεται χρησιμοποιώντας μια λίστα από τέτοια ζευγάρια όπως για παράδειγμα ονόματα αντικειμένων, διάστημα, διάρκεια, γεωγραφική περιοχή και άλλα. Το "ενδιαφέρον" μεταδίδεται από την Πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις (broadcast). Κάθε κόμβος αφού λάβει ένα "ενδιαφέρον" το αποθηκεύει

στη μνήμη του για όσο καιρό είναι έγκυρο. Τα "ενδιαφέροντα" στην μνήμη χρησιμοποιούνται για να συγκριθούν με τα ληφθέντα δεδομένα που έχουν τις συγκεκριμένες ιδιότητες και τιμές. Επίσης κάθε "ενδιαφέρον" έχει κάποια επιπλέον πεδία που αφορούν τους συνδέσμους ανάμεσα σε έναν κόμβο και τους γείτονες που απάντησαν με δεδομένα σχετικά με το ενδιαφέρον. Τέτοια πεδία είναι η ποιότητα του συνδέσμου, ο ρυθμός των εισερχόμενων δεδομένων η διάρκεια κ.α. Επομένως χρησιμοποιώντας αυτούς τους μηχανισμούς μπορούν να εγκατασταθούν πραγματικά μονοπάτια μεταξύ των κόμβων που παράγουν δεδομένα και της Πηγής. Η Πηγή στο τέλος ξαναστέλνει το αυθεντικό πακέτο "ενδιαφέρον" χρησιμοποιώντας τα καινούργια μονοπάτια. Με αυτόν τον τρόπο ουσιαστικά ενισχύει τα μονοπάτια αυτά τα οποία με μεγάλη πιθανότητα είναι και τα καλύτερα. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 2.1



Εικόνα 2.1: Ένα σενάριο του πρωτοκόλλου Directed Diffusion.

Το πρωτόκολλο Directed Diffusion διαφέρει από το SPIN ως προς το τρόπο που ζητάει τις πληροφορίες, δηλαδή τον τρόπο που θέτει τα επερωτήματα. Στο DD η Πηγή θέτει επερώτημα σε όλους τους αισθητήρες αν κάποια συγκεκριμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα. Αν υπάρχουν τα δεδομένα ανάλογα με τα μονοπάτια που έχουν δημιουργηθεί, αυτά ενισχύονται από την Πηγή. Αντίθετα στο SPIN κάθε κόμβος διαφημίζει τα δεδομένα του στους υπόλοιπους κόμβους. Εάν κάποιος κόμβος ενδιαφέρεται τότε τα απαιτεί. Είναι εμφανές ότι στο πρωτόκολλο DD υπάρχει υπεροχή όσον αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας ειδικά αν τα γεγονότα που εμφανίζονται στο δίκτυο έχουν μεγάλη διάρκεια. Όμως αν τα γεγονότα έχουν πολύ μικρή διάρκεια τότε το DD έχει πολύ μικρή απόδοση αφού η κατανάλωση (overhead) που θα υπάρχει μέχρι να στηθούν τα μονοπάτια θα είναι συγκρίσιμη με την ενέργεια που σπαταλάται για να μεταφερθούν τα πραγματικά δεδομένα.

Rumor routing: Η δρομολόγηση ανά φήμες (rumor routing) [29] είναι μια παραλλαγή του πρωτοκόλλου Directed Diffusion και έχει κυρίως να κάνει με ΑΔΑ στα οποία γεωγραφικά κριτήρια δεν μπορούν να εφαρμοστούν. Γενικώς το DD πλημμυρίζει το δίκτυο με πακέτα προς όλους τους κόμβους μέχρι να φτιαχτούν τα πραγματικά μονοπάτια τα οποία θα εμπεριέχουν ένα πολύ μικρό ποσοστό των συνολικών κόμβων του δικτύου. Αντίθετα στην δρομολόγηση ανά φήμες ο κάθε κόμβος προωθεί το αναγνωριστικό πακέτο μόνο αν έχει "ακούσει" και ο ίδιος κάτι. Προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται περισσότερη ενέργεια στο δίκτυο αισθητήρων μόνο όταν ο αριθμός των γεγονότων είναι σχετικά μικρός.

COUGAR: Αυτό το δεδομενο-κεντρικό πρωτόκολλο είναι ριζοσπαστικό σε σχέση με τα υπόλοιπα καθώς βλέπει όλο το δίκτυο ως μια τεράστια, κατανεμημένη, βάση δεδομένων [30]. Η βασική ιδέα είναι να χρησιμοποιεί δηλωτικά ερωτήματα (declarative queries) με σκοπό να δημιουργήσει αφηρημένα επερωτήματα όπως η επιλογή όλων των σχετικών κόμβων με μια πληροφορία κλπ. Αυτή η αφαίρεση γίνεται μέσα από ένα καινούργιο επίπεδο, αυτό των επερωτημάτων ανάμεσα στο επίπεδο δικτύου και το επίπεδο των εφαρμογών. Όμως παρόλο που το επίπεδο αυτό είναι ανεξάρτητο του δικτύου έχει κάποια μειονεκτήματα. Καταρχήν ένα επιπλέον επίπεδο στην στοίβα του δικτύου θα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια σε κάθε κόμβο. Επιπλέον, όπως και στις πραγματικές κατανεμημένες βάσεις δεδομένων, έτσι και εδώ θα πρέπει να λύνονται αποδοτικά θέματα συγχρονισμού.

2.1.2 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα

Όπως και στα κλασσικά δίκτυα ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα σχεδιασμού είναι αυτό της κλιμακωσιμότητας. Ένα "επίπεδο" δίκτυο μπορεί να προκαλέσει στην πύλη δικτύου (gateway) υπερφόρτωση όταν το μέγεθος του δικτύου γίνει πολύ μεγάλο. Κατά συνέπεια η υπερφόρτωση μπορεί να προκαλέσει σοβαρή καθυστέρηση στις επικοινωνίες και αντίστοιχα να χαθούν μερικά γεγονότα ή οι χρονικοί περιορισμοί που ορίζονται από αυτά. Ειδικά στην περίπτωση των ΑΔΑ όπου ο κάθε κόμβος έχει πολύ μικρή ακτίνα εμβέλειας, η κλιμακωσιμότητα ενός "επίπεδου" πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι πολύ δύσκολη. Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί εισάγοντας την έννοια της ιεραρχίας που πολλές φορές γίνεται με μικρές συστάδες (clusters) σε όλη την περιοχή του δικτύου. Σε κάθε συστάδα συνήθως εκλέγεται ένας αρχηγός (cluster head) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την συστάδα του. Τα μέλη της συστάδας, κόμβοι του ΑΔΑ, ορίζονται από την ακτίνα εμβέλειας του αρχηγού όταν αυτός εκπέμψει ένα αναγνωριστικό μήνυμα. Αν σε έναν κόμβο έρθει παραπάνω από ένα αναγνωριστικά μηνύματα τότε ο κόμβος θα γίνει μέλος της συστάδας της οποία το αναγνωριστικό σήμα είχε το καλύτερο (δυνατότερο) σήμα. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα πιο γνωστά ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.

LEACH: Το πρωτόκολλο LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [31] είναι ένα από τα πιο γνωστά ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων. Η βασική ιδέα είναι να δημιουργηθούν συστάδες (clusters) βάση την ισχύ του ληφθέντος σήματος από τον αρχηγό. Οι κόμβοι της κάθε συστάδας, χρησιμοποιώντας πολυ-βηματικές (multi-hop) μεταδόσεις, στέλνουν τα δεδομένα τους στον αρχηγό ο οποίος τα μαζεύει και τα στέλνει απευθείας στην Πηγή. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η κατανάλωση της ενέργειας αφού μόνο οι αρχηγοί κάνουν μακρινές μεταδόσεις δεδομένων. Έχει υπολογιστεί ότι ο βέλτιστος αριθμός αρχηγών σε ένα δίκτυο είναι περίπου το 5% όλων των κόμβων του δικτύου. Προκειμένου να υπάρχει ακόμη μεγαλύτερη ισορροπία στην ενέργεια, οι αρχηγοί και κατά συνέπεια και οι συστάδες, αλλάζουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Συγκεκριμένα ένας κόμβος γίνεται αρχηγός με την παρακάτω πιθανότητα:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \cdot (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{if } x < 0 \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου p είναι το επιθυμητό ποσοστό των αρχηγών, r είναι ο τρέχον γύρος και G είναι το σύνολο των κόμβων που δεν έχουν γίνει αρχηγοί τους προηγούμενους $\frac{1}{p}$ γύρους.

Το πρωτόκολλο LEACH μπορεί να πετύχει μέχρι και 7 φορές λιγότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα κλασσικά πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων [31] ενώ ακόμα και 12 χρόνια μετά την δημοσίευσή του παραμένει ένα από τα πιο κλασσικά πρωτόκολλα ΑΔΑ. Τα μόνα μειονεκτήματά του (τα οποία βελτιώθηκαν από επόμενες δημοσιεύσεις) είναι ότι το μοντέλο που υποθέτει για την ακτίνα εμβέλειας των κόμβων, για πολύ μεγάλα δίκτυα, είναι μη ρεαλιστικό. Επίσης, για πολύ μεγάλα δίκτυα οι αρχηγοί των συστάδων που βρίσκονται πολύ μακριά από την Πηγή εξαντλούν πολύ πιο γρήγορα την ενέργειά τους απότι οι αρχηγοί των συστάδων που βρίσκονται κοντά στην Πηγή.

PEGASIS & Hierarchical-PEGASIS: Το πρωτόκολλο PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) [32] αποτελεί μια βελτίωση του πρωτόκολλου δρομολόγησης LEACH. Αντί να δημιουργούνται συστάδες, το PEGASIS σχηματίζει αλυσίδες με όλους τους κόμβους έτσι ώστε κάθε κόμβος λαμβάνει μόνο από έναν κόμβο και αφού ενσωματώσει και τα δικά του δεδομένα τα αποστέλλει σε μόνον έναν γείτονα. Ταυτόχρονα μόνο ένας κόμβος στην αλυσίδα έχει επιλεχτεί τυχαία ως αρχηγός ο οποίος αναλαμβάνει να μαζεύει όλα τα δεδομένα και τα αποστέλλει στην Πηγή. Η διαφορά από το LEACH είναι ότι χρησιμοποιεί πολυβηματικές (multi-hop) μεταδόσεις μεταξύ των κόμβων και ότι μόνο ένας κόμβος σε κάθε γύρο είναι ο αρχηγός που αποστέλλει τα δεδομένα στην Πηγή. Προσομοιώσεις δείχνουν ότι μπορεί να βελτιώσει ακόμα και 100% την εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το LEACH. Το αρνητικό του όμως είναι ότι μπορεί τα πακέτα να έχουν μεγάλη καθυστέρηση μέχρι να φτάσουν στην Πηγή. Το πρωτόκολλο Hierarchical-PEGASIS [33] αποτελεί μια προέκταση του PEGASIS το οποίο σκοπεύει στην μείωση της καθυστέρησης που παρουσιάζεται στο PEGASIS. Ουσιαστικά δημιουργούνται περισσότερες από μια αλυσίδες με τον ίδιο προορισμό. Επίσης για την δημιουργία της αλυσίδας εφαρμόζει την μετρική *energy × delay*.

TEEN & APTEEN: Το πρωτόκολλο TEEN (The Energy Efficient sensor Network protocol) [34] είναι ένα iεραρχικό πρωτόκολλο σχεδιασμένο να μπορεί να ανταποκρίνεται γρήγορα στις γρήγορες αλλαγές όπως είναι η θερμοκρασία με μεγάλη λεπτομέρεια. Η γρήγορη ανταπόκριση είναι σημαντικό στοιχείο σε δίκτυα πραγματικού χρόνου. Οι συστάδες (clusters) σχηματίζονται παρόμοια με το LEACH πρωτόκολλο αλλά για για να πετύχει την γρήγορη ανταπόκριση, το πρωτόκολλο ορίζει δύο κατώφλια που έχουν σχέση με τον τρόπο ανίχνευσης των γεγονότων από τους κόμβους. Το πρώτο ονομάζεται το σκληρό κατώφλι (hard threshold) και ορίζει τις μικρότερες δυνατές τιμές μιας ιδιότητας που θα κάνουν τον κόμβο να "ξυπνήσει", δηλαδή να επανέλθει σε κανονική λειτουργία και να ενεργοποιήσει τον μεταδότη του. Επομένως το σκληρό κατώφλι επιτρέπει τον κάθε κόμβο να αναφέρει δεδομένα μόνο όταν οι ιδιότητες αυτών ξεπεράσουν μια συγκεκριμένη τιμή που έχει να κάνει με το πόσο ενδιαφέρον έχουν τα δεδομένα. Αντίθετα το μαλακό κατώφλι (soft threshold) επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων μόνο όταν το ποσοστό των αλλαγών ξεπεράσουν την τιμή του μαλακού κατωφλίου. Έτσι μειώνονται ακόμα περισσότερο οι μεταδόσεις πακέτων οι οποίες αφορούν πολύ μικρές αλλαγές στην περιοχή αίσθησης του κόμβου. Το μόνο πρόβλημα που αντιμετωπίζει το πρωτόκολλο TEEN είναι όταν ο διαχειριστής του δικτύου επιθυμεί ο κάθε κόμβος να

επιστρέφει πληροφορίες σε περιοδικό χρόνο. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε από μια προέκταση του TEEN, το ATEEN (Adaptive TEEN) [35] στο οποίο μπορεί να ορίσει η Πηγή με ποιον τρόπο θα γίνονται οι αναφορές από κάθε κόμβο.

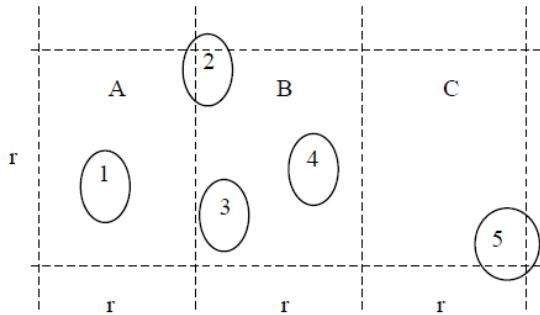
2.1.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στην Τοποθεσία

Πολλές φορές πρωτόκολλα για τα ΑΔΑ απαιτούν πληροφορίες για την τοποθεσία για τους κόμβους. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι πληροφορίες αυτές χρειάζονται για να υπολογιστούν οι αποστάσεις μεταξύ κόμβων και να εκτιμηθεί η ενέργεια που χρειάζεται για να αποσταλεί ένα πακέτο. Επιπλέον, εφόσον δεν εφαρμόζονται πρωτόκολλα βασισμένα στην διευθυνσιοδότηση IP για τα δίκτυα αισθητήρων όπως συμβαίνει στα κλασσικά δίκτυα δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα οι κόμβοι είναι όλοι τοποθετημένοι σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, πληροφορίες για την συγκεκριμένη τοποθεσία τους μέσα στην γεωγραφική περιοχή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δρομολόγηση δεδομένων και την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας. Για παράδειγμα, αν η περιοχή που πρέπει να επιβλεφθεί για συγκεκριμένο σκοπό είναι γνωστή, χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες τοποθεσίας των κόμβων, το επερώτημα (query) προς το δίκτυο μπορεί να διοχετευθεί σε συγκεκριμένους κόμβους μόνο. Αν και έχουν αναπτυχθεί αρκετά πρωτόκολλα τοπολογικής δρομολόγησης για τα κλασσικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αυτά δεν είναι εφαρμόσιμα στα ΑΔΑ καθώς η μετρική απόδοσης που έχουν δεν περιλαμβάνει την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο γνωστά πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται στην τοπολογία.

GAF: Το πρωτόκολλο GAF (Geographic Adaptive Fidelity) [36] είναι ένας ενεργειακός και βασισμένος στην τοπολογία αλγόριθμος δρομολόγησης σχεδιασμένος αρχικά για ασύρματα δίκτυα αλλά πλέον εφαρμόζεται και σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ο αλγόριθμος αυτός, εξοικονομεί ενέργεια απενεργοποιώντας περιττούς κόμβους χωρίς να επηρεάζει την ποιότητα δρομολόγησης του δικτύου. Ο αλγόριθμος δημιουργεί ένα εικονικό πλέγμα (grid) για την περιοχή που καλύπτεται. Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί την τοποθεσία του για να συσχετίσει τον εαυτό του με κάποιο σημείο (τετράγωνο) του πλέγματος. Οι κόμβοι που είναι συσχετισμένοι με το ίδιο σημείο στο πλέγμα θεωρούνται ότι είναι ισοδύναμοι όσον αφορά το κόστος της δρομολόγησης. Αυτή η ισοδυναμία εκμεταλλεύεται απενεργοποιώντας μερικούς κόμβους και αφήνοντας μόνο έναν ενεργοποιημένο σε κάθε σημείο (τετραγωνάκι) του πλέγματος. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 2.2. Συγκεκριμένα ο κόμβος 1 μπορεί να επικοινωνήσει τους 2,3 και 4 και οι κόμβοι 2,3 και 4 μπορούν να επικοινωνήσουν με τον κόμβο 5. Επομένως οι κόμβοι 2,3 και 4 είναι ισοδύναμοι και οι δύο από αυτούς μπορούν να απενεργοποιηθούν εξοικονομώντας ενέργεια.

Οι εξομοιώσεις έχουν δείξει ότι το πρωτόκολλο GAF μπορεί να έχει την ίδια απόδοση όσον αφορά την χρονοκαθυστέρηση (latency) και την απώλεια πακέτων σε σχέση με τα κλασσικά πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την διάρκεια ζωής του δικτύου σε σημαντικό βαθμό.

GEAR: Το πρωτόκολλο GEAR (Geographical and Energy Aware Routing) [37] προτείνει την χρησιμοποίηση γεωγραφικών δεδομένων για την διάδοση επερωτημάτων για συγκεκριμένες περιοχές αφού στις επερωτήσεις πολύ συχνά ενσωματώνει την τοποθεσία στην επερωτήση.



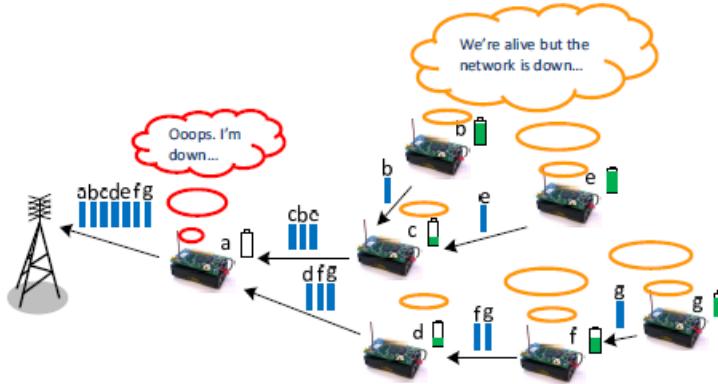
Εικόνα 2.2: Ένα σενάριο του πρωτοκόλλου GAF.

νονται γεωγραφικές ιδιότητες. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί ενέργειακές και γεωγραφικές ευρετικές μεθόδους προκειμένου να δρομολογήσει κάποιο πακέτο. Η ιδέα είναι να περιορίσει τον αριθμό των πακέτων "ενδιαφέροντος" που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Directed Diffusion [28] θεωρώντας μόνο μια συγκεκριμένη περιοχή και όχι όλη την περιοχή του δικτύου. Στο πρωτόκολλο GEAR, κάθε κόμβος κρατάει ένα κόστος εκτίμησης και ένα κόστος μάθησης της διαδρομής του πακέτου μέχρι τον προορισμό. Το κόστος εκτίμησης είναι ένας συνδυασμός της υπολειπόμενης ενέργειας και της απόστασης μέχρι τον προορισμό. Το κόστος μάθησης είναι ουσιαστικά το κόστος εκτίμησης αλλά λαμβάνει υπόψιν και της ενέργειακές τρύπες του δικτύου που συμβαίνουν όταν ένας κόμβος δεν έχει κανένα κοντινότερο γείτονα προς τον προορισμό εκτός από τον εαυτό του. Το κόστος μάθησης διαδίδεται ένα βήμα (hop) μακριά κάθε φορά που ένα πακέτο φτάνει στον προορισμό του έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί στην επόμενη δρομολόγηση.

2.1.4 Πρωτόκολλα Εξισορρόπησης Ενέργειας

Όλα τα προηγούμενα πρωτόκολλα είχαν στόχο την μείωση της κατανάλωσης του δικτύου αισθητήρων και ως απότερο σκοπό την επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Όμως πολλά από αυτά τα πρωτόκολλα δημιουργούν "παρενέργειες" σε ένα ΑΔΑ. Για παράδειγμα στο πρωτόκολλο LEACH [31] οι αρχηγοί των συστάδων στέλνουν τα δεδομένα τους κατευθείαν στην Πηγή. Όμως οι αρχηγοί των συστάδων οι οποίες βρίσκονται στην άκρη του δικτύου, δηλαδή μακριά από την Πηγή έχουν πολύ μεγαλύτερο κόστος μετάδοσης από ότι οι αρχηγοί των συστάδων που βρίσκονται κοντά στην Πηγή. Επομένως οι κόμβοι που βρίσκονται μακριά από την Πηγή εξαντλούν πολύ γρηγορότερα την ενέργειά τους και ενώ το δίκτυο συνεχίζει τη λειτουργία του, ένα κομμάτι του δεν επιβλέπεται. Ενα παρόμοιο παράδειγμα είναι το πρωτόκολλο Directed Diffusion [28] όπου αφού φτιαχτούν τα μονοπάτια, δημιουργείται μια δενδρική δομή με ρίζα την Πηγή όπου όλοι οι κόμβοι στέλνουν προς την Πηγή. Είναι επομένως λογικό ότι οι κόμβοι που είναι κοντά στην Πηγή, αντιμετωπίζουν ένα πολύ μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με τους κόμβους που είναι μακριά από την αυτή. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 2.3.

Λόγω αυτής της υπερφόρτωσης των κόμβων κοντά στην Πηγή, οι κόμβοι αυτοί αποφορτίζονται πολύ πιο γρήγορα από ότι οι κόμβοι μακριά από την Πηγή. Έτσι μετά από μικρό χρονικό διάστημα λειτουργίας του δικτύου οι κόμβοι αυτοί πεθαίνουν και δημιουργούνται μικρές ενέργειακές τρύπες (energy holes). Αυτό δημιουργεί πρόβλημα στο δίκτυο καθώς αν όλοι οι κόμβοι κοντά στην Πηγή απο-



Εικόνα 2.3: Ένα παράδειγμα υπερφόρτωσης των κόμβων κοντά στην Πηγή

φορτιστούν πλήρως, τότε ουσιαστικά το δίκτυο καθίσταται άχρηστο καθώς οι κόμβοι που είναι λίγο πιο μακριά από την Πηγή δεν μπορούν να στείλουν τα δεδομένα τους σε αυτήν. Μάλιστα, έχει δειχθεί ότι σε πρωτόκολλα όπως το Directed Diffusion όταν οι κόμβοι κοντά στην Πηγή πεθάνουν, το δίκτυο έχει ακόμα το 90% της ενέργειας του [38], όπου το μεγαλύτερο μέρος αυτής είναι κατανεμημένο στους κόμβους που βρίσκονται στην άκρη του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει αποδοτική διαχείριση της ενέργειας σε αυτά τα πρωτόκολλα. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνεται από αλγόριθμους εξισορρόπησης ενέργειας.

Τα πρωτόκολλα εξισορρόπησης ενέργειας αυτό που προσπαθούν να κάνουν είναι, σε κάθε χρονική στιγμή, όλοι οι κόμβοι του δικτύου να έχουν περίπου την ίδια ενέργεια. Είναι προφανές ότι τα πρωτόκολλα εξισορρόπησης ενέργειας καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από ότι τα πρωτόκολλα μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Όμως η διάρκεια ζωής¹ ενός ΑΔΑ αυξάνεται σημαντικά με τα πρωτόκολλα εξισορρόπησης ενέργειας αφού σχεδόν όλοι οι κόμβοι είναι ενεργοί καθόλη τη διάρκεια της ζωής του δικτύου ενώ πεθαίνουν όλοι σχεδόν ταυτόχρονα προς το τέλος της. Υπάρχει πολύ μεγάλη έρευνα για την εξισορρόπηση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ακόμα και σήμερα. Τα πιο σημαντικά πρωτόκολλα εξισορρόπησης ενέργειας παρουσιάζονται παρακάτω:

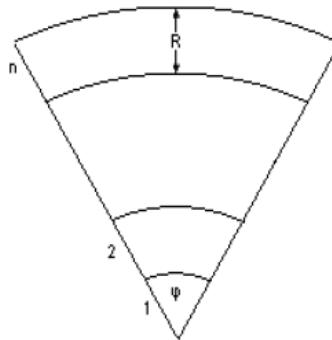
EBP: Το πρωτόκολλο EBP (Energy Balanced Protocol) [39] είναι από τα πρώτα πρωτόκολλα εξισορρόπησης ενέργειας το οποίο έθεσε τις βάσεις του προβλήματος και πρότεινε έναν πιθανοτικό αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, το δίκτυο χωρίζεται σε n δακτύλιους (ή τομείς), πλάτους R ενώ η γωνία που καλύπτει το δίκτυο θεωρείται ότι είναι ϕ όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4.

Για την μετάδοση των πακέτων κάθε κόμβου στον δακτύλιο i χρησιμοποιείται το εξής σχήμα:

- Μετάδωσε το πακέτο στον δακτύλιο $i - 1$ με πιθανότητα p_i
- Μετάδωσε το πακέτο απευθείας στην Πηγή με πιθανότητα $1 - p_i$

Η επιλογή του p_i γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η μέση κατανάλωση ενέργειας κόμβου να είναι ίδια για όλους τους κόμβους στο δίκτυο. Μετά από μία εκτενή

¹διάρκεια ζωής εννοούμε το χρονικό διάστημα μέχρι το δίκτυο να γίνει άχρηστο.



Εικόνα 2.4: Δίκτυο αισθητήρων με n δακτυλίδια, γωνία ϕ και πλάτος δακτυλίου R

ανάλυση οι συγγραφείς καταλήγουν στον παρακάτω τύπο:

$$p_i = \frac{E[f_i]}{E[f_{i+1}] + E[g_{i+1}]}$$

όπου $E[f_i]$ είναι η μέση τιμή των μηνυμάτων που προωθούνται στον δακτύλιο i και

$$E[f_i] = - \sum_{k=1}^{n-i} \frac{\prod_{j=k}^{n-i+1} \alpha(n-j)}{\prod_{j=k}^{n-i} d(n-j)} \cdot \left(\sum_{j=1}^{n-k} (a(j)E[g_j] - \alpha(j+1)E[g_{j+1}]) + \alpha(1) \cdot E[f_1] \right)$$

ενώ $E[g_i]$ η μέση τιμή των μηνυμάτων που παράγονται και καθορίζονται από το δίκτυο.

Κάνοντας την παραδοχή ότι $E[f_i] \approx E[f_{i+1}]$, ότι δηλαδή τα μηνύματα που προωθούνται στον δακτύλιο i είναι περίπου ίσα με τα μηνύματα που προωθούνται στον δακτύλιο $i+1$ τότε δημιουργείται ο εξής κλειστός προσεγγιστικός τύπος για τις πιθανότητες p_i :

$$p_i = \frac{3x}{(i+1)(i-1)}$$

όπου $p_2 = x \in (0, 1)$ είναι παραμετροποίησμη μεταβλητή ενώ $p_1 = 0$.

Όταν το i είναι μεγάλο τότε και η πιθανότητα p_i είναι μεγάλη. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν ένας κόμβος είναι μακριά από την Πηγή τότε είναι καλύτερα να στέλνει βήμα-βήμα (hop by hop) για να αποφύγει να σπαταλήσει μεγάλη ενέργεια για την αποστολή απευθείας στην Πηγή. Αντίθετα, όταν το i είναι μικρό τότε η πιθανότητα p_i είναι μικρή.

Distributed EBP Η εργασία στο [40] είναι μια επέκταση του πρωτοκόλλου EBP. Αρχικά ορίζεται ως μικτή στρατηγική την δυνατότητα κάθε κόμβου να μπορεί να στείλει είτε στον αμέσως επόμενο γείτονά του είτε απευθείας στην Πηγή όπως στο EBP. Αποδεικνύεται ότι οι μικτές στρατηγικές είναι οι βέλτιστες σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη στρατηγική μετάδοσης των πακέτων. Στην συνέχεια κατασκευάζεται ένας τυφλός άμεσης απόκρισης κατανευμένος αλγόριθμος (blind, online distributed algorithm) ο οποίος λύνει το πρόβλημα της εξισορρόπησης της ενέργειας. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής:

- Αρχικά κάθε κόμβος ξέρει όλους τους γείτονές του και την εναπομείνασα ενέργειά τους
- Κάθε κόμβος που θέλει να στείλει ένα πακέτο βρίσκει τον γείτονα με την χαμηλότερη εναπομείνασα ενέργεια έστω n_l
 - Αν η εναπομείνασα ενέργεια του n_l είναι μεγαλύτερη από την εναπομείνασα ενέργεια του κόμβου που θέλει να στείλει το πακέτο τότε το στέλνει στον n_l
 - Αντίθετα αν η εναπομείνασα ενέργεια του n_l είναι μικρότερη τότε ο κόμβος που θέλει να στείλει το πακέτο το στέλνει απευθείας στην Πηγή

Όπως φαίνεται ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μικτή στρατηγική όπως ο EBP, αλλά είναι κατανεμημένος και χρησιμοποιεί μόνο τοπική πληροφορία, σε αντίθεση με τον EBP. Εξομοιώσεις δείχνουν ότι ο αλγόριθμος μπορεί να εξισορροπήσει σχεδόν τέλεια την ενέργεια σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Offline EBP Η εργασίες στα [41] και [42] προσπαθούν να λύσουν το πρόβλημα της εξισορρόπησης ενέργειας από μια διαφορετική σκοπιά. Η πρώτη εργασία εξετάζει την περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής των κόμβων σε ένα δίκτυο το οποίο είναι χωρισμένο σε δακτυλίους όταν ο κάθε κόμβος στέλνει σχεδόν τον ίδιο αριθμό πακέτων στην Πηγή. Αρχικά αποδεικνύεται ότι για να μειωθεί στο ελάχιστο η κατανάλωση της ενέργειας, οι δακτύλιοι θα πρέπει να έχουν το ίδιο πλάτος. Όμως με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ανισόρροπη κατανομή ενέργειας στο δίκτυο. Αντίθετα, αποδεικνύεται, ότι για να υπάρχει εξισορρόπηση ενέργειας, το πλάτος των δακτυλίων μικράνει όσο είναι πιο κοντά στην Πηγή. Στην δεύτερη εργασία μελετάται το ίδιο πρόβλημα όταν υπάρχει μη ομοιόμορφη κατανομή των κόμβων μέσα στο δίκτυο. Αποδεικνύεται ότι η ανομοιόμορφη κατανάλωση ενέργειας είναι μη αναπόφευκτη σε τέτοια είδη δικτύου. Οι συγγραφείς προτείνουν μία υποβέλτιστη λύση στην οποία ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται με γεωμετρικό ρυθμό από τους εξωτερικούς δακτυλίους προς τους εσωτερικούς.

2.2 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης με Κινητούς Κόμβους

Πρόσφατη έρευνα έχει δείξει ότι μπορεί να υπάρξει σημαντική μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας αν μέσα στο δίκτυο αισθητήρων υπάρχουν μικρές μηχανικά κινητές συσκευές, ή κινητή κόμβοι, οι οποίες είναι ικανές να μεταφέρουν δεδομένα από ένα σημείο σε ένα άλλο με μηχανική ενέργεια. Για παράδειγμα ένας κινητός κόμβος ο οποίος μπορεί να μετακινείται μέσα σε όλο την περιοχή του δικτύου, πλησιάζει τους κόμβους αρκετά κοντά προκειμένου οι τελευταίοι να του στείλουν τα δεδομένα τους χωρίς ιδιαίτερο κόστος. Στην συνέχεια, ο κινητός κόμβος συνεχίζει την πορεία του πλησιάζοντας και άλλους κόμβους για τον ίδιο λόγο. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ο κινητός κόμβος, επιστρέφει στην Πηγή προκειμένου να παραδώσει τα δεδομένα του. Πιο ισχυρά μοντέλα υποθέτουν ότι ο κόμβος μπορεί να αποστείλει τα δεδομένα που κατέχει στην Πηγή από οποιοδήποτε σημείο του δικτύου και αν βρίσκεται. Άλλα μοντέλα θεωρούν ότι η ίδια η Πηγή είναι ο κινητός κόμβος. Επίσης στα περισσότερα μοντέλα, η ενέργεια που καταναλώνει ο κινητός κόμβος κατά την κίνησή του δεν εξετάζεται και θεωρείται αμελητέα.

Ωστόσο, αυτή η αρχιτεκτονική σε κάποια ΑΔΑ μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, κυρίως θέματα χρονοκαθυστέρησης(delay). Για παράδειγμα, μια τυπική

ταχύτητα για πολλούς κινητούς κόμβους (για παράδειγμα το NIMs [43], το Packbot [44] και το Robomote[45]) είναι περίπου $0.1 - 1m/s$. Επομένως, θα χρειαστεί περίπου 30 λεπτά για μια κινητή συσκευή να διανύσει $1Km$ για να μαζέψει τις πληροφορίες. Τέτοιο χρόνοι είναι απαγορευτικοί για μερικά δίκτυα αισθητήρων τα οποία απαιτούν πραγματικού χρόνου συλλογή δεδομένων. Σε μερικές εφαρμογές ΑΔΑ όπως είναι η διαχείριση καταστροφών οι κινητοί κόμβοι θα μπορούσαν να μεταφερθούν και από μη επανδρωμένα μικρά αεροσκάφη [46]. Οι τύποι των διαδρομών που ακολουθούν οι κινητοί κόμβοι μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής 4 κατηγορίες:

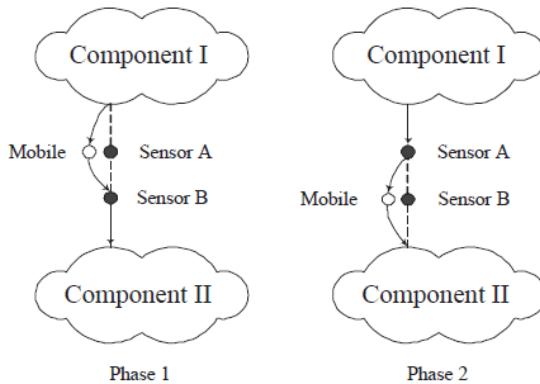
- **Τυχαία κίνηση:** Μπορεί να επιτευχθεί όταν για παράδειγμα οι κόμβοι ενσωματωθούν σε ανθρώπους ή σε ζώα [47]. Γενικώς οι τυχαίοι περίπατοι (random walks) έχει παρατηρηθεί ότι έχουν ούτε καλή αλλά ούτε κακή απόδοση, είναι όμως πάρα πολύ εύκολο να υλοποιηθούν.
- **Ντετερμινιστική κίνηση:** Είδος κίνησης η τροχιά της οποίας είναι προδιαγεγραμμένη από την έναρξη λειτουργίας του δικτύου, όπως είναι ο κύκλος ή η σπείρα. Οι ιδιότητες της κίνησης, όπως π.χ. ακτίνα, εξάγονται από το ίδιο το δίκτυο. Τέτοιες κινήσεις μπορούν να επιτευχθούν όταν για παράδειγμα οι κόμβοι ενσωματωθούν σε ένα λεωφορείο το οποίο κάνει συνεχώς την ίδια διαδρομή. Το πλεονέκτημα αυτής της κίνησης είναι ότι αν είναι γνωστή στους στατικούς κόμβους, αυτοί μπορούν να "ξυπνήσουν" την κατάλληλη στιγμή ώστε να στείλουν τα δεδομένα τους στον κινητό κόμβο.
- **Προσαρμοστική κίνηση:** Αυτή η κίνηση εφαρμόζει τεχνικές αλγορίθμων μάθησης και τροποποιείται κατάλληλα ώστε να ανταποκρίνεται κάθε στιγμή στις απαιτήσεις του δικτύου. Για παράδειγμα σε αν ένα σημείο του δικτύου υπάρχει πολύ μεγάλος ρυθμός παραγωγής γεγονότων, τότε ο κινητός κόμβος κάθεται για περισσότερο διάστημα σε αυτό το σημείο ώστε να ξεκουράσει τους γύρω κόμβους.
- **Ελεγχόμενη κίνηση:** Όταν ο κινητός κόμβος ενσωματωθεί σε ένα τηλεκατευθυνόμενο robot ή αεροπλάνο (UAV) τότε η κατεύθυνση και η ταχύτητα μπορεί να τροποποιηθεί κάθε στιγμή από τον ίδιο τον άνθρωπο. Συνήθως τέτοιες κινήσεις δεν αναλύονται στα μοντέλα ΑΔΑ.

Γενικώς η κίνηση (είτε είναι κινητή Πηγή είτε κινητός κόμβος είτε πολλοί κινητοί κόμβοι) στα σύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιείται εξής λόγους:

- **Βελτίωση της κάλυψης του δικτύου:** Οι κόμβοι συνήθως αναπτύσσονται τυχαία μέσα στην περιοχή ανίχνευσης είτε από τον αέρα (π.χ. από ένα αεροπλάνο/ελικόπτερο) είτε από ένα ρομπότ. Όμως ακόμα και αν θεωρηθεί ότι οι κόμβοι αναπτύσσονται ομοιόμορφα κατανεμημένα, αυτό δεν μπορεί να εγγυηθεί ότι δεν θα υπάρχουν τοπικά μέγιστα και ελάχιστα. Επομένως μπορεί σε κάποιο σημείο του δικτύου να μην καλύπτεται επαρκώς από τους ήδη υπάρχοντες κόμβους. Ένας κινητός κόμβος μπορεί να πάει σε αυτή τη θέση και να προσομοιώσει έναν στατικό κόμβο προκειμένου να καλυφθεί πλήρως η περιοχή ανίχνευσης.
- **Βελτίωση της συνδεσιμότητας του δικτύου:** Οι κινητοί κόμβοι μπορούν να προσφέρουν ένα μονοπάτι ανάμεσα σε δύο συνεκτικές συνιστώσες του δικτύου. Για παράδειγμα μπορεί μερικοί κρίσιμοι κόμβοι να πάθουν βλάβη

και επομένως το δίκτυο να "κοπεί" ουσιαστικά στη μέση. Οι κινητοί κόμβοι μπορούν να αποτρέψουν ένα τέτοιο γεγονός.

- **Μεταφορά δεδομένων από απομακρυσμένους κόμβους:** Μερικοί κόμβοι σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να μην έχουν συνδεσιμότητα με κανέναν άλλο κόμβο και επομένως να μην μπορούν να μεταδώσουν τα δεδομένα τους στην Πηγή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν ένας κινητός κόμβος προσεγγίσει τους απομακρυσμένους κόμβους της Πηγής και λάβει τα αποθηκευμένα δεδομένα των κόμβων αυτών και τα μεταφέρει σε άλλους κόμβους ή στην Πηγή.
- **Αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου:** Αποτελεί από τους πιο σημαντικούς λόγους που χρησιμοποιείται η κίνηση στα δίκτυα αισθητήρων. Οι κινητοί κόμβοι μπορούν να προσεγγίσουν περιοχές στις οποίες υπάρχουν ενεργά μονοπάτια μεταφοράς δεδομένων και να βοηθήσουν αυτούς τους κόμβους μεταφέροντας οι ίδιοι τα δεδομένα μηχανικά. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5: Ο κινητός κόμβος βοηθάει τους υπερφορτωμένους στατικούς κόμβους.

ται στην εικόνα 2.5 (εξαγμένοι από το [48]). Ολόκληρο το δίκτυο αποτελείται από δύο μικρότερα υποδίκτυα (Component I & II) τα οποία είναι συνδεδεμένα μέσω των κόμβων A και B. Επομένως οι δύο αυτοί κόμβοι αποτελούν πέρασμα συμφόρησης αφού πρέπει να προωθούν όλη την κίνηση από τα 2 υποδίκτυα. Ένας κινητός κόμβος μπορεί να προσδοκιώσει την λειτουργία των A και B και έτσι να βελτιώσει τον χρόνο ζωής των κόμβων αυτών και κατά συνέπεια του συνολικού δικτύου. Επίσης οι κινητοί κόμβοι μπορούν να συλλέξουν τα δεδομένα των στατικών κόμβων μέσω μικρής ακτίνας μετάδοσης βοηθώντας στην εξοικονόμηση ενέργειας του κάθε κόμβου ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος ζωής στο δίκτυο, ο κάθε στατικός κόμβος θα πρέπει να στέλνει τα δεδομένα του σε έναν κινητό κόμβο αν και μόνο αν αυτός είναι σε απόσταση μικρότερης του ενός βήματος (hop). Ωστόσο, με αυτόν τον τρόπο υπάρχει πολύ μεγάλη χρονοκαθυστέρηση (delay) στην μεταφορά των δεδομένων στην Πηγή. Από την άλλη μεριά αποστέλλοντας απευθείας στην Πηγή ή χρησιμοποιώντας πολυβηματικά (multi-hop) πρωτόκολλα για την άμεση αναφορά γεγονότων στην Πηγή μειώνει δραστικά την χρονοκαθυστέρηση αλλά και τον χρόνο ζωής

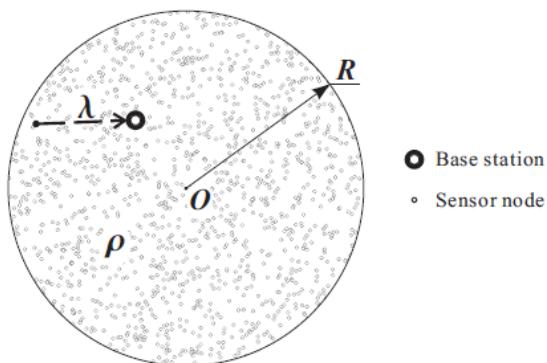
του δικτύου. Επομένως απαιτείται μία χρυσή τομή ανάμεσα στην χρονοκαθυστέρηση και τον χρόνο ζωής του δικτύου που σύγουρα εξαρτάται από τον σκοπό και το περιβάλλον του δικτύου αισθητήρων.

Στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές διαφορετικές έννοιες για την περιγραφή των κινητών κόμβων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι όροι διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το είδος και τον σκοπό του κινητού κόμβου. Για παράδειγμα κινητή Πηγή (mobile Sink ή mobile BS) χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια κινητή Πηγή η οποία έχει την δυνατότητα να περισυλλέγει δεδομένα από τους κοντινούς της κόμβους καθώς κινείται προκειμένου αυτοί να κάνουν πιο οικονομικές μεταδόσεις σε σχέση με μία στατική Πηγή. Παρόμοια ο όρος κινητή οντότητα, ή πιο γενικά, κινητός κόμβος (mobile MULES, mobile entities, mobile relays) αναφέρεται σε κινητούς κόμβους οι οποίοι έχουν παρόμοια υπολογιστική ισχύ όπως μια Πηγή και περιφέρονται σε όλο την περιοχή προκειμένου να περισυλλέξουν δεδομένα. Συχνά σε αυτό το μοντέλο είναι ότι στο ασύρματο δίκτυο υπάρχει και μία Πηγή στην οποία οι κινητοί κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα των στατικών κόμβων.

Επειδή η έρευνα σε αυτό τον τομέα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων συνεχίζεται ακόμα και υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στην πλήρη αξιοποίηση των κινητών κόμβων σε ένα ΑΔΑ, θα παρουσιαστούν παρακάτω οι πιο σημαντικές εργασίες σε σχέση με την εκμετάλλευση κινητών Πηγών και κινητών κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων.

2.2.1 Πρωτόκολλα με Κινητή Πηγή

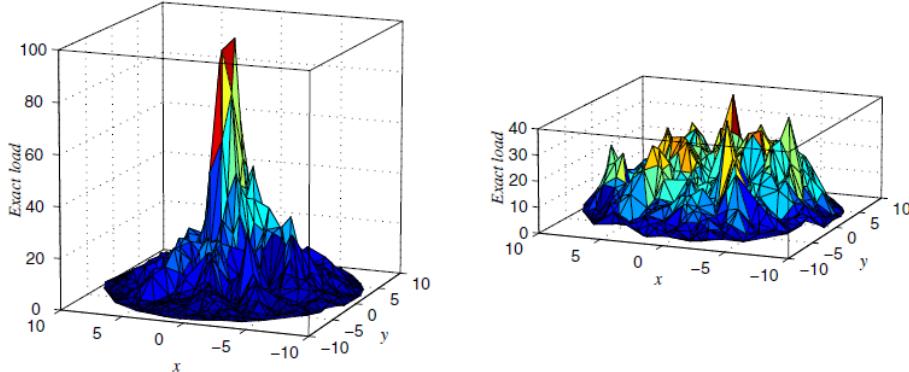
Η εργασία στο [49] εξετάζει αν η κίνηση και η δρομολόγηση σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι φιλικές ή αλληλοσυγκρουόμενες έννοιες. Στο μοντέλο τους εξετάζουν την περίπτωση ενός πυκνού δικτύου στο οποίο υπάρχουν στατικοί κόμβοι, τοποθετημένοι με μια Poisson κατανομή σε έναν κύκλο, έχουν μικρή ενέργεια και μια κινητή Πηγή με άπειρη ενέργεια περιφέρεται στο δίκτυο προκειμένου να βοηθήσει στην δρομολόγηση και να περισυλλέξει τα δεδομένα όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6. Οι συγγραφείς εξετάζουν την βέλτιστη θέση της Πηγής όταν αυτή είναι



Εικόνα 2.6: Κόμβοι τοποθετημένοι με Poisson κατανομή και Πηγή να κινείται στην περιφέρεια του κύκλου.

στατική και την βέλτιστη διαδρομή όταν αυτή είναι κινητή. Τελικά αποδεικνύουν

ότι η βέλτιστη θέση για την Πηγή όταν αυτή είναι στατική είναι το κέντρο του κύκλου. Αντίθετα όταν η Πηγή είναι κινητή αποδεικνύουν ότι η βέλτιστη διαδρομή της Πηγής είναι η περιφέρεια του κύκλου. Αυτό συμβαίνει γιατί η διαδρομή αυτή είναι η μεγαλύτερη δυνατή που υπακούει και στην γεωμετρία του μοντέλου. Μια σύγκριση της εναπομείνασα ενέργειας με τα προαναφερθέντα μοντέλα φαίνονται στην εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Ο ρυθμός κατανάλωσης της ενέργειας όταν η Πηγή είναι στο κέντρο του δικτύου(δεξιά) και όταν η κινείται στην περιφέρειά του(αριστερά).

Όπως φαίνεται στην πρώτη εικόνα η στατική Πηγή δημιουργεί στους γύρω της κόμβους πολύ μεγάλους ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας. Αντίθετα, όταν η Πηγή είναι κινητή και κινείται στην περιφέρεια του κύκλου, υπάρχει μεγαλύτερη εξισορρόπηση ενέργειας στο δίκτυο και επομένως αυξάνεται ο χρόνος ζωής του.

Οι συγγραφείς παρουσίασαν μια ακόμη εργασία στο [50] ως συνέχεια της προηγούμενης στην οποία το μοντέλο είναι παρόμιο με την προηγούμενη εργασία και συγκρίνουν 2 περιπτώσεις για την αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου:

- **Γρήγορη κίνηση της Πηγής:** εξισορρόπηση της χρονοκαθυστέρησης (delay) με την κατανάλωση της ενέργειας
- **Αργή κίνηση της Πηγής:** παροχή βοήθειας στους κρίσιμους κόμβους (bottleneck nodes)

Η αργή κίνηση της Πηγής επιτυγχάνεται μέσα από ένα γραμμικό πρόγραμμα

$$\text{Maximizing network lifetime } T = \sum_i T_i$$

$$\text{Constraints } \sum_i T_i P_i \leq E$$

όπου T_i ο χρόνος ζωής κάθε κόμβου, P_i ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας του κάθε κόμβου ως προς τον χρόνο και E η συνολική ενέργεια του δικτύου. Στην εργασία προτείνεται ένας αλγόριθμος 2 φάσεων ο οποίος χρησιμοποιεί το παραπάνω γραμμικό πρόγραμμα:

- **Αρχικοποίηση:** Κατά την αρχικοποίηση η κινητή Πηγή επισκέπτεται όλους τα σημεία-σταθμούς, συλλέγει τον ρυθμό κατανάλωσης κάθε σταθμού και κατασκευάζει ένα προφίλ αυτού του σημείου-σταθμούς

- **Εν λειτουργία:** Κατά την πραγματική λειτουργία η κινητή Πηγή παραμένει σε κάθε σημείο-σταθμό χρονικό διάστημα ανάλογο με τον ρυθμό κατανάλωσης της ενέργειάς του.

Τα πειράματα αυτής της εργασίας έδειξαν ότι υπάρχει σημαντική αύξηση του χρόνου ζωής με τον αλγόριθμο των 2 φάσεων. Όμως ο αλγόριθμος δεν μπορεί να είναι αποδοτικός και να επεκταθεί σε πολύ μεγάλα δίκτυα καθώς υπάρχει σημαντική καθυστέρηση.

Στην εργασία [51] αναλύεται η περίπτωση που υπάρχει κινητή Πηγή και αυτή κάνει έναν τυχαίο περίπατο (random walk). Γενικώς οι τυχαίοι περίπατοι είναι πολύ εύκολοι στην υλοποίηση αφού χρησιμοποιούν μόνο τοπικές πληροφορίες και μπορούν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση της ενέργειας λόγω της τυχαιότητάς τους. Οι συγγραφείς προκειμένου να κάνουν ακόμα πιο αποδοτικούς τους τυχαίους περιπάτους, δημιουργούν τους προσαρμοστικούς τυχαίους περιπάτους. Σε αυτή την περίπτωση, η κινητή Πηγή εκμεταλλεύεται κάποιες επιπλέον τοπικές πληροφορίες προκειμένου να επηρεάσει το επόμενο βήμα της, το οποίο και πάλι γίνεται πιθανοτικά μόνο που αυτή τη φορά όχι τελείως ομοιόμορφα τυχαία αλλά προς την σωστότερη κατεύθυνση. Στο μοντέλο της εργασίας, η περιοχή του δικτύου χωρίζεται σε κελιά στα οποία μόλις βρεθεί η κινητή Πηγή μέσα σε ένα από αυτά, γνωρίζει την κατάσταση όλων των αισθητήρων που ανήκουν στο ίδιο κελί. Οι συγγραφείς συγκρίνουν διάφορους τύπους τυχαίων περιπάτων:

- **Τυφλός τυχαίος περίπατος:** Σε αυτή την περίπτωση η κινητή Πηγή επιλέγει ομοιόμορφα τυχαία μία από τις 4 κατευθύνσεις που θα ακολουθήσει στο επόμενο βήμα. Αν και πιθανοτικά αυτή η λύση εγγυάται ότι η Πηγή θα φθάσει σε όλους τους κόμβους και όλα τα δεδομένα θα περισυλλεγούν, δημιουργεί σημαντικά προβλήματα χρονοκαθυστέρησης. Για παράδειγμα η κινητή Πηγή μπορεί πολλές φορές να πηγαίνει σε σημεία τα οποία έχει ξαναεπισκεφθεί.
- **Τυχαίος περίπατος με μνήμη:** Σε αυτή την περίπτωση η κινητή Πηγή θυμάται τα τελευταία κελιά τα οποία έχει επισκεφθεί κατά την διάρκεια του τυχαίου περιπάτου της. Κάθε φορά το επόμενο βήμα επιλέγεται τυχαία με βάση τα κελιά τα οποία δεν ανήκουν στα τελευταία. Φυσικά υπάρχει ένας συμβιβασμός (trade off) ως προς το μέγεθος του K . Για παράδειγμα αν το K είναι πολύ μικρό, τότε η κινητή Πηγή ουσιαστικά εκτελεί τυχαίο περίπατο. Αντίθετα αν το K είναι πολύ μεγάλο η κινητή Πηγή μπορεί να βρεθεί σε κάποιο αδιέξοδο όταν για παράδειγμα όλα τα επόμενα δυνατά κελιά τα έχει ήδη επισκεφθεί.
- **Τυχαίος περίπατος με αδράνεια:** Στην περίπτωση αυτή η πιθανότητα κάθε κατεύθυνσης του επόμενου βήματος προσαρμόζεται ανάλογα με την ανακάλυψη νέων κόμβων. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος ενισχύει τις κατευθύνσεις στις οποίες εμφανίζονται καινούργιοι κόμβοι και αποδυναμώνει τις κατευθύνσεις στις οποίες υπάρχουν κόμβοι που ήδη έχουν επισκεφθεί.
- **Τυχαίος περίπατος explore n go:** Σε αυτή την περίπτωση η κινητή Πηγή ακολουθεί μία ευθεία γραμμή (δηλαδή προχωράει ίσια) όσο βρίσκει καινούργιους κόμβους και αλλάζει κατεύθυνση αν βρεθούν κόμβοι που έχουν επισκεφθεί ή φθάσει στην άκρη του δικτύου. Ο τυχαίος περίπατος αυτός έχει παρόμοια απόδοση με τον τυχαίο περίπατο με αδράνεια.

- **Κατσαρός (curly) τυχαίος περίπατος:** Ο τυχαίος περίπατος αυτός παρομοιάζει την ντετερμινιστική σπείρα. Συγκεκριμένα η κινητή Πηγή ξεκινάει από μια περιοχή και εκτελεί αριστερές στροφές οι οποίες μεγαλώνουν με τον χρόνο. Μετά από αρκετό διάστημα, ο τυχαίος περίπατος θα έχει καλύψει όλο το δίκτυο.

Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι οι προσαρμοστικοί τυχαίοι περίπατοι κινητών Πηγών έχουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την περισυλλογή των δεδομένων από τους κόμβους σε σχέση με τους τυχαίους περιπάτους.

Στην εργασία [52] αναλύεται η βέλτιστη τοποθεσία μιας κινητής Πηγής σε πολυ-βηματικά (multi-hop) δίκτυα αισθητήρων. Συγκεκριμένα οι συγγραφείς αναπτύσσουν αρχικά έναν καθολικό αλγόριθμο μέσα από γραμμικό προγραμματισμό. Αποδεικνύουν ότι το βέλτιστο σημείο στο οποίο θα πρέπει να πάει μια κινητή Πηγή, προκειμένου να υπάρχει μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας, είναι αυτό στο οποίο το άθροισμα όλων των διανυσμάτων κόμβου-Πηγής ισούται με το 0. Ουσιαστικά πρόκειται για το γεωμετρικό κέντρο. Επειδή ο αλγόριθμος αυτός απαιτεί καθολικά (global) δεδομένα, οι συγγραφείς προτείνουν έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί τοπικά δεδομένα αλλά πετυχαίνει σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα με τον καθολικό αλγόριθμο. Στον τοπικό αλγόριθμο, κάθε κόμβος κρατάει στη μνήμη του τον αριθμό των μονοπατιών τα οποία έχουν δημιουργηθεί από το πρωτόκολλο δρομολόγησης και περνάνε από μέσα του. Με αυτόν τον τρόπο η κινητή Πηγή χρειάζεται τα δεδομένα μόνο των πρώτων γειτόνων της οι οποίοι θα έχουν σίγουρα αριθμό μονοπατιών μεγαλύτερο από τους πιο μακρινούς γείτονές της. Οι αριθμοί αυτοί προσομοιώνουν τα διανύσματα αποστάσεων που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Έτσι, αν ας κόμβος έχει μεγάλο αριθμό μονοπατιών, η Πηγή κινείται προς αυτό το σημείο προκειμένου να "ξεκουράσει" τον κόμβο. Στην εργασία αυτή, οι συγγραφείς μελετάνε και την περίπτωση πολλών κινητών Πηγών.

2.2.2 Πρωτόκολλα με Κινητούς Κόμβους

Όπως και στην περίπτωση της μιας κινητής Πηγής στο δίκτυο αισθητήρων έτσι και στην περίπτωση πολλών κινητών Πηγών-κόμβων υπάρχει πολύ μεγάλη έρευνα. Αν και σε πολλές εργασίες απλά επεκτείνεται η λογική της μιας κινητής Πηγής σε πολλές, η σωστή κατανομή των Πηγών καθώς και ο σωστός αριθμός των Πηγών αποτελούν χαρακτηριστικά προς έρευνα.

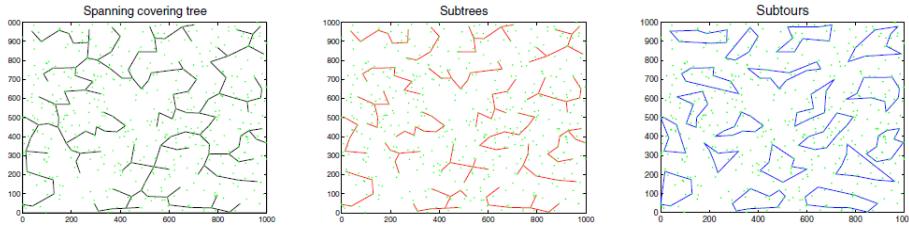
Η εργασία στο [53] αποτελεί σημείο αναφοράς για τα δίκτυα αισθητήρων με κινητούς κόμβους. Στο μοντέλο θεωρείται ένα ΑΔΑ τριών επιπέδων. Στο κάτω επίπεδο βρίσκονται οι στατικοί κόμβοι οι οποίοι επιβλέπουν το περιβάλλον. Στο αιμέσως από πάνω επίπεδο βρίσκονται οι κινητοί κόμβοι οι οποίοι επισκέπτονται τους στατικούς κόμβους προκειμένου να συλλέξουν πληροφορίες. Τέλος στο ανώτερο επίπεδο βρίσκονται τα σημεία πρόσβασης (ΣΠ ή access points) τα οποία ουσιαστικά αποτελούν Πηγές στις οποίες παραδίδονται όλα τα δεδομένα των κινητών κόμβων. Επίσης θεωρείται ότι οι κινητοί κόμβοι θα πρέπει να φτάσουν σε απόσταση ενός βήματος (1-hop) ώστε να μπορούν να επικοινωνήσουν με άλλους κόμβους ή σημεία πρόσβασης. Για την ανάλυση της απόδοσης, το δίκτυο χωρίζεται σε πλέγματα. Στην συνέχεια αποδεικνύεται ότι αν ρ_{AP} είναι η πυκνότητα των σημείων πρόσβασης, η μέση τιμή του χρόνου που χρειάζεται ένας κινητός κόμβος να ξεκινήσει από ένα σημείο πρόσβασης και να ξανακαταλήξει σε αυτό ή σε ένα άλλο κάνοντας τυχαίο περίπατο είναι $\frac{1}{\rho_{AP}}$. Επίσης, αποδεικνύεται ότι ο μέσος χρόνος που χρειάζεται να συναντήσει ένας κινητός κόμβος έναν τυχαίο στα-

τικό κόμβο είναι ρ_{MULES} όπου ρ_{MULES} είναι η πυκνότητα των κινητών κόμβων στο δίκτυο. Αντίστοιχα αποτελέσματα αποδεικνύονται για την πρώτη επίσκεψη (hitting time) και την ποσότητα δεδομένων που αποθηκεύονται στη μνήμη των κόμβων αλλά και τον λόγο επιτυχίας των μηνυμάτων. Φυσικά όλα τα αποτελέσματα αναφέρονται σε μέσες τιμές και προκειμένου να υπάρχει συγκέντρωση γύρω από την μέση τιμή θα πρέπει να εφαρμοστούν μέθοδοι που βασίζονται σε ροπές δεύτερης τάξης. Ωστόσο, η ανάλυση που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία αποτελεί ένα καλό βοήθημα για την κατανόηση παρόμοιων μοντέλων.

Στην εργασία [54] αναλύεται το πρόβλημα της τοποθέτησης κινητών κόμβων οι οποίοι θα λειτουργούν ως αρχηγοί σε συστάδες. Στο μοντέλο τους, παρουσιάζουν μια αρχιτεκτονική τριάνταν επιπλέων στην οποία στη βάση υπάρχουν οι στατικοί κόμβοι, μετά υπάρχουν οι κινητοί κόμβοι και τέλος υπάρχει η Πηγή. Θεωρούν ότι οι κινητοί κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους και με την Πηγή ώστε να της αποστείλουν τα τελικά δεδομένα. Αφού δείξουν ότι το πρόβλημα τοποθέτησης των κινητών κόμβων στο δίκτυο ώστε να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος ζωής του δικτύου είναι NP-hard (κάνοντάς το αναγωγή στο k-center πρόβλημα) παρουσιάζουν έναν ευρετικό αλγόριθμο που λύνει το πρόβλημα αυτό σχετικά γρήγορα. Ο ευρετικός αλγόριθμος βασίζεται στην κατασκευή ενός χάρτη των ενεργειών των κόμβων της συστάδας μέσα από πληροφορίες των κόμβων της ίδιας της συστάδας.

Η εργασία στο [55] ακολουθεί μοντέλο παρόμοιο με την προηγούμενη. Οι συγγραφείς αναλύουν αρχικά από τι εξαρτάται ο χρόνος ζωής ενός δικτύου και στην συνέχεια βασιζόμενοι στην ανάλυσή τους προτείνουν έναν υβριδικό αλγόριθμο. Όπως αποδεικνύουν ο χρόνος του δικτύου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι πιο σημαντικοί από τους οποίους είναι: από την αρχική του ενέργεια, τον ρυθμό που παράγονται οι πληροφορίες, το μέγεθος του δικτύου, την ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου αλλά και ενεργειακοί παράγοντες που αφορούν τα κυκλώματα του κάθε κόμβου για την λειτουργία των κυκλωμάτων. Παρουσιάζουν 2 στρατηγικές για τις κινητές Πηγές που μπορούν να υπάρξουν. Στην πρώτη η κάθε κινητή Πηγή πηγαίνει στο σημείο μικρότερης ενέργειας της συστάδας της. Το πλεονέκτημα αυτής της στρατηγικής είναι ότι δημιουργείται ένα πλήρως ενεργειακά ομοιόμορφο δίκτυο και επομένως αυξάνεται ο χρόνος ζωής του. Στην δεύτερη στρατηγική η κάθε κινητή Πηγή πηγαίνει ακριβώς στο σημείο που παράγεται ένα γεγονός. Σε αυτή την περίπτωση η κινητή Πηγή λαμβάνει άμεσα τα δεδομένα από το γεγονός, το οποίο στο μοντέλο διαρκεί αρκετό χρονικό διάστημα, έτσι ώστε τα δεδομένα δεν στέλνονται στους υπόλοιπους κόμβους και επομένως χάνεται ελάχιστη ενέργεια για την μεταφορά αυτών. Όμως η στρατηγική αυτή δημιουργεί ανομοιογενή κατανομή ενέργειας στο δίκτυο. Ο υβριδικός αλγόριθμος που παρουσιάζουν οι συγγραφείς συνενώνει τις 2 στρατηγικές. Πειράματα έδειξαν σημαντική βελτίωση του χρόνου ζωής του δικτύου.

Στην εργασία στο [56] αναλύεται ξανά η βέλτιστη τοποθέτηση των κινητών Πηγών οι οποίες λειτουργούν ως αρχηγοί συστάδων όπως στο [54] αλλά αυτή τη φορά οι συγγραφείς στοχεύουν στην αποδοτική περισυλλογή δεδομένων. Αφού αποδείξουν ότι το πρόβλημα αυτό είναι NP-hard με αναγωγή στο TSP πρόβλημα, παρουσιάζουν τον αλγόριθμό τους ο οποίος αποτελείται από 3 βήματα και παρουσιάζεται στην εικόνα 2.8. Αφού κατασκευαστεί κατανεμημένα ένα ελάχιστο γεννητικό δέντρο με όλους τους κόμβους, το δέντρο αυτό αποσυντίθεται σε μικρότερα ελάχιστα γεννητικά δέντρα, όσες και οι κινητές Πηγές και αναζητείται σε κάθε τέτοιο δέντρο το μικρότερο μονοπάτι το οποίο επισκέπτεται όλους τους κόμβους. Οι κινητές Πηγές στέλνουν τα δεδομένα τους στην κύρια Πηγή χρησι-



Εικόνα 2.8: Τα 3 βήματα του αλγορίθμου.

μοποιώντας της υπόλοιπες κινητές Πηγές. Πειράματα έδειξαν ότι εξοικονομείται σημαντικό ποσό της ενέργειας.

Η εργασία στο [44] εξετάζει το πρόβλημα από μια διαφορετική σκοπιά. Οι συγγραφείς αρχικά επισημάνουν ότι το πρόβλημα με τις κινητές Πηγές ουσιαστικά πρόκειται για την δρομολόγηση κινητών με χρονικές προθεσμίες οι οποίες καθορίζονται από τον χώρο μνήμης ενός κόμβου ή πιο αφαιρετικά από το μέγιστο μέγεθος των δεδομένων κάθε κόμβου θα κρατάει πριν τα παραδώσει στην Πηγή. Έποι αυτή την έννοια το πρόβλημα είναι λίγο διαφορετικό από το TSP πρόβλημα με την έννοια ότι η κάθε κινητή Πηγή μπορεί να χρειαστεί να επισκεφθεί περισσότερες από μια φορά έναν κόμβο ανάλογα με τον ρυθμό παραγωγής των γεγονότων σε εκείνη την περιοχή. Αφού αποδείξουν ότι το πρόβλημα είναι NP-complete κατασκευάζουν 3 ευρετικούς αλγορίθμους.

- **Νωρίτερη προθεσμία πρώτα:** σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος επισκέπτεται πρώτα τον κόμβο του οποίου ο χώρος μνήμης είναι πιο κοντά να ξεχειλίσει. Το πρόβλημα με αυτόν τον ευρετικό αλγόριθμο είναι ότι δεν παίρνει υπόψιν του καθόλου το κόστος του κάθε κόμβου για να τον επισκεφθεί, δηλαδή την απόστασή του από την τωρινή θέση της κινητής Πηγής.
- **Νωρίτερη προθεσμία με k -κόμβους μπροστά:** σε αυτή την περίπτωση η κινητή Πηγή ταξινομεί τις προθεσμίες όλων των κόμβων και επιλέγει τις k μικρότερες. Στη συνέχεια, επιλέγει την σειρά με την οποία θα επισκεφθεί τους k αυτούς κόμβους έτσι ώστε καμία προθεσμία να μην χαθεί και ταυτόχρονα η συνολική διαδρομή, δηλαδή ο χρόνος που θα χρειαστεί, να είναι η μικρότερη δυνατή.
- **Ελάχιστο ζυγισμένο άθροισμα πρώτα:** σε μία προσπάθεια να εξισορροπήσουν το κόστος απόστασης με την χρονική προθεσμία οι συγγραφείς δημιουργήσαν αυτόν τον υβριδικό ευρετικό αλγόριθμο. Δηλαδή δημιουργούν το διάνυσμα

$$\text{weighted_sum}[i] = \alpha_{mwsf} (\text{deadline}[i] - \text{current_time}[i]) + (1 - \alpha_{mwsf}) (\text{cost}[\text{current_position}][i])$$

και επιλέγουν τον κόμβο που έχει την μικρότερη τιμή.

Στην συνέχεια συγκρίνουν τους αλγορίθμους αυτούς με έναν αρκετά γνωστό ευρετικό αλγόριθμο ο οποίος προέρχεται από την δρομολόγηση οχημάτων [57]. Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

1. Ξεκινάει με ένα όχημα και έναν κόμβο ο οποίος είναι ο πρώτος στην διαδρομή του

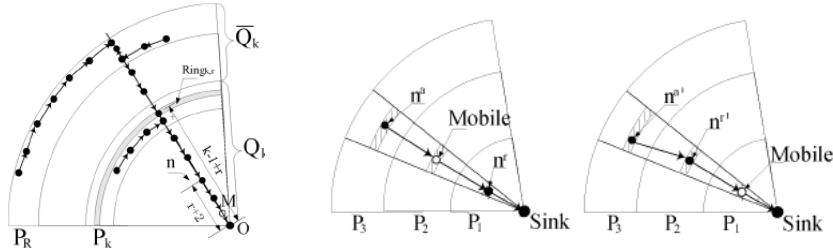
2. Στην συνέχεια βρίσκει τον καλύτερο κόμβο που μπορεί να εισέλθει στην διαδρομή του

- Αυτό συνεχίζεται μέχρι κανένας νέος κόμβος να μην μπορεί να εισέλθει λόγω περιορισμών στις προθεσμίες

3. Ο αλγόριθμος τότε προσθέτει ένα νέο όχημα και η διαδικασία συνεχίζεται παρόμοια για το νέο όχημα

Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να εφαρμοστεί και για την δρομολόγηση των κινητών Πηγών σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αφού τα 2 προβλήματα είναι παρόμοια.

Μια διαφορετική, ριζοσπαστική προσέγγιση εμφανίστηκε στην εργασία [58]. Καταρχήν, το μοντέλο της εργασίας υποθέτει έναν κύκλο ακτίνας R μέσα στον οποίο τοποθετούνται ομοιόμορφα κατανεμημένα N κόμβοι. Επίσης όλοι ο κόμβοι οι οποίοι είναι 2-βήματα ή 1-βήμα (2-hop ή 1-hop) μακριά από την στατική Πηγή ανήκουν στο σύνολο G . Στην εργασία αυτή οι συγγραφείς εκμεταλλεύονται τους κόμβους που ανήκουν στο G "καίγοντάς" τους μέσα από έναν κινητό κόμβο. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.9β' ο κινητός κόμβος αντικαθιστά κάθε φορά



Εικόνα 2.9: Η διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα (α') και ο τρόπος που εκμεταλλεύεται τους 2-hop γείτονες της στατικής Πηγής ο κινητός κόμβος (β').

έναν κόμβο από αυτούς που είναι 2-βήματα ή 1-βήμα μακριά και χρησιμοποιεί τον άλλον (ο οποίος βρίσκεται πάνω στην ακτίνα που σχηματίζεται από τον κινητό κόμβο και την στατική Πηγή έστω r) μέχρι να του εξαντλήσει τελείως την ενέργειά του. Κάθε φορά που ο κινητός κόμβος επιλέγει έναν νέο κόμβο $u_i \in G$ τότε όλοι οι κόμβοι οι οποίοι ανήκουν στην ακτίνα r λαμβάνουν όλα τα πακέτα από όλους του κόμβους που ανήκουν στο ίδιο δακτύλιο. Δηλαδή οι κόμβοι που ανήκουν σε έναν δακτύλιο στέλνουν τα πακέτα τους πάνω από αυτόν δακτύλιο μέχρι να φτάσουν στον κόμβο που ανήκει στην ακτίνα r όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.9α'. Οι συγγραφείς αποδεικνύουν αναλυτικά ότι με αυτό το σχήμα το δίκτυο μπορεί να έχει χρόνος ζωής $T > 4\frac{E}{R^2e} - \frac{16E}{R^4e}$ δεδομένου ότι για την ακτίνα του δικτύου R ισχύει $R > 16\pi + 4$. Χρησιμοποιώντας την ίδια λογική αποδεικνύεται ότι για τη κινητούς κόμβους (οι οποίοι εκμεταλλεύονται 2 m στατικούς κόμβους πάνω στην ακτίνα r) ο χρόνος ζωής του δικτύου φράσσεται από την σχέση:

$$T > 4m \frac{E}{R^2e} - \frac{32\pi m^3 E}{R^4e} \quad \text{αν η ακτίνα } R \text{ είναι αρκετά μεγάλη}$$

Τα πειράματα αυτής της εργασίας έδειξαν ότι ο χρόνος ζωής αυξάνεται σημαντικά και επαληθεύονται τα προηγούμενα θεωρητικά αποτελέσματα. Όπως έγινε

εμφανές η εργασία αυτή ακολουθεί μια διαφορετική λογική από τις υπόλοιπες σχετικές εργασίες το οποίο την κάνει ξεχωριστή.

Μια επίσης διαφορετική εργασία στο [59]. Στην εργασία αυτή θεωρείται ένα υβριδικό δίκτυο αισθητήρων το οποίο αποτελείται από κινητούς κόμβους και στατικούς κόμβους. Στο μοντέλο θεωρείται ότι οι κινητοί κόμβοι έχουν πολύ περισσότερη ενέργεια από τους στατικούς, ο χρόνος χωρίζεται σε γύρους και η εργασία επικεντρώνεται στην κατάλληλη διαχείριση των κινητών κόμβων σε έναν γύρο. Να σημειωθεί ότι αποτελεί από τις λίγες εργασίες που παίρνει υπόψιν στο μοντέλο της και στοχεύει στην μείωση της κατανάλωσης την ενέργεια που σπαταλάται για την κίνηση ενός κινητού κόμβου. Οι συγγραφείς προτείνουν αρχικά έναν καθολικό (centralized) αλγόριθμο και στην συνέχεια έναν κατανεμημένο αλγόριθμο. Ο κατανεμημένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια διαφορετική προσέγγιση για να λύσει το πρόβλημα της δρομολόγησης των κινητών κόμβων. Αρχικά η περιοχή του δικτύου χωρίζεται σε ένα πλέγμα (grid) και κάθε κελί εκλέγει έναν στατικό κόμβο ως αρχηγό. Ο χρόνος χωρίζεται περαιτέρω σε 3 διαφορετικές φάσεις ενός γύρου:

- **Φάση διάδοσης:** Αρχικά ο αρχηγός κάθε κελιού μέσα στο πλέγμα συλλέγει τις τοποθεσίες των γεγονότων από τους στατικούς αισθητήρες. Επίσης συλλέγει τις αναφορές (τοποθεσία, ενέργεια) των κινητών κόμβων. Στην συνέχεια η ύπαρξη των κινητών κόμβων διαφημίζεται από τα κελιά που τους περιέχουν.
- **Φάση διαγωνισμού:** Κάθε κελί του πλέγματος που περιέχει ένα γεγονός (και επομένως πρέπει να έρθει ένας κινητός κόμβος για να το συλλέξει) διαγωνίζεται με όλα τα άλλα αντίστοιχα κελιά για τους κινητούς κόμβους χρησιμοποιώντας προσκλήσεις. Ο κάθε κινητός κόμβος αποδέχεται ή απορίπτει μια πρόσκληση ανάλογα με τα δεδομένα της πρόσκλησης όπως π.χ. η απόσταση του γεγονότος από τη θέση του κινητού κόμβου.
- **Φάση δρομολόγησης:** Ο κάθε κινητός κόμβος αφού έχει επιλέξει μια σειρά από κελιά τότε εκτελεί την διαδρομή του χρησιμοποιώντας προσεγγιστικό αλγόριθμο του προβλήματος TSP.

Αποδεικνύεται ότι η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι $O(m \cdot \hat{M} + n \cdot \hat{N} + m^2 h)$ όπου m, n οι κινητοί και στατικοί κόμβοι αντίστοιχα, \hat{M}, \hat{N} οι διαστάσεις του πλέγματος και h η διάμετρος του δικτύου. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου.

2.3 Εναλλακτικές Τεχνικές

Εκτός από τους αλγόριθμους δρομολόγησης υπάρχουν και άλλες τεχνικές που έχουν μελετηθεί με σκοπό την επέκταση του χρόνου ζωής ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Έχουν μελετηθεί τεχνικές που έχουν να κάνουν με αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας όπως είναι η ηλιακή ενέργεια ή η τεχνητή θεωρούν πιο ισχυρά μοντέλα όπως η πρόσθεση επιπλέον κόμβων σε ένα δίκτυο εκεί που χρειάζεται. Τέλος παρουσιάζεται μια νέα πρωτοπόρα ριζοσπαστική τεχνική, αυτή της ασύρματης φόρτισης, η οποία αναλύεται εκτενέστερα στο κεφάλαιο 3.

2.3.1 Τεχνικές εναλλακτικών πηγών ενέργειας

Οι τεχνικές αυτές ασχολούνται με την αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας (energy harvesting) προκειμένου να φορτίσουν τους στατικούς κόμβους που επιβλέπουν το περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια αυτές οι τεχνικές έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη και έχουν ενσωματωθεί επιτυχημένα σε συστήματα ΑΔΑ. Υπάρχει ποικιλία διαφορετικών ενέργειών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση ζωής του δικτύου όπως μηχανική, θερμική και ηλιακή ενέργεια κάθε μία από τις οποίες μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική και να ενεργοποιήσει τους κόμβους ή απλώς να επαναφορτίσει τις μπαταρίες τους. Η πιο πολυχρησιμοποιούμενη είναι η ηλιακή ενέργεια. Για την ηλιακή ενέργεια ο ρυθμός επαναφόρτισης ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\pi_r = Rad_s \times \eta_\rho \times \rho_e \times A$$

όπου το Rad_s αντιστοιχεί στην ηλιακή ακτινοβολία, το η_ρ αντιστοιχεί στην αποδοτικότητα του ηλιακού συλλέκτη να μετατρέψει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, το ρ_e αντιστοιχεί στην απόδοση του ηλεκτρικού κυκλώματος και το A αντιστοιχεί στο μέγεθος του ηλιακού συλλέκτη.

Ωστόσο καθώς όλες αυτές οι εναλλακτικές ενέργειες προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον οι χωροχρονικοί χαρακτήρες τους έχουν μεγάλες διακυμάνσεις όσον αφορά την απόδοση τους η οποία συνήθως είναι χαμηλή και ευαίσθητη στην δυναμική του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα βασισμένο στην ηλιακή ενέργεια, η ισχύς εξόδου του η οποία θα τροφοδοτήσει έναν αισθητήρα καθορίζεται από τις ηλιακές ακτίνες που προσάπτονται εκείνη την στιγμή στους ηλιακούς συλλέκτες και μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με την ώρα και τον καιρό. Στατιστικές έχουν δειξει ότι υπάρχει διαφορά μέχρι και 3 τάξεις μεγέθους στην διαθέσιμη ενέργεια ανάμεσα σε μια σκιώδη, συννεφιασμένη και ηλιόλουστη μέρα [60]. Καθώς δεν υπάρχει γενικά τρόπος να γνωρίζει εξαρχής κανείς την κατάσταση που θα υπάρχει στο δίκτυο αισθητήρων υπάρχει μεγάλη δυσκολία στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων που εκμεταλλεύονται τέτοιες μορφές ενέργειας και να κρατάνε τους κόμβους πάντα ενεργούς. Αυτό όμως είναι πολύ δύσκολο ειδικά σε εφαρμογές στις οποίες το κύριο έργο είναι να συλλέγουν περιοδικά δεδομένα και πληροφορίες από όλους τους κόμβους. Στην περίπτωση που κάποιοι αισθητήρες καταναλώσουν όλη την ενέργεια τους και δεν επαναφορτιστούν γρήγορα, το δίκτυο σταδιακά θα καταρρεύσει. Υπάρχουν όμως πρωτόκολλα που ρυθμίζουν τις λειτουργίες του κάθε κόμβου ανάλογα με την κατάσταση που επικρατεί στο εξωτερικό του περιβάλλον και παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Μία από τις πρώτες εργασίες παρουσιάζεται στο [61]. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα σύστημα του οποίου οι κόμβοι έχουν ηλιακούς συλλέκτες και μπορούν να φορτίζονται από την ηλιακή ενέργεια όπως φαίνεται στην εικόνα 2.10. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα μπορεί να επιμηκύνει το χρόνο ζωής του συλλέγοντας ενέργεια από τον ήλιο. Επιπλέον στην εργασία προτείνεται ένας εναλλακτικός τρόπος δρομολόγησης των πακέτων. Συγκεκριμένα, τα πακέτα δρομολογούνται μέσα από μονοπάτια τα οποία έχουν το μεγαλύτερη συλλογή ηλιακής ενέργειας. Επίσης κόμβοι οι οποίοι έχουν μικρή συλλογή ηλιακής ενέργειας (π.χ. είναι κάτω από ένα δέντρο) τότε μειώνουν τον φόρτο εργασίας τους εσκεμμένα. Υπάρχει επομένως εξισορρόπηση της ενέργειας του δικτύου.

Στην εργασία [62] μελετάται η περίπτωση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων στο οποίο υπάρχει πλεονασμός κόμβων οι οποίοι μπορούν να επαναφορτιστούν. Η εργασία αναλύει το πρόβλημα του πως οι κόμβοι θα έπρεπε να ενερ-



Εικόνα 2.10: Ένας κόμβος του συστήματος *Heliomote*.

γοποιούνται δυναμικά έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η κάλυψη του δικτύου. Αφού δειχθεί η βέλτιστη λύση, στην συνέχεια προτείνεται μια κατανεμημένη πολιτική ενεργοποίησης η οποία επιτυγχάνει το $\frac{3}{4}$ της βέλτιστης λύσης ενώ παρέχονται προσιμοιώσεις που επιβεβαιώνουν τα θεωρητικά αποτελέσματα.

Στην εργασία [63] αναλύεται η απόδοση πολυ-βηματικών (multi-hop) μεταδόσεων στην περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα επαναφόρτισης ορισμένων κόμβων. Στην συνέχεια σχεδιάζεται ένας αλγόριθμος ο οποίος λαμβάνει υπόψιν του την αναπλήρωση ενέργειας των κόμβων και προωθεί τα πακέτα προς αυτούς τους κόμβους ο οποίος είναι ασυμπτωτικά βέλτιστος σε αντιστοιχία με το μέγεθος του δικτύου. Ο αλγόριθμος δεν θεωρεί κάποια στατιστική πληροφορία όσον αφορά την άφιξη των πακέτων και επομένως μπορεί να ενσωματωθεί σε ίδη υπάρχοντα σχήματα δρομολόγησης (προληπτικά ή κατ' απάτηση). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώσαν ότι ο αλγόριθμος πετυχαίνει να μεγιστοποιήσει την απόδοση σε ενέργειακά (energy-aware) δίκτυα.

Στις εργασίες [64] [65] αναλύεται ξανά η βέλτιστη δειγματοληψία των κόμβων κάτω από τους περιορισμούς των εναλλακτικών ενεργειών όπως είναι η φωτεινότητα στην ηλιακή ενέργεια. Σε κάθε περίπτωση προτείνεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος ο οποίος ρυθμίζει κατάλληλα τον ρυθμό δειγματοληψίας του κάθε κόμβου και λύνει το πρόβλημα αποδοτικά. Τέλος εκτελούνται προσομοιώσεις που αποδεικνύουν την απόδοση του εκάστοτε αλγορίθμου.

2.3.2 Τεχνικές αύξησης των κόμβων του δικτύου

Στην τεχνική αυτή υπάγονται εργασίες οι οποίες αναλύουν την βέλτιστη κατανομή των κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και εργασίες που προτείνουν αποδοτικούς τρόπους για την αισθητάσταση κόμβων του δικτύου οι οποίοι έχουν χάσει πλήρως την ενέργεια τους. Στην πρώτη περίπτωση εκτελείται ένας προληπτικός αλγόριθμος (offline algorithm) ο οποίος βρίσκει την βέλτιστη ανάπτυξη των αισθητήρων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Στη δεύτερη περίπτωση εκτελούνται αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης (online algorithms) οι οποίοι αφού αναλύουν την κατάσταση του δικτύου, βρίσκουν το βέλτιστο υποσύνολο του δικτύου το οποίο θα πρέπει να αισθητάσθει ή να προστεθούν επιπλέον κόμβοι.

Στην εργασία [4] οι συγγραφείς αναλύουν την περίπτωση όπου οι κόμβοι δεν τοποθετούνται ομοιόμορφα κατανεμημένα αλλά με βάση την Gaussian κατανομή σε δισδιάστατο χώρο. Στην συνέχεια εντοπίζουν κάτω από ποιες συγκεκριμένες

υποθέσεις και ιδιότητες της Gaussian κατανομής μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή κάλυψη και διάρκεια ζωής του δικτύου. Αφού αναλύσουν τις στρατηγικές ανάπτυξης των κόμβων προτείνουν 2 αλγόριθμους ανάπτυξης των κόμβων οι οποίοι αυξάνουν σημαντικά τον χρόνο ζωής του δικτύου.

Η εργασία στο [66] εισάγει για πρώτη φορά στο μοντέλο των ΑΔΑ την έννοια της πρόσθεσης ή αντικατάστασης κόμβων του δικτύου ενώ ενσωματώνει στο μοντέλο την έννοια της ετερογένειας, της ύπαρξης δηλαδή διαφορετικών κόμβων ως προς τις δυνατότητές τους. Με τις προαναφερθείσες παραδοχές αυξάνεται σημαντικά η δυναμικότητα του δικτύου που μελετάται και οι συγγραφείς διαπιστώνουν ότι ο μόνος τρόπος για την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας είναι μέσα από αλγόριθμους μάθησης. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς αναπτύσσουν έναν κατανεμημένο αλγόριθμο ελαχιστοποίησης της ενέργειας ο οποίος χρησιμοποιεί τοπικές πληροφορίες όπως για παράδειγμα πυκνότητα και ενέργεια του δικτύου σε μια τοπική περιοχή και ρυθμίζει κατάλληλα την πολιτική ύπνου (sleeping policy) των κόμβων. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι με αυτόν τον τρόπο διπλασιάζεται σχεδόν ο λόγος επιτυχίας σε σύγκριση με το Directed Diffusion ενώ μαζί με την προσθήκη ετερογενών κόμβων σε κατάλληλα σημεία του δικτύου ο λόγος επιτυχίας αυξάνεται ακόμα περισσότερο με παρόμοια ενεργειακή συμπεριφορά.

Η εργασίες στα [67] [68] μελετάνε την περίπτωση ενός δικτύου το οποίο λειτουργεί για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Για να λύσουν το πρόβλημα που δημιουργείται από τους περιορισμένους πόρους ενέργειας που έχει ο κάθε κόμβος προτείνουν μια στρατηγική αντικατάστασης και ανάκτησης των παλιών κόμβων με καινούργιους. Για την υλοποίηση της ιδέας χρησιμοποιείται ένα μηχανικά κινούμενο ρομπότ το οποίο έχει την ικανότητα να αντικαθιστά τους κόμβους του δικτύου. Το ρομπότ αυτό περιοδικά διασχίζει την περιοχή του δικτύου και εγκαθιστά καινούργιους κόμβους ενώ επιστρέφει τους παλιούς κόμβους στην βάση για επαναφόρτηση.

2.3.3 Τεχνικές επαναφόρτισης κόμβων

Η πρόσφατη πρόοδος στις περιοχές των υλικών που χρησιμοποιούνται για τις μπαταρίες αλλά και στην περιοχή της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας προσφέρουν νέες δυνατότητες διαχείρισης της διαθέσιμης ενέργειας. Στην πρώτη περιοχή ανακαλύφθηκε ένα νέο υλικό για μπαταρίες το οποίο επιτρέπει πολύ γρήγορες φορτίσεις και αργές αποφορτίσεις [69]. Η ανακάλυψη αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των κλασικών *Li – ion* μπαταριών και των υπερ-πυκνωτών χρησιμοποιώντας την τεχνολογία *LiFePO₄* επιτρέποντας φορτίσεις μέχρι και 400C¹. Στη δεύτερη περιοχή η τεχνολογία γύρω από την ασύρματη μετάδοση ενέργειας έχει εξελιχθεί τόσο πολύ που πλέον τα ποσοστά επιτυχίας έχουν ανέβει σημαντικά. Οι εργασίες στα [70], [71], [72] δείχνουν ότι μπορεί να υπάρξει μέχρι και 60% απόδοση στην μεταφορά ενέργειας. Ταυτόχρονα η Intel® δείχνει μέχρι και 75% απόδοση [73] ενώ η εταιρεία Witricity® ισχυρίζεται ότι μπορεί να επιτύχει μεταφορά ενέργειας με ποσοστό επιτυχίας μέχρι και 90% [74]. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει οδηγήσει σε έναν καινούργιο κλάδο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων: τα ασύρματα επαναφορτιζόμενα δίκτυα αισθητήρων (ΑΕΔΑ). Θα αναλυθεί εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο αφού αποτελεί τον κινητήριο μοχλό για αυτή την διπλωματική εργασία.

¹C ορίζεται ως η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας. Για παράδειγμα για μία μπαταρία χωρητικότητας 1000mAh C=1000mA.

3

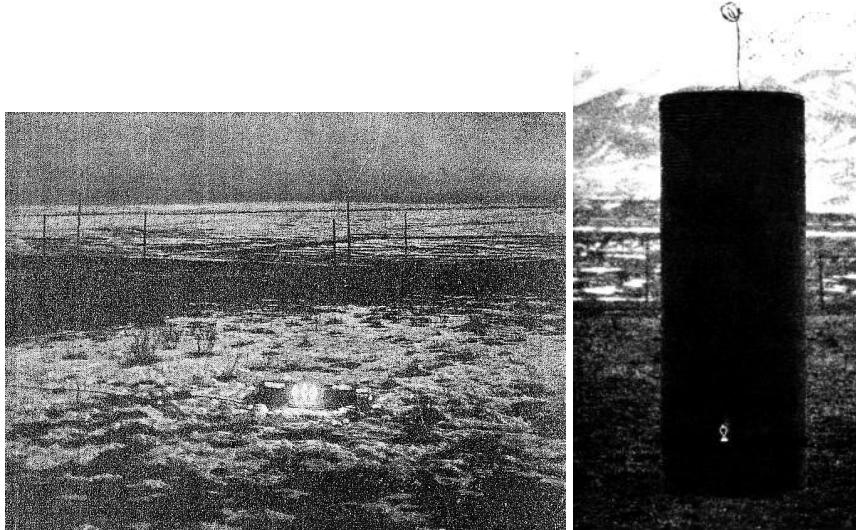
Ασύρματα Επαναφορτιζόμενα Δίκτυα Αισθητήρων

3.1 Η Ιστορία Πίσω Από την Τεχνολογία

Οι προσπάθειες ασύρματης μεταφοράς ενέργειας πρωτοσυναντόνται πίσω στα τέλη του 19ου αιώνα, πολύ πριν την εγκατάσταση ενσύρματης μεταφοράς ενέργειας. Ο Νικόλα Τέσλα από το 1891 είχε καταφέρει να μεταφέρει ενέργεια ασύρματα μέσα από επαγγελματικούς μεγάλους πηνίους. Η εφεύρεση αυτή τον είχε εντυπωσιάσει τόσο πολύ όσο τύποτα άλλο που μάλιστα δήλωσε ότι αυτή η εφεύρεσή του θα ήταν η πιο πολύτιμη από όλες. Το 1899, ο Νικολά Τέσλα, μεταφέρθηκε στα εργαστήρια της εταιρείας Colorado Springs όπου εμβάθυνε ακόμα περισσότερο στην τεχνολογία αυτή. Το 1902 κατέθεσε μια πατέντα [75] για μία συσκευή η οποία ήταν προϊόν αυτής της έρευνας. Ήταν ένα πηνίο σε διάταξη Τέσλα το οποίο μετέφερε ενέργεια χρησιμοποιώντας μεταφορά ενέργειας σε ιδιοσυχνότητα από το κάτω πηνίο σε μερικά μέτρα στο πάνω πηνίο. Αυτό επιτρέπει να δημιουργηθούν πολύ υψηλές τάσεις και διάταξη (Πηνία Τέσλα - Tesla Coils) που χρησιμοποιείται στην πράξη και σήμερα.

Εκείνη την εποχή ήταν η ανατολή για την θέσπιση ηλεκτρικής ενέργειας στις συσκευές. Επίσης εκείνη την εποχή μόλις είχε τελειώσει ο πόλεμος των ρευμάτων (the war of currents) στον οποίο υπήρχαν διαφωνίες στο αν θα έπρεπε στα ηλεκτρικά δίκτυα που επρόκειτο να δημιουργηθούν να είχαν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) ή συνεχές (DC). Όμως υπήρχαν επιστήμονες και μηχανικοί που συμφωνούσαν ότι η χρησιμοποίηση καλωδίων για την μεταφορά ενέργειας από κάθε τοποθεσία που αναπαράγοταν σε κάθε τοποθεσία που θα το χρησιμοποιούσε θα ήταν πολύ ακριβό και όχι πρακτικό. Ο Τέσλα ήταν ένας από τους πιο γνωστούς επιστήμονες της εποχής που υποστήριζε αυτή την άποψη και προσπαθούσε να βρει τρόπους να μεταφέρει ενέργεια ασύρματα. Το όραμά του ήταν ένας ασύρματος κόσμος στον οποίο η ασύρματη μεταφορά ενέργειας και η ασύρματες επικοινωνίες θα μπορούσαν να φτάσουν σε όλο τον κόσμο, παραδίδοντας ενέργεια και πληροφορίες σε πλούτα τα οποία ταξιδεύουν στη θάλασσα, σε εργοστάσια και γενικά σε κάθε σπίτι του πλανήτη.

Ο Τέσλα έχοντας πάρει μια χορήγηση US\$150,000, ξεκίνησε να κατασκευάζει τον πύργο Wardenclyffe προκειμένου να κάνει το όραμά του πραγματικότητα. Η κατασκευή είχε ύψος 56 μέτρα και είχε χτιστεί κοντά στην Νέα Υόρκη ενώ το κτήριο κοντά στον πύργο χρησιμοποιόταν ως εργαστήριο. Για την λειτουργία του



Εικόνα 3.1: Επιτυχημένες προσπάθειες του Νικόλα Τέσλα μεταφοράς ασύρματης ενέργειας είχαν γίνει από τα τέλη του 19ου αιώνα.

όμως ο Τέσλα χρειαζόταν επιπλέον χρηματοδοτήσεις τις οποίες ζητούσε αλλεπάλληλα από τον John Pierpont Morgan ο οποίος ήταν ο κύριος χορηγός του. Ωστόσο ο J. P. Morgan δεν πείστηκε από τις ικανότητες του κατασκευάσματος του Τέσλα και έτσι σταμάτησε την χρηματοδότηση με συνέπεια το σχέδιο του Τέσλα να σταματήσει εκεί.

Παρόλο που για την εποχή του, ο Τέσλα είχε κατασκευάσει ένα πολύ προηγμένο σύστημα μεταφοράς ενέργειας, είχε πολλά προβλήματα με κύριο τις απώλειες ενέργειας. Καθώς η συσκευή του Τέσλα εξέπειμπε στον χώρο πολύ δυνατά ηλεκτρομαγνητικά κύματα, προκειμένου να πετύχει μεταφορά ενέργειας σε μεγάλη απόσταση χρειαζόταν τεράστιες ποσότητες ενέργειας καθώς οι απώλειες ήταν πολύ μεγάλες.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 η μεταφορά ενέργειας μέσω ιδιοσυχνοτικής ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (resonant inductive coupling) χρησιμοποιήθηκε επιτυχημένα σε εμφυτεύσιμες συσκευές της ιατρικής όπως βηματοδότες και τεχνητές καρδιές. Τα πρώτα συστήματα είχαν μόνο δέκτη ιδιοσυχνοτικού πηνίου αλλά τα επόμενα συστήματα ενσωμάτωσαν και πομπό ιδιοσυχνοτικού πομπού. Οι συσκευές αυτές είχαν σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχουν πολύ μεγάλη απόδοση χρησιμοποιώντας χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρονικά. Ακόμα και σήμερα αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε εμπορικά διαθέσιμα ιατρικά εμφυτεύματα.

Από τότε η πρόοδος στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας υπήρξε ελάχιστη για πολλές δεκαετίες. Στις αρχές του 1990 η ανάγκη για ασύρματη μεταφορά ενέργειας ξαναναδύθηκε καθώς οι φορητές συσκευές έγιναν πολύ δημοφιλής. Ένας πειραματικός λεωφορειόδρομος κατασκευάστηκε το 1994 [76] το οποίο επέτρεπε αποδοτικότητα 80% καθώς επαναφόρτιζε την μπαταρία ενός πρωτότυπου λεωφορείου μέσω ιδιοσυχνοτικής ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής καθώς αυτό κινείτο. Επιπλέον μελετήθηκε η φόρτιση του λεωφορείου όταν αυτό είναι σταματημένο σε στάσεις και σε γκαράζ. Η απόσταση μεταξύ του πηνίου πομπού και του πηνίου



Εικόνα 3.2: Ο πύργος Wardenclyffe ο οποίος χτίστηκε για πειράματα μετάδοσης ασύρματης ενέργειας.

δέκτη είχε σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι μικρότερη από 10 εκατοστά.

Πρόσφατα, ασύρματη μετάδοση ενέργειας επιτεύχθηκε βασισμένη σε ραδιοσυχνότητες μεταξύ των 850MHz και 950MHz (με κεντρική ραδιοσυχνότητα τα 915MHz). Κάτω από αυτό το μοντέλο, ένας RF πομπός μεταδίδει ραδιοκύματα στην συχνότητα των 915MHz και ένας RF δέκτης συγχρονίζει στην ίδια ακριβός συχνότητα προκειμένου να συλλέξει την ενέργεια. Ωστόσο αποδείχθηκε ότι τέτοια συστήματα μπορούν έχουν πολύ μικρή απόδοση καθώς έχουν μεγάλες απώλειες ακτινοβολίας. Η τεχνολογία επίσης είναι ευαίσθητη σε εμπόδια μεταξύ του δέκτη και του πομπού ενώ θέτει ζητήματα υγείας γι' αυτό η χρήση της είναι περιορισμένη.

Μία δημοσίευση από το πανεπιστήμιο του MIT στα τέλη του 2007 ήρθε να ταράξει τα νερά στην τεχνολογία της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Οι εργασία που αποτελείται από τους A. Ioannopoulos και M. Soljačić και έχει τραβήξει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Στην εργασία παρουσιάζεται ένα πρότυπο σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί δύο ισχυρά συνδεδεμένα πηνία με την ίδια ιδιοσυχνότητα, ένας πομπός και ένας δέκτης, σε απόσταση 2 μέτρων. Στον πομπό δημιουργείται εναλλασσόμενο ρεύμα το οποίο μέσω επαγωγής ο δέκτης λαμβάνει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με απόδοση 40% τα οποία μέσω του πηνίου μετατρέπονται σε ηλεκτρισμό και ανάβει μια λάμπα 40Watt. Το πείραμα φαίνεται στην εικόνα 3.5.

Αμέσως μετά η Intel® επιτυγχάνει μέχρι και 75% απόδοση [73] ενώ η εταιρεία Witricity® ισχυρίζεται ότι μπορεί να επιτύχει μεταφορά ενέργειας με ποσοστό επιτυχίας μέχρι και 90% [74] για απόσταση μέχρι 20 εκατοστά.

3.2 Επεξήγηση της Τεχνολογίας

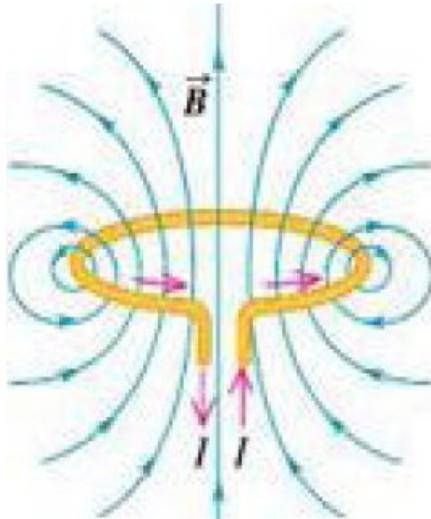
Η τεχνολογία πάνω στην οποία βασίζεται η ασύρματη μεταφορά ενέργειας μέσω ισχυρά συνδεδεμένων ιδιοσυχνοτήτων (strongly coupled resonance) βασίζεται πάνω στις βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού, από την εποχή που ο Νικόλα Τέσλα είχε καταφέρει ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Η διαφορά με την σημερινή μορφή της είναι ότι η μεταφορά που είχε πετύχει ο Τέσλα είχε απώλειες ακτινοβολίας, ενώ ταυτόχρονα τα πηνία Τέσλα προορίζονταν για πολύ μεγάλες τάσεις και επομένως είχε άμεσες συνέπειες στην υγεία του ανθρώπου.

Αν σε ένα δακτύλιο ο οποίος είναι κατασκευασμένος από αγώγιμο υλικό, εφαρμοστεί εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) τότε αυτό θα παράξει ταλαντώμενο μαγνητικό πεδίο (oscillating magnetic field) κάθετο στον άξονα του δακτυλίου όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2. Λόγω της αυτεπαγωγής, η ταλάντωση θα σταματάει με ρυθμό ο οποίος καθορίζεται από τον παράγοντα Q (Q-factor)¹. Στην συνέχεια, αν ένας δεύτερος δακτύλιος έρθει κοντά στον πρώτο δακτύλιο τότε μπορεί να "πιάσει" κάποιο μέρος του μαγνητικού πεδίου το οποίο στην συνέχεια δημιουργεί, επειδή είναι ταλαντευόμενο το μαγνητικό πεδίο, ένα εναλλασσόμενο ρεύμα πάνω του. Το ρεύμα που δημιουργείται στο δεύτερο δακτύλιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει ηλεκτρικές συσκευές. Αυτό το σύστημα μετάδοσης ενέργειας (ή καλύτερα μετατροπής της ενέργειας) χρησιμοποιείται εδώ και πάνω από έναν αιώνα στους ηλεκτρικούς μετατροπείς και ηλεκτρικές γεννήτριες.

Για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας χρησιμοποιείται η ίδια λογική μόνο που αντί για απλούς δακτυλίους, χρησιμοποιούνται πολύ υψηλής ποιότητας πηνία τα οποία παρουσιάζουν επίσης πολύ υψηλό παράγοντα Q που τους επιτρέπει να μεγαλώσουν την απόσταση μεταξύ τους σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Για να μεγαλώσει η απόδοση του συστήματος τα δύο πηνία θα πρέπει να είναι επίσης ισχυρά συνδεδεμένα (strongly coupled), δηλαδή ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής να είναι κοντά στο 1².

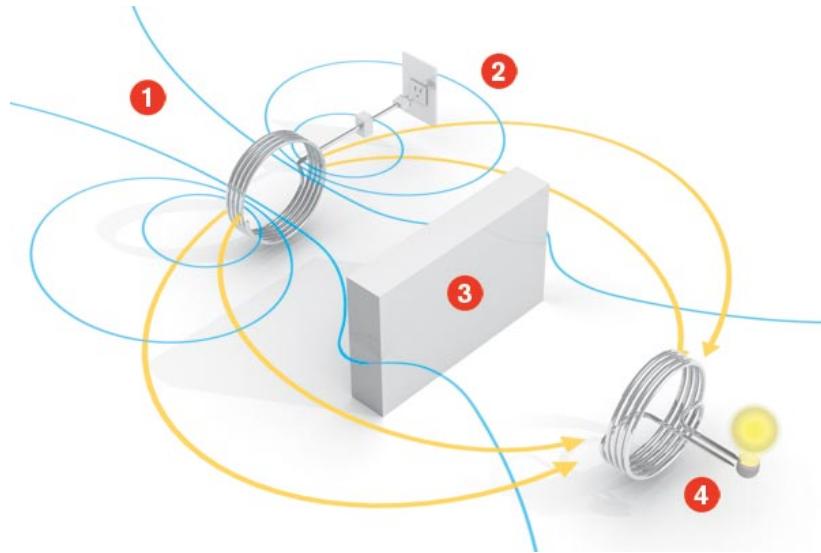
¹Ο παράγοντας Q είναι ένας αριθμός ο οποίος περιγράφει τον ρυθμό με τον οποίο μια ταλάντωση (ή ένα αντηχείο (resonator) αντίστοιχα) αποβαίνει. Όσο πιο υψηλός είναι ο αριθμός σημαίνει ότι ο ρυθμός απώλειας της ενέργειας λόγω αποσβέσεων είναι μικρότερος. Στην πράξη μπορούν να φτιαχτούν ταλαντωτές που έχουν $Q = 10^4$ και μεγαλύτερο. Για ένα RLC κύκλωμα δίνεται από τον τύπο $Q = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{C}{L}}$.

²Ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής είναι πάντα μεταξύ του 0 και του 1 και εξαρτάται από την διάταξη των 2 πηνίων. Ουσιαστικά πρόκειται για το ποσοστό της μαγνητικής ροής του πρώτου πηνίου/δακτυλίου κλπ "κόβει" το δεύτερο πηνίο/δακτύλιο κλπ. Μικρός συντελεστής σημαίνει ότι τα πηνία είναι ασθενά συνδεδεμένα και επομένως στο 2ο πηνίο χάνεται το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής. Αντίθετα ισχυρά συνδεδεμένα σημαίνει ότι "κόβεται" μεγάλο μέρος της μαγνητικής ροής.



Εικόνα 3.3: Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται πάνω σε έναν αγώγιμο δακτύλιο καθώς σε αυτόν περνά εναλλασσόμενο ρεύμα.

Η διαφορά με τις μέχρι τώρα προσπάθειες είναι ότι σε αυτό το μοντέλο προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση στην μεταφορά ενέργειας, θα πρέπει ο πομπός και ο δέκτης έχουν και οι δύο την ίδια φυσική συχνότητα, δηλαδή τα 2 αυτά πηνία θα πρέπει να έχουν την ίδια ιδιοσυχνότητα (resonance)¹. Ταυτόχρονα η απόστασή τους να μην υπερβαίνει το $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος του πομπού, προκειμένου ο δέκτης να λαμβάνει αρκετό μαγνητικό πεδίο. Ένα παράδειγμα του συνολικού συστήματος φαίνεται στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Ένα παράδειγμα της νέας τεχνολογίας ασύρματης μετάδοσης ενέργειας: (1) Πηνίο κατασκευασμένο από χαλκό με ιδιοσυχνότητα. (2) Τροφοδοσία. (3) Εμπόδιο το οποίο προσπερνάται χωρίς να υπάρχει απώλεια στην απόδοση. (4) Χάλκινο πηνίο με ίδια ιδιοσυχνότητα συνδεδεμένο με μια λάμπα.

Οι ερευνητές του MIT επιτυχημένα παρουσίασαν στην πράξη αυτή την θεωρία. Χρησιμοποιώντας 2 χάλκινα πηνία με 5 γύρους, και διάμετρο 60 εκατοστά, τα οποία ήταν τοποθετημένα σε απόσταση 2 μέτρων μεταξύ τους, κατάφεραν να πετύχουν μεταφορά ενέργειας από το ένα πηνίο στο άλλο με απόδοση 45% και τελικά τροφοδοτώντας μία λάμπα 60 Watt στο δεύτερο πηνίο. Τα πηνία ήταν σχεδιασμένα έτσι ώστε να έχουν ακριβώς την ίδια ιδιοσυχνότητα, στα 9,9MHz με μήκος κύματος τα 30 μέτρα και ήταν τοποθετημένα ακριβώς στον ίδιο (κάθετο) άξονα. Φωτογραφίες από το πείραμα φαίνονται στην εικόνα 3.5.

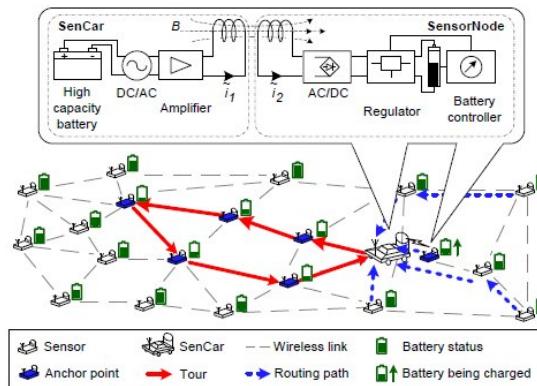
Όπως φαίνεται και στις εικόνες, ακόμα και αν τοποθετούνταν ένα εμπόδιο ανάμεσα στα 2 πηνία, η λάμπα συνέχιζε να άναψε, δηλαδή η μεταφορά ενέργειας συνέχιζε να υφίσταται με σχεδόν την ίδια απόδοση. Αυτό συμβαίνει λόγω της γεωμετρίας του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται.

¹ Η ιδιότητα της ιδιοσυχνότητας υπάρχει σε πολλά διαφορετικά συστήματα. Μπορεί να θεωρηθεί ως η φυσική συχνότητα στην οποία η ενέργεια μπορεί να προστεθεί με βέλτιστη απόδοση στο σύστημα. Ένα παράδειγμα είναι αυτό της κούνιας που κάνει ένα παιδί, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μια ταλάντωση. Το παιδί μπορεί να κινείται μπρος-πίσω σε ρυθμό που καθορίζεται από το μήκος της κούνιας. Μπορεί να κάνει την κούνια να κινηθεί με μεγαλύτερο μήκος αν συγχρονίσει ταυτόχρονα τις κινήσεις των χεριών και των ποδιών του με την κίνηση της κούνιας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα της ιδιοσυχνότητας είναι η θραύση ενός ποτηριού γεμάτο με κρασί από μία πολύ συγκεκριμένη νότα (συχνότητα) που τραγουδάει ένας τραγουδιστής.



Εικόνα 3.5: Το πείραμα που έγινε στο mit είχε απόδοση κοντά στο 45%.

Η τεχνολογία της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας μπορεί άνετα να ενσωματωθεί στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς η λογική της είναι πολύ απλή. Ο κάθε κόμβος θα πρέπει να έχει επιπλέον κυκλώματα με κύριο συστατικό το πηνίο το οποίο θα του επιτρέπει την φόρτισή του. Επίσης θα μπορεί να υπάρχει ένας κινητός κόμβος (robot) ο οποίος με κατάλληλους αλγορίθμους θα κινείται στην περιοχή του δικτύου και θα φορτίζει τον κάθε κόμβο. Θα πρέπει όμως όλοι οι κόμβοι να έχουν συγκεκριμένη ιδιοσυχνότητα η οποία θα είναι ίδια με την ιδιοσυχνότητα του πομπού, δηλαδή του κινητού κόμβου. Επίσης δεν θα είναι αναγκαίο ο κινητός κόμβος να έχει άμεση επαφή (<1 εκατοστόν) με τον στατικό κόμβο ανάλογα με το μήκος κύματος που θα χρησιμοποιείται ο κινητός κόμβος θα μπορεί να τον φορτίζει αποδοτικά και από πιο μακρινές αποστάσεις. Τέλος λόγω των ιδιοτήτων της τεχνολογίας αυτής, ακόμα και αν υπάρχει ένα μικρό εμπόδιο το οποίο εμποδίζει την οπτική επαφή ανάμεσα στον κινητό κόμβο και τον στατικό κόμβο, η μεταφορά ενέργειας μπορεί και πάλι να επιτευχθεί με την ίδια σχεδόν απόδοση. Ένα παράδειγμα ενός κινητού κόμβου που φορτίζει τους στατικούς κόμβους σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με αυτή την τεχνολογία παρουσιάζεται στην εικόνα 3.6. Εφόσον η τεχνολογία αυτή μπορεί να ενσωματωθεί σε ΑΔΑ συστήματα, μένει να κατασκευαστούν αλγόριθμοι και στρατηγικές φόρτισης προκειμένου να διαμοιράζεται η πολύτιμη ενέργεια του φορτιστή όσο πιο δίκαια γίνεται. Αυτό το πρόβλημα αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 3.6: Ένα παράδειγμα ενός ασύρματα επαναφορτιζόμενο δικτύου αισθητήρων (εξαγμένο από το [77]).

4

Ορισμός του Προβλήματος και Στρατηγικές Επίλυσης

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστεί το μοντέλο κάτω από το οποίο γίνονται οι υπολογισμοί και αφού οριστεί το πρόβλημα με μαθηματικούς ορισμούς, θα αποδειχθεί ότι το πρόβλημα αγήκει στην κλάση NP-πλήρης (NP-Complete) των προβλημάτων, δηλαδή δεν υπάρχει πολυωνυμικός αλγόριθμος που να το λύνει. Επίσης θα παρουσιαστούν παρόμοιες εργασίες οι οποίες όμως μέχρι τώρα διαφέρουν ως προς την προσέγγιση του προβλήματος σε σχέση με την παρούσα εργασία. Τέλος θα προταθούν ευρετικές στρατηγικές που αυξάνουν την απόδοση του φορτιστή αλλά και ευρετικοί αλγόριθμοι τοπικής και καθολικής γνώσης οι οποίοι θα συγκριθούν με έναν προσαριστικός αλγόριθμο ο οποίος ρυθμίζει την διαδρομή του φορτιστή ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου.

4.1 Γενικευμένος Ορισμός, Μοντέλο Επίλυσης και Ιδιότητες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο γενικευμένος ορισμός του προβλήματος ο οποίος δεν αφορά μόνο την τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης ενέργειας. Αντίθετα το πρόβλημα ορίζεται κάτω από την γενικότερη έννοια της επαναφόρτισης των κόμβων, είτε αυτή είναι ασύρματη, είτε είναι ενσύρματη. Επίσης, ορίζεται αυστηρά το μοντέλο κάτω από το οποίο θα παρουσιαστούν οι λύσεις του προβλήματος. Είναι σημαντικό το μοντέλο να είναι απλό ώστε να είναι εύκολα δυνατό να γίνουν αναλύσεις και να εξαχθούν λύσεις αλλά θα πρέπει ταυτόχρονα το μοντέλο να αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα, δηλαδή να έχει άμεση σχέση με το φυσικό περιβάλλον. Στην συνέχεια αποδεικνύεται ότι το πρόβλημα αυτό ανήκει στην κλάση των προβλημάτων που είναι NP-πλήρη (NP-complete), δηλαδή είναι υπολογιστικά δύσκολο να βρεθεί γρήγορα μια λύση.

4.1.1 Γενικευμένος Ορισμός

Οι καινούργιες τεχνολογίες που αναλύθηκαν στην ενότητα 2.3.3 οδηγούν σε νέες ερευνητικές προκλήσεις των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Ο πλέον μεγάλος περιορισμός των υπαρχόντων τεχνολογιών είναι εκείνος της περιορισμένης ενέργειας. Όμως, με τις πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας, ο διαχειρισμός της ενέργειας σε τέτοιουν είδους δίκτυα είναι σημαντικός. Μια αποδοτική διαχείριση ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε καλύ-

τερα αποτελέσματα ως προς όλες τις μετρικές των ΑΔΑ (ενότητα 1.6). Επίσης αυτή η διαχείριση ενέργειας στα ΑΕΔΑ θα πρέπει γίνεται παθητικά ως προς τους στατικούς κόμβους, δηλαδή δεν χρειάζεται καινούργιο πολύπλοκο πρωτόκολλο γι' αυτή την διαχείριση που να καταναλώνει επιπλέον ενέργεια στους στατικούς κόμβους, ενώ ταυτόχρονα ιδανικά θα πρέπει να είναι και ανεξαρτήτου του πρωτόκολλου δρομολόγησης που χρησιμοποιείται. Ο γενικευμένος ορισμός του προβλήματος παρουσιάζεται στην συνέχεια:

Το Πρόβλημα: Έστω ένα ασύρματα επαναφορτιζόμενο δίκτυο αισθητήρων το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο στατικών κόμβων και έναν ειδικό κινητό κόμβο, τον κινητό φορτιστή. Οι στατικοί κόμβοι τοποθετούνται ομοιόμορφα κατανευμημένα στην περιοχή του δικτύου και διαδίδουν τα δεδομένα τους, σύμφωνα με ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, προς την Πηγή, η οποία βρίσκεται στο κέντρο του δικτύου. Ο κινητός φορτιστής έχει πεπερασμένους πόρους ενέργειας οι οποίοι όμως είναι σημαντικά μεγαλύτεροι από τους πεπερασμένους πόρους ενέργειας των στατικών κόμβων ενώ ταυτόχρονα είναι ικανός να τους φορτίζει. Το πρόβλημα που μελετάται είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης δυνατής διαμόφωσης όλων των παραμέτρων του δικτύου έτσι ώστε να βελτιωθεί η αποδοτικότητα και να αυξηθεί ο χρόνος ζωής του δικτύου.

Οι παράμετροι που θα μελετηθούν είναι η πολιτική φόρτισης του κάθε στατικού κόμβου (δηλαδή αν ο κινητός φορτιστής τον φορτίζει ολικώς ή μερικώς), η αναλογία της ενέργειας που είναι αρχικά διαθέσιμη στον κινητό φορτιστή και στους στατικούς κόμβους, καθώς και οι βέλτιστες διαδρομές που θα ακολουθεί ο κινητός φορτιστής προς την απόδοση και την αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου.

4.1.2 Μοντέλο Ανάπτυξης, Ενέργειας και Φόρτισης Κόμβων

Το μοντέλο του προβλήματος, από τον ορισμό του, περιέχει 3 τύπους συσκευών. Υπάρχουν N στατικοί κόμβοι (αισθητήρες) ομοιόμορφα κατανευμημένοι στο δίκτυο οι οποίοι επιβλέπουν το περιβάλλον και ανιγνεύουν διάφορα γεγονότα που γίνονται σε αυτό. Οι στατικοί κόμβοι έχουν αρκετή υπολογιστική ισχύ για να εκτελέσουν βασικές εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων αλλά ταυτόχρονα έχουν περιορισμένους πόρους όσον αφορά την αποθήκευση της ενέργειας. Στην συνέχεια υπάρχει ένας κινητός κόμβος, ο κινητός φορτιστής MC , ο οποίος θεωρούμε ότι έχει και αυτός πεπερασμένη διαθέσιμη ενέργεια αλλά πολύ μεγαλύτερη από αυτή που έχουν οι στατικοί κόμβοι. Τέλος υπάρχει η Πηγή S , η οποία βρίσκεται στο κέντρο του δικτύου και είναι ο κόμβος στον οποίο καταλήγουν όλα τα πακέτα των στατικών κόμβων. Θεωρούμε ότι η Πηγή έχει άπειρα υπολογιστική ισχύ και άπειρη ενέργεια. Επίσης θεωρείται ότι το δίκτυο είναι ένας κυκλικός δίσκος ακτίνας R . Η ακτίνα επικοινωνίας των κόμβων, έστω r , ποικίλει ανάλογα με το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται. Η πυκνότητα του δικτύου είναι:

$$\rho = \frac{N}{\pi \cdot R^2}$$

Στο μοντέλο ο κινητός φορτιστής MC δεν συλλέγει δεδομένα από τους κόμβους αλλά μόνο τους φορτίζει. Επίσης χάριν απλότητας θεωρείται ότι όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια συχνότητα παραγωγής μηνυμάτων, έστω λ πακέτα ανά μονάδα χρόνου. Επιπλέον θεωρείται ότι E_{total} είναι η συνολική διαθέσιμη ενέργεια που μπορούμε να βάλουμε στο δίκτυο, είτε δοθεί όλη στους στατικούς κόμβους είτε την μοιραστεί ανάμεσα στους στατικούς κόμβους και τον κινητό φορτιστή. Δη-

λαδή αρχικά είναι:

$$E_{total} = E_{sensors} + E_{MC}^{init} \quad (4.1)$$

όπου $E_{sensors}$ είναι η αρχική ενέργεια που δίνεται στους στατικούς κόμβους και E_{MC}^{init} η αρχική ενέργεια που δίνεται στον κινητό φορτιστή. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ένας στατικός κόμβος είναι:

$$E_{sensor}^{max} = \frac{E_{sensors}}{N}$$

Επομένως έχουμε:

$$E_{total} = N \cdot E_{sensor}^{max} + E_{MC}^{init}$$

Αν διαιρέσουμε με E_{total} τότε έχουμε:

$$Per_{sensors} + Per_{MC}^{init} = 1$$

όπου $Per_{sensors}$ και Per_{MC}^{init} είναι τα ποσοστά ενέργειας ως προς την συνολική αρχική ενέργεια των στατικών κόμβων και του κινητού φορτιστή αντίστοιχα. Σε κάθε χρονική στιγμή η εναπομείνασα ενέργεια που υπάρχει στον κινητό φορτιστή είναι E_{MC}^{curr} .

Για την μετάδοση και λήψη ενός μηνύματος θεωρείται ότι το κύκλωμα καταναλώνει ενέργεια αντίστοιχη με το μέγεθος του μηνύματος. Έτσι, αν πρέπει να μεταδοθεί ένα μήνυμα με k bits τότε ο πομπός καταναλώνει ενέργεια $E_{\tau}(k) = \epsilon_{trans} \cdot k$ όπου ϵ_{trans} είναι η ενέργεια που χρειάζεται το κύκλωμα για να δουλέψει και εξαρτάται από την απόσταση. Συνήθως η ισχύς που χρειάζεται για να μεταδοθεί ένα μήνυμα σε απόσταση d από τον πομπό είναι περίπου d^{α} όπου $2 \leq \alpha \leq 6$ είναι μια σταθερά. Χάριν απλότητας εδώ θεωρείται ότι $\alpha = 2$. Επίσης για να ληφθεί ένα μήνυμα πάλι με k bits ο δέκτης καταναλώνει ενέργεια ίση με $E_R(k) = \epsilon_{recv} \cdot k$ όπου $epsilon_{recv}$ είναι σταθερά και είναι η ενέργεια που χρειάζεται το κύκλωμα για να αποκωδικοποιήσει το μήνυμα.

Επίσης στο μοντέλο θεωρείται ότι η φόρτιση γίνεται σημείο με σημείο (point-to-point), δηλαδή μόνο ένας κόμβος μπορεί να φορτιστεί κάθε χρονική στιγμή από τον κινητό φορτιστή. Για να γίνει αυτό, ο κινητός φορτιστής MC πλησιάζει τον κάθε κόμβο σε πολύ κοντινή απόσταση έτσι ώστε η απόδοση της φόρτισης (είτε είναι ασύρματη είτε είναι με φυσική επαφή) να φτάσει στο μέγιστο. Αν και για την ασύρματη φόρτιση η απόδοση της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται δεν έχει φτάσει στο 99%, στο μοντέλο θεωρείται ότι η μεταφορά ενέργειας γίνεται χωρίς απώλειες χάριν απλότητας. Ο χρόνος που διαρκεί καθώς ο κινητός κόμβος κινείται από στατικό κόμβο σε στατικό κόμβο, θεωρείται πολύ μικρός συγκρινόμενος με τον χρόνο που χρειάζεται για να φορτιστεί ένας στατικός κόμβος. Τέλος στο μοντέλο θεωρείται ότι ο χρόνος που χρειάζεται για να φορτιστεί πλήρως ένας στατικός κόμβος από τον κινητό φορτιστή είναι ίσος για όλους τους στατικούς κόμβους και ανεξάρτητος από την ενέργεια του εκείνη την χρονική στιγμή.

4.1.3 NP-πληρότητα του Προβλήματος

Για να δειχθεί ότι το πρόβλημα είναι NP-πλήρες (NP-Complete), δηλαδή υπολογιστικά δύσκολο να λυθεί, θα εξάγουμε από τον ορισμό του αρχικού προβλήματος τον ορισμό του αντίστοιχου προβλήματος απόφασης, το πρόβλημα δρομολόγησης του κινητού φορτιστή (Charger Dispatch Decision Problem - CDDP), το οποίο και παρουσιάζεται παρακάτω.

Ορισμός 1. (*CDDP*) Έστω ότι δίνεται ένα σύνολο S κόμβων όπου ο καθένας έχει την δυνατότητα να αποθηκεύσει E μονάδες ενέργειας και για κάθε κόμβο $s \in S$ μια λίστα από ζευγάρια (t_s^j, e_s^j) , $j \geq 1$ στην οποία t_s^j αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή κατά την οποία το μήνυμα j του s δημιουργήθηκε και e_s^j είναι η ενέργεια που χρησιμοποιήσει ο κόμβος s για να το μεταδώσει. Δίνεται επίσης ένα μητρώο $D \in R^{|S| \times |S|}$ όπου $D_{i,j}$ είναι η απόσταση μεταξύ των κόμβων i και j , και ένας κινητός φορτιστής M ο οποίος μπορεί να φορτίσει έναν κόμβο στην αρχική του ενέργεια σε μια χρονική μονάδα. Το πρόβλημα απόφασης του φορτιστή M είναι να καθοριστεί αν υπάρχει εφικτή διαδρομή του φορτιστή M που να επισκέπτεται τους κόμβους έτσι ώστε κανένα μήνυμα να μη χαθεί λόγω ανεπάρκειας ενέργειας.

Να σημειωθεί ότι στον ορισμό η ενέργεια που απαιτείται για την λήψη μηνυμάτων θεωρείται αμελητέα. Επίσης, τα μηνύματα τα οποία ένας στατικός κόμβος είναι δυνατόν να λάβει από άλλους στατικούς κόμβους, συμπεριλαμβάνονται σε κάθε λίστα L_s . Επομένως θεωρείται ότι τα μηνύματα αυτά παράγονται από τον ίδιο τον κόμβο s . Αυτό επιτρέπει την εξέταση διαφορετικών αλγορίθμων δρομολόγησης με έναν ενιαίο τρόπο.

Για την απόδειξη της NP-πληρότητας του προβλήματος, θα χρησιμοποιηθεί ένα ήδη γνωστό NP-πλήρες πρόβλημα, τον γεωμετρικά περιοδεύων πωλητή. Ο ορισμός του προβλήματος όπως παρουσιάζεται στο [78] (σελίδα 212) είναι ο εξής:

Ορισμός 2. Έστω $P \subseteq \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ ένα σύνολο σημείων στο δισδιάστατο χώρο και B ένας θετικός ακέραιος αριθμός. Υπάρχει διαδρομή μήκους μικρότερου ή ίσου του B για το πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή με τις συντεταγμένες των πόλεων να ισχύει $C = P$ και η απόσταση $d((x_1, y_1), (x_2, y_2))$ να είναι ίση με την διακριτή ευκλείδεια απόσταση δηλαδή

$$d((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = [\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}]$$

Στο [79] αποδεικνύεται ότι το πρόβλημα του γεωμετρικά περιοδεύοντος πωλητή είναι NP-πλήρες.

Θεώρημα 1. Το πρόβλημα CDDP είναι NP-Complete

Απόδειξη. Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι δεδομένου μιας συγκεκριμένης διαδρομής W του φορτιστή MC που επισκέπτεται τους κόμβους του συνόλου S , είναι πολύ εύκολο να πιστοποιηθεί αν αυτή η διαδρομή είναι ικανή έτσι ώστε κανένα μήνυμα να μη χαθεί, δηλαδή κανένα μήνυμα x το οποίο γεννήθηκε στον κόμβο s έτσι ώστε x είναι το j -στο μήνυμα του κόμβου s και ο κόμβος αυτός έχει λιγότερη διαθέσιμη ενέργεια από e_s^j την χρονική στιγμή t_s^j . Προκειμένου να ελεγχθεί αν το μήνυμα x χάθηκε στον κόμβο s αρκεί να επαληθευθεί ότι ο φορτιστής επισκέφθηκε τον κόμβο s στο χρονικό διάστημα $[d_s^j, t_s^j]$, όπου

$$d_s^j = \inf_t \left\{ \sum_{i: t < t_s^i \leq t_s^j} e_s^i \leq E \right\}$$

Συγκεκριμένα, αυτό μπορεί να γίνει σε $O(T \cdot |W|)$ χρόνο όπου T είναι ο συνολικός αριθμός γεγονότων που δημιουργήθηκαν στο δίκτυο. Επομένως $CDDP \in NP$.

Για δεύτερο μέρος της απόδειξης θα χρησιμοποιηθεί το G-TSP που δίνεται στον Ορισμό 2. Έστω $P \subseteq \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ και $\in \mathbb{N}$ η είσοδος του προβλήματος G-TSP. Η μετατροπή αυτής της εισόδου σε είσοδο για το CDDP θα γίνει ως εξής:

χρησιμοποιείται ένα σύνολο S των $|S| = |P|$ κόμβων και η απόσταση $D_{i,j}$ είναι ίση με την Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του i -οστού και j -οστού σημείου στο P . Επιπλέον, για κάθε κόμβο $s \in S$ ορίζεται η λίστα των γεγονότων του να είναι $L_s = \{(0, E), (\frac{B}{v}, 1)\}$, όπου v είναι η ταχύτητα του φορτιστή. Δηλαδή, 2 γεγονότα συμβαίνουν σε κάθε κόμβο s , συγκεκριμένα ένα την χρονική στιγμή 0 εξαντλώντας όλη την διαθέσιμη ενέργεια κάθε κόμβου και ένα γεγονός την χρονική στιγμή $\frac{B}{v}$ το οποίο απαιτεί ενέργεια 1. Μια λύση σε αυτό το στιγμιότυπο του CDDP θα μπορούσε να δώσει μία λύση για το G-TSP, το οποίο σημαίνει ότι $\text{G-TSP} \leq_m \text{CDDP}$. Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη. \square

4.2 Σχετική Έρευνα

Η πρώτη εργασία που μελετάει την περίπτωση επαναφόρτισης των κόμβων του δικτύου μέσα από διάφορες πηγές ενέργειας δημοσιεύτηκε το 2003 [80], πολύ πριν αναπτυχθεί η τεχνολογία της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Οι πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται δεν κατονομάζονται αλλά ορίζονται τα βασικά θεμέλια για να είναι το δίκτυο ικανό να λειτουργεί για πάντα. Συγκεκριμένα, η εργασία αναλύει την περίπτωση όπου υπάρχουν στατικοί κόμβοι στο δίκτυο και μερικοί κινητοί κόμβοι οι οποίοι συνέχεια ψάχνουν για διαθέσιμη ενέργεια στην περιοχή του δικτύου και την παραδίδουν στους στατικούς κόμβους. Συγκεκριμένα σε κάθε στιγμή η ενέργεια που καταναλώνεται σε έναν κόμβο i ορίζεται ως

$$E(i, t) = \int_{t_0}^t [P_p(i, t) - P_c(i, t)] dt$$

όπου $P_p(i, t)$ είναι η πρόσθεση ενέργειας του κόμβου και $P_c(i, t)$ είναι η κατανάλωση ενέργειας του κόμβου την ίδια χρονική στιγμή. Για το δίκτυο το άθροισμα των διαφορετικών ενέργειών των κόμβων θα είναι

$$E(t) = \int_{t_0}^t \left(\sum_i [P_p(i, t) - P_c(i, t)] \right) dt$$

Ένας κόμβος ορίζεται ως αυτοδύναμος (self-contained) αν $E(i, t) > 0 \forall t > 0$ ενώ ένα δίκτυο ορίζεται ως αυτοδύναμο αν $E(t) - E_{overhead} > 0 \forall t > 0$ όπου $E_{overhead}$ είναι η κατανάλωση ενέργειας που προκύπτει από την εκτέλεση των διαφόρων αλγορίθμων στο δίκτυο. Η εργασία καταλήγει με ένα πρότυπο σύστημα που επαναφορτίζει τους κόμβους.

Η εργασία στο [81] περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να ενσωματωθεί αυτή η νέα τεχνολογία στα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων. Συγκεκριμένα περιγράφει εφαρμογές οι οποίες είναι κατάλληλες για ασύρματα επαναφορτιζόμενα δίκτυα αισθητήρων, ο τρόπος προσέγγισής τους, τα πλεονεκτήματά τους αλλά και τα μειονεκτήματά τους σε σχέση με τα κλασικά δίκτυα αισθητήρων. Στην εργασία [82] οι συγγραφείς αναλύουν το πρόβλημα της βέλτιστης δρομολόγησης του φορτιστή αλλά και της πολιτικής ύπνου που θα πρέπει να ακολουθούν οι στατικοί κόμβοι για στοχαστική ανίχνευση γεγονότων. Επίσης αναλύεται η μεγιστοποίηση της ποιότητας της ανίχνευσης τους.

Η εργασία [83] εξετάζει το σενάριο όπου υπάρχουν στατικοί κόμβοι, ένας κινητός φορτιστής και μια στατική Πηγή η οποία κατευθύνει τον κινητό φορτιστή. Η εντολές που δίνει στον φορτιστή εξαρτώνται από παράγοντες όπως η τρέχουσα

ενέργεια ή ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων οι οποίες ενσωματώνονται σε μηνύματα δεδομένων (piggybacked). Οι συγγραφείς δείχνουν ότι το πρόβλημα είναι NP-πλήρες μέσω αναγωγής στο ήδη γνωστό NP-πλήρες πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή (TSP). Στην συνέχεια κατασκευάζουν 2 greedy αλγορίθμους οι οποίοι προσπαθούν να λύσουν αποδοτικά το πρόβλημα της διαχείρισης της ενέργειας του κινητού φορτιστή και εφαρμόζουν προσομοιώσεις αλλά και πειραματικές εξομιλώσεις με πραγματικά συστήματα.

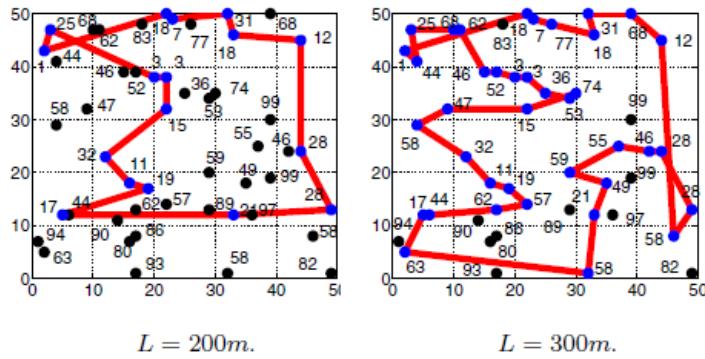
Στην εργασία [84] οι συγγραφείς εξετάζουν το σενάριο στο οποίο υπάρχουν στατικοί κόμβοι οι οποίοι ανιχνεύουν το περιβάλλον, μία στατική Πηγή στην οποία καταλήγουν όλα τα πακέτα και ένας κινητός φορτιστής ο οποίος έχει πεπερασμένη ενέργεια, αλλά πολύ μεγαλύτερη από αυτή των στατικών κόμβων και έχει την δυνατότητα να τους φορτίζει. Επίσης θεωρείται ότι ο φορτιστής, μόλις του τελειώσει η ενέργεια, θα πρέπει να επιστρέψει σε συγκεκριμένο σημείο στο οποίο θα γίνει η αντικατάσταση της μπαταρίας του. Στην εργασία αποδεικνύονται κάτω από τις προϋποθέσεις του μοντέλου οι απαραίτητες αλλά και αναγκαίες συνθήκες που θα πρέπει να ισχύουν προκειμένου οι κόμβοι να είναι αθάνατοι, δηλαδή ο κινητός φορτιστής να προλαβαίνει πάντα να τους φορτίζει. Επίσης αποδεικνύεται ότι η διαδρομή του κινητού φορτιστή θα πρέπει να είναι ο μικρότερος Χαμιλτονιανός κύκλος.

Η εργασία στο [85] εξετάζει ένα παρόμοιο σενάριο. Στο δίκτυο υπάρχουν στατικοί κόμβοι οι οποίοι επιβλέπουν και ανιχνεύουν γεγονότα, υπάρχει ένας κινητός φορτιστής ο οποίος μόνο φορτίζει τους κόμβους, δηλαδή δεν συλλέγει δεδομένα από τους κόμβους, και μία στατική Πηγή στην οποία καταλήγουν όλα τα μηνύματα των στατικών κόμβων, μέσω πολυ-βηματικών (multi-hop) μεταδόσεων. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται από τους στατικούς κόμβους είναι το Collection Tree Protocol (CTP) μια μορφή greedy πρωτοκόλλου που όμως βασίζεται σε δενδρική μορφή. Εδώ ο χρόνος χωρίζεται σε γύρους όπου ο κάθε γύρος είναι αρκετά μεγάλος σε σχέση με τον χρόνο αναφοράς δεδομένων των στατικών κόμβων. Ο αλγόριθμος που βρίσκει την διαδρομή που θα ακολουθήσει ο κινητός φορτιστής εφαρμόζεται σε 2 βήματα. Αρχικά ο κινητός φορτιστής βρίσκει ποιους κόμβους θα φορτίσει, δηλαδή ποιους θα συμπεριλάβει στην διαδρομή του. Τα σημεία αυτά εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως ο ρυθμός κατανάλωσης της ενέργειας, η εναπομείνασα ενέργεια, ο ρυθμός γέννησης μηνυμάτων κλπ των στατικών κόμβων ή υποπεριοχών του δικτύου. Στην συνέχεια ο φορτιστής εφαρμόζει έναν ήδη γνωστό αλγόριθμο [86] για δρομολόγηση οχημάτων με χρονικά παράθυρα έτσι ώστε να υπάρχει ελαχιστοπόιηση της μηχανικής ενέργειας.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση ο φορτιστής φορτίζει ουσιαστικά τα πιο κρίσιμα μονοπάτια του δικτύου, δηλαδή τα μονοπάτια από τα οποία περνάνε τα περισσότερα δεδομένα των στατικών κόμβων και επομένως υπάρχει πολύ μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Οι συγγραφείς εκτέλεσαν εξομιλώσεις οι οποίες δείχνουν ότι υπάρχει μεγάλη χρονική επέκταση της ζωής του δικτύου.

Στην εργασία [77] εξετάζεται το σενάριο κατά το οποίο χρησιμοποιείται μια κινητή οντότητα (senCar) η οποία έχει την δυνατότητα να φορτίζει τους στατικούς κόμβους του δικτύου αλλά ταυτόχρονα αυτή η οντότητα λειτουργεί ως Πηγή για το δίκτυο. Δηλαδή καθώς κινείται μέσα στο δίκτυο, αυτή η κινητή οντότητα παραδίδει ενέργεια σε όσους κόμβους την χρειάζονται και συλλέγει τα δεδομένα από τους κόμβους. Οι συγγραφείς της εργασίας προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν την τροχιά της κινητής οντότητας με περιορισμούς που υπόκεινται στην αποδοτική διαχείριση της ενέργειας αλλά και την αποδοτική συλλογή των δεδομένων από τους στατικούς κόμβους. Ο χρόνος στο μοντέλο χωρίζεται σε γύρους μήκους

Ταυτότητας οποίους η κινητή οντότητα εφαρμόζει μια λύση η οποία αποτελείται από 2 βήματα: Αρχικά βρίσκει όλα εκείνα τα σημεία που θα πρέπει να επισκεφθεί κατά την διάρκεια ενός γύρου. Στην συνέχεια βρίσκει το βέλτιστο μονοπάτι που πρέπει να ακολουθήσει για να κάλυψη όλα τα σημεία και τέλος κάθε κόμβος βρίσκει το μονοπάτι μέσα από το οποίο θα στείλει στην κινητή οντότητα τα δεδομένα του.



Εικόνα 4.1: Δεξιά καλύφθηκε μεγαλύτερη διαδρομή αλλά ο κάθε κόμβος ξεχωριστά φορτίστηκε λιγότερο

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1 όσα περισσότερα σημεία εισαχθούν στο μονοπάτι που θα ακολουθήσει η κινητή οντότητα, τόσο μεγαλύτερη χρονοκαθυστέρηση (latency) θα υπάρχει στην συλλογή δεδομένων των στατικών κόμβων. Επομένως θα πρέπει να υπάρχει εξισορρόπηση ανάμεσα στην χρονοκαθυστέρηση και στους κόμβους που θα φορτιστούν. Για να το πετύχουν αυτό, οι συγγραφείς απαιτούν από κάθε στατικό κόμβο να στείλει λίγο πριν το τέλος του γύρου την τρέχουσα ενέργειά του. Αφού μαζευτούν όλες οι τρέχουσες ενέργειες των κόμβων στην κινητή οντότητα, αυτή τις διατάσσει σε αύξουσα σειρά και ανάλογα με το όριο της διαδρομής επιλέγει τους L πρώτους κόμβους. Στην συνέχεια εφαρμόζεται ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος TSP ο οποίος βρίσκει μία καλή διαδρομή για τα σημεία που επιλέχθηκαν. Για τον τρόπο (μονοπάτι) με τον οποίο οι στατικοί κόμβοι επιλέγουν να στείλουν τα δεδομένα τους, οι συγγραφείς καταστρώνουν ένα γραμμικό πρόγραμμα το οποίο στη συνέχει το λύνουν με έναν κατανευμένο προσεγγιστικό αλγόριθμο. Οι προσομοιώσεις δείξαν ότι υπάρχει δραματική αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου σε σχέση με ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία χρησιμοποιούν εναλλακτικές μορφές ενέργειας.

Από τις παραπάνω δημοσιεύσεις μόνο οι [83], [85], [77] [84] προσπαθήσουν να λύσουν το πρόβλημα ενώ μόνο η [77] χρησιμοποιεί κατανευμένο αλγόριθμο αλλά καμία από τις λύσεις που προτείνονται δεν χρησιμοποιεί τοπική πληροφορία. Αντίθετα όλοι οι αλγόριθμοι που προτείνονται χρησιμοποιούν πληροφορίες από όλους τους κόμβους του δικτύου. Αυτό αποτελεί πρόβλημα καθώς σπαταλάται πολύ ενέργεια σε μεγάλα δίκτυα. Επίσης δεν μελετώνται άλλα, πιο γενικά, θέματα όπως η γενική απόδοση του φορτιστή σε σχέση με την διαθέσιμη ενέργεια του δικτύου, η αναλογία διαθέσιμης ενέργειας του φορτιστή σε σχέση με την διαθέσιμη ενέργεια των στατικών κόμβων αλλά και στρατηγικές φόρτισης που θα μπορούσαν να ωφελήσουν την χρονοζωή (lifetime) του δικτύου.

4.3 Στρατηγικές Επίλυσης

Προκειμένου να λυθεί το CDDP πρόβλημα αποδοτικά, θα εφαρμοστούν ορισμένες στρατηγικές επίλυσης οι οποίες έχουν να κάνουν με συμβιβασμούς στην διαθέσιμη ενέργεια του φορτιστή και των κόμβων.

4.3.1 Ολική και Μερική Φόρτιση

Κάθε φορά που ο κινητός φορτιστής (mobile charger ή *MC*) επισκέπτεται έναν κόμβο, μία αφελής στρατηγική θα ήταν να τον φορτίζει πλήρως τον κόμβο αυτό. Με αυτόν τον τρόπο ο *MC* θα μπορούσε να μεγιστοποιήσει τον χρόνο που χρειάζεται μέχρι να επιστρέψει στον ίδιο κόμβο και να τον ξαναφορτίσει για να μην εξαντληθεί όλη την ενέργεια. Ωστόσο, καθώς το δίκτυο λειτουργεί, υπάρχει κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους μέσα από την αποστολή μηνυμάτων αλλά και από τον ίδιο φορτιστή μέσα από την διαδικασία φόρτισης. Επομένως ο φορτιστής θα έχει όλο και λιγότερη ενέργεια διαθέσιμη να δώσει στους κόμβους που την έχουν ανάγκη οι οποίοι με τον χρόνο θα αυξάνονται.

Μία διαφορετική στρατηγική για τον φορτιστή είναι να απλώσει συνετά την πολύτιμη ενέργειά του σε όσους περισσότερους κόμβους είναι δυνατόν προκειμένου να επεκτείνει τον χρόνο ζωής του δικτύου. Ακολουθώντας αυτή την λογική, το ποσό της ενέργειας ο φορτιστής *MC* παραδίδει σε έναν κόμβο είναι ανάλογο της διαθέσιμης ενέργειας του ίδιου του φορτιστή. Δηλαδή, ο *MC* φορτίζει έναν κόμβο μέχρι η ενέργειά του να γίνει:

$$e_i \approx \frac{E_{MC}^{curr}}{E_{MC}^{init}} \cdot E_{sensor}^{max}$$

Προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη στρατηγική φόρτιση στο κεφάλαιο 5 εκτελούνται μια σειρά πειραμάτων τα οποία συγκρίνουν την στρατηγική της ολικής φόρτισης και την στρατηγική της προσαρμοστικής, μερικής φόρτισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η μερική φόρτιση είναι πιο αποδοτική από την ολική φόρτιση.

4.3.2 Ποσοστό Ενέργειας στον Φορτιστή

Για να υπάρχει σωστή εκτίμηση της απόδοσης του φορτιστή, θεωρείται ότι η αρχική διαθέσιμη ενέργεια του δικτύου είναι E_{total} και είναι πεπερασμένη και σταθερή για όλες τις περιπτώσεις. Δηλαδή, λόγω του 4.1 η E_{total} , ανάλογα σε κάθε περίπτωση, διαμοιράζεται ανάμεσα στον φορτιστή και τους κόμβους του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατόν να διερευνηθεί καλύτερα αν οι μετρικές του δικτύου έχουν καλύτερη απόδοση με ή χωρίς τον φορτιστή και την διαδικασία φόρτισης. Αυτός ο συγκεκριμένος συμβιβασμός έχει σχέση με το ποσό της ενέργεια (σε σχέση με την ολική ενέργεια E_{total}) το οποίο θα διοχετευθεί αρχικά στον φορτιστή *MC*. Περισσότερη ενέργεια στον φορτιστή θα οδηγήσει σε καλύτερη διαχείριση της ενέργειας στο δίκτυο, αφού ο φορτιστής μπορεί να δώσει την ενέργεια εκεί που πραγματικά χρειάζεται (π.χ. σε ένα κρίσιμο μονοπάτι). Ωστόσο, λόγω της 4.1 περισσότερη ενέργεια στον *MC* θα σήμαινε ότι οι κόμβοι ξεκινάνε στο δίκτυο με μικρότερη αρχική ενέργεια, δηλαδή χωρίς να είναι πλήρως φορτισμένοι. Έτσι, θα είναι πολύ πιθανόν ότι θα τους τελειώσει η ενέργεια πριν ο φορτιστής *MC* τους φορτίσει, οδηγώντας έτσι σε πιθανές αποσυνδέσεις του δικτύου και χαμηλή κάλυψη της περιοχής από τους κόμβους.

Προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη κατανομή ενέργειας ανάμεσα στον φορτιστή και τους κόμβους στο κεφάλαιο 5 εκτελούνται μια σειρά από πειράματα με διάφορες αναλογίες ανάμεσα στην αρχική διαθέσιμη ενέργεια των κόμβων, $E_{sensors}$ και την αρχική διαθέσιμη ενέργεια του φορτιστή, E_{MC}^{init} . Όπως θα φανεί στο κεφάλαιο 5 η βέλτιστη αναλογία που βρέθηκε πειραματικά είναι 20% της αρχικής ενέργειας E_{total} να δοθεί στον φορτιστή και το υπόλοιπο 80% της ενέργειας να δοθεί στους κόμβους.

4.3.3 Διαδρομές του Φορτιστή

Η αποδοτική διαχείριση της ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων εξαρτάται σημαντικά και από τις διαδρομές που ακολουθεί ο φορτιστής. Παρακάτω παρουσιάζεται αρχικά μια διαδρομή η οποία έχει πλήρη γνώση (global knowledge) της κατάστασης του δικτύου, 3 διαδρομές οι οποίες χρησιμοποιούν μόνο τοπική πληροφορία ενώ η τελευταία που παρουσιάζεται όχι μόνο χρησιμοποιεί τοπική πληροφορία αλλά ταυτόχρονα έχει και προσαρμοστικό χαρακτήρα ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου.

4.3.3.1 Φορτιστής με Καθολική Γνώση

Ο φορτιστής καθολικής γνώσης (global-knowledge charger) ο οποίος μελετάται, αποτελεί ουσιαστικά έναν αλγόριθμο άμεσης απόκρισης (online algorithm) ο οποίος σε κάθε γύρο ελαχιστοποιεί το γινόμενο της ενέργειας του κάθε κόμβου με την απόστασή του από την τρέχουσα θέση του φορτιστή. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε γύρο ο φορτιστής καθολικής γνώσεις ελαχιστοποιεί το ακόλουθο γινόμενο:

$$P = \min \left\{ \left(1 + \frac{E_{curr}}{E_{init}} \right) \cdot \left(1 + \frac{dist_{curr}}{2R} \right) \right\}$$

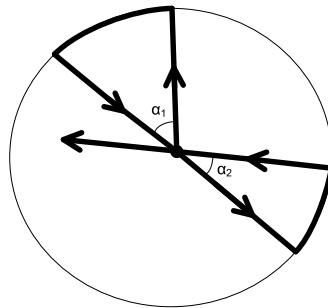
όπου E_{curr} , E_{init} και $dist_{curr}$ είναι αντίστοιχα η τρέχουσα ενέργεια, η αρχική ενέργεια και η απόσταση του κάθε κόμβου. Η ελάχιστη τιμή λαμβάνεται αφού γίνει η σύγκριση σε όλους τους κόμβους. Αφού η στρατηγική αυτή απαιτεί καθολική γνώση της κατάστασης του δικτύου, είναι αναμενόμενο να υπερτερεί κάθε άλλου αλγορίθμου που χρησιμοποιεί τοπική γνώση. Ωστόσο, τέτοιοι αλγόριθμοι δεν είναι κατάλληλοι για πραγματικά δίκτυα και δεν έχει καλή κλιμακωσιμότητα καθώς εισάγει πολύ μεγάλο επικοινωνιακό κόστος αφού κάθε κόμβος θα πρέπει να διαδώσει την τρέχουσα ενέργειά του σε κάθε γύρο.

4.3.3.2 Σπειροειδής Φορτιστής

Ο σπειροειδής φορτιστής ξεκινάει από την Πηγή και διανύει διαδρομή η οποία σχηματίζει ομόκεντρους κύκλους με κέντρο την Πηγή αλλά με αυξανόμενη ακτίνα. Επομένως σχηματίζει μία σπείρα μέχρις ότου φτάσει τα ακριανά όρια περιοχής του δικτύου. Στην συνέχεια ο MC ακολουθεί την ίδια διαδρομή αλλά με αντίθετη κατεύθυνση. Τα πλεονεκτήματα αυτής της κίνησης είναι ότι η σπείρα είναι ο μόνος ντετερμινιστικός αλγόριθμος ο οποίος μπορεί να καλύψει όλο το δίκτυο δίκαια, δηλαδή σχεδόν όλοι οι κόμβοι φορτίζονται από τον MC μέχρι να τελειώσει η διαθέσιμη ενέργεια του. Όμως, αυτή η κίνηση δεν είναι προσαρμοστική, δηλαδή δεν λαμβάνει υπόψιν διαφορές στον ρυθμό κατανάλωσης των κόμβων οι οποίες προκλήθηκαν από το εκάστοτε πρωτόκολλο δρομολόγησης που τρέχει.

4.3.3.3 Διαμετρικός Φορτιστής

Ο διαμετρικός φορτιστής αρχικά ξεκινάει από την Πηγή και επιλέγει τυχαία μια κατεύθυνση την οποία ακολουθεί μέχρι να φτάσει στα όρια της περιοχής του δικτύου, δηλαδή κινείται πάνω στην αντίστοιχη διάμετρο του δικτύου. Στην συνέχεια αφού έχει φτάσει στην περιμετρο του δικτύου, κινείται πάνω στην περιμετρο της περιοχής του δικτύου για d μοίρες, δηλαδή διανύει απόσταση ίση με $\frac{d}{2\pi}2\pi R = d \cdot R$ επάνω στην περιμετρο. Στην συνέχεια ξεκινάει να κινείται επάνω στην αντίστοιχη διάμετρο του δικτύου έως ότου φτάσει στην αντιδιαμετρική άκρη του δικτύου. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να τελειώσει η εναπομείνασα ενέργεια του φορτιστή. Προκειμένου οι διαδρομές που ακολουθεί ο φορτιστής να μην επικαλύπτονται, σε κάθε βήμα το d επιλέγεται τυχαία ομοιόμορφα στο διάστημα $(0, 90]$ μοιρών. Ακολουθώντας αυτή την διαδρομή ο MC καταφέρνει να φορτίσει όλους τους κόμβους που βρίσκονται μακριά αλλά και κοντά στην Πηγή. Ωστόσο, παρόλο που η διαδρομή είναι απλή, δεν είναι προσαρμοστική. Ένα στιγμιότυπο της διαδρομής φαίνεται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Ένα στιγμιότυπο του Διαμετρικού Φορτιστή.

4.3.3.4 Φορτιστής σε Τυχαίο Περίπατο

Ο φορτιστής σε τυχαίο περίπατο ακολουθεί τον τυφλό τυχαίο περίπατο (blind random walk). Σε κάθε νέο γύρο, η επόμενη κίνηση του φορτιστή είναι τυχαία, στοχαστικά ανεξάρτητη από κάθε προηγούμενη επιλογή. Δεδομένου της τρέχουσας θέσης του φορτιστή, έστω ο κόμβος i τότε η πιθανότητα μετάβασης σε οποιονδήποτε γείτονα j του κόμβου i είναι $p_{i,j} = \frac{1}{deg(i)}$. Η τροχιά αυτή είναι πολύ αποδοτική ως προς την έννοια ότι πιθανοτικά εγγυάται ότι τελικά όλο η περιοχή του δικτύου θα καλυφθεί και όλοι οι κόμβοι θα επισκεφθούν. Ωστόσο η απόδοσή της μειώνεται σε δίκτυα με περιοχές συμφόρησης ή με ειδικούς κόμβους (όπως κόμβους αρχηγούς σε ιεραρχικά πρωτόκολλα) και γενικά σε δίκτυα που υπάρχουν κόμβοι που εξυπηρετούν μεγαλύτερη κίνηση από άλλους κόμβους όπως συμβαίνει σε πολυ-βηματικά (multi-hop) πρωτόκολλα.

4.3.3.5 Προσαρμοστικός Φορτιστής

Δεδομένου της συμμετρίας του δικτύου, της ομοιόμορφης κατανομής, και της ομοιόμορφης γέννησης μηνυμάτων του δικτύου ο προσαρμοστικός φορτιστής ακολουθεί μια κυκλική τροχιά με κέντρο την Πηγή η οποία βρίσκεται στο κέντρο του

δικτύου. Η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς ποικίλει και προσαρμόζεται στην κατανάλωση ενέργειας της κάθε υποπεριοχής του δικτύου. Έστω S το σύνολο αυτών των κόμβων όπου $|S| = 2\pi R_{MC} \cdot \rho$. Έστω, επίσης, e_i ότι δηλώνει την τρέχουσα ενέργεια του κόμβου i . Ξεκινώντας από την Πηγή, ο κινητός φορτιστής διανύει μια διαδρομή η οποία σχηματίζει ομόκεντρους κύκλους με κέντρο την ίδια την Πηγή αλλά με ακτίνα η οποία αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα. Σε μια δεδομένη απόσταση από την Πηγή ο προσαρμοστικός φορτιστής καταγράφει την μέση τιμή της ενέργειας των κόμβων οι οποίοι βρίσκονται επάνω στην αντίστοιχη κυκλική τροχιά. Έστω η μέση ενέργεια όλων των κόμβων ότι είναι $\bar{E}_{current}$. Αντίστοιχα ο προσαρμοστικός φορτιστής κρατάει στην μνήμη του την μέση τιμή της ενέργειας των κόμβων που βρίσκονταν στην προηγούμενη κυκλική τροχιά του, έστω $\bar{E}_{previous}$. Χρησιμοποιώντας αυτές τις 2 τιμές ο προσαρμοστικός φορτιστής βελτιστοποιεί την κυκλική τροχιά του με κριτήριο την φόρτιση των κόμβων οι οποίοι καταναλώνουν την ενέργειά τους πιο γρήγορα.

Ο αλγόριθμος που εκτελεί ο προσαρμοστικός φορτιστής φαίνεται παρακάτω:

Αλγόριθμος 1 Προσαρμοστικός Φορτιστής

```

while  $E_{MC}^{curr} > 0$  do
     $E_{tmp} = 0$ 
    for every  $i \in S$  do
         $E_{tmp} += e_i^c$ 
        Charge until  $e_i \approx \frac{E_{MC}^{curr}}{E_{MC}^{init}} \cdot E_{sensor}^{max}$ 
    end for
     $\bar{E}_{current} = \frac{E_{tmp}}{|S|} = \frac{\sum e_i}{|S|}$ 
    if  $\bar{E}_{current} \approx \bar{E}_{init}$  then
        if  $\bar{E}_{previous} \geq \bar{E}_{current}$  then
            Keep direction
        else
            Change direction
        end if
    end if
end while

```

Ο προσαρμοστικός φορτιστής MC ξεκινάει να διασχίζει το δίκτυο από το κέντρο του θέτοντας $R_{MC} = 1$, δηλαδή θα επισκεφθεί όλους τους κόμβους που βρίσκονται 1-βήμα (1-hop) μακριά από την Πηγή. Μόλις όλοι αυτοί οι κόμβοι φορτιστούν, δηλαδή οι κόμβοι που συναντά ο MC έχουν ενέργεια $e_i = E_{sensor}^{max}$ ο MC αυξάνει την ακτίνα του R_{MC} επισκέπτοντας τους κόμβους που είναι 2-βήματα (2-hop) μακριά από την Πηγή. Συγκρίνοντας τις τιμές $\bar{E}_{current}$ και $\bar{E}_{previous}$ ο MC μπορεί να καταλάβει προς ποια περιοχή θα κινηθεί, δηλαδή προς την περιοχή η οποία έχει μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργεια. Συγκεκριμένα, αν $\bar{E}_{current} < \bar{E}_{previous}$ τότε ο MC υποθέτει ότι κινείται προς την σωστή περιοχή, δηλαδή αυτή στην οποία υπάρχει μεγάλο φορτίο. Αντίθετα αν $\bar{E}_{current} > \bar{E}_{previous}$ τότε ο MC αμέσως καταλαβαίνει ότι κινείται προς την λάθος περιοχή και έτσι αλλάζει κατεύθυνση.

5

Πειραματική Αξιολόγηση

Η πειραματική αξιολόγηση έγινε στην Matlab 7.11.0. Η πηγή τοποθετήθηκε στο κέντρο (0,0) της κυκλικής περιοχής ανάπτυξης των στατικών κόμβων. Για καλύτερα στατιστικά αποτελέσματα εφαρμόστηκε πολλές φορές η ανάπτυξη των στατικών κόμβων και κάθε πείραμα εκτελέστηκε 100 φορές. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων δηλώνουν πολύ μεγάλη συγκέντρωση γύρω από την μέση τιμή, επομένως στα σχεδιαγράμματα φαίνονται μόνο οι μέσες τιμές.

Για να αξιολογηθούν σωστά οι στρατηγικές και οι αλγόριθμοι που προτάθηκαν, η πειραματική αξιολόγηση γίνεται κάθε φορά σε 3 τελείως διαφορετικής φύσεως πρωτόκολλα δρομολόγησης που όμως το καθένα αντιπροσωπεύει την αντίστοιχη οικογένεια πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Τα πρωτόκολλα είναι το Greedy [87], το οποίο ουσιαστικά αποτελεί ένα πρωτόκολλο σαν το CTP (Collection Tree Protocol) το οποίο έχει μια δενδρική μορφή, το LEACH [31] το οποίο αποτελεί ένα ιεραρχικό με συστάδες πρωτόκολλο και το E_i [40] το οποίο αποτελεί ένα πρωτόκολλο εξισορρόπησης ενέργειας.

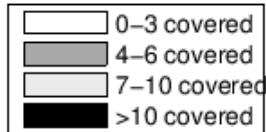
Αφού οι N κόμβοι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε μία κυκλική περιοχή \mathcal{A} ακτίνας R εφαρμόστηκε ένα γνωστό κατώφλι συνδεσιμότητας προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα των γεννημένων τυχαίων στιγμάτυπων να είναι συνδεδεμένα. Πιο συγκεκριμένα, αφού $\mathcal{A} \subset \mathbb{R}^2$, ένα στιγμάτυπο του μοντέλου τυχαίων γεωμετρικά γραφημάτων (random geometric graphs) $\mathcal{G}(\mathcal{X}_N; r)$ κατασκευάζεται ως εξής: επιλέγονται N σημεία \mathcal{X}_N ομοιόμορφα τυχαία στο \mathcal{A} . Το σύνολο $V = \mathcal{X}_N$ είναι το σύνολο των κορυφών του γράφου και δύο κορυφές συνδέονται αν οι ευκλείδειες αποστάσεις τους είναι το πολύ r . Στα [88, 89] δείχνεται ότι το κατώφλι συνδεσιμότητας για τα $\mathcal{G}(\mathcal{X}_N; r)$ είναι $r_c = \sqrt{\frac{\ln N}{\pi N}}$. Σε αυτή την εργασία θεωρούνται τυχαία στιγμάτυπα από $\mathcal{G}(\mathcal{X}_N; r)$ με ποικίλη πυκνότητα, επιλέγοντας $r = \sqrt{\frac{c \ln N}{\pi N}}$, για διάφορες τιμές του $c > 1$, το οποίο εγγυάται ότι το παραγόμενο τυχαίο στιγμάτυπο είναι συνδεδεμένο με μεγάλη πιθανότητα. Καθόλη την διάρκεια των πειραμάτων η παράμετρος c είναι σταθερή με μεγαλύτερες τιμές για το Greedy πρωτόκολλο γιατί είναι πιο επιφρεπή σε γρηγορότερες αποσυνδέσεις.²

Αφού το δίκτυο είναι αρκετά πυκνό, θεωρείται ότι κάθε μετάδοση κοστίζει r^2 σε μονάδες ενέργειας, όπου r είναι ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου. Αφού οι κόμβοι καθώς και η γέννηση γεγονότων είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, η μέση τιμή των βημάτων (hops) που χρειάζονται για ένα γεγονός να ταξιδέψει από τον πρώτο κόμβο που το ανίχνευσε μέχρι την Πηγή είναι $\frac{R}{2} \cdot \frac{1}{r}$. Επομένως, η μέση ενέργεια που καταναλώθηκε για την δρομολόγηση ενός γεγονότος από τον πρώτο κόμβο μέχρι

την Πηγή είναι $r^2 \frac{R}{2r} = \frac{rR}{2}$ και για την συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε στο δίκτυο είναι $E_{total} = \frac{\mu r R}{2}$, όπου μ είναι ο αριθμός των γεγονότων. Στα πειράματα δόθηκε ενέργεια ίση με $E_{total} = \frac{h\mu r R}{4}$, για $h > 1$ προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι οι κόμβοι πεθαίνουν μετά από αρκετούς γύρους.

Τα πειράματα επικεντρώνονται στις ακόλουθες μετρικές απόδοσης:

- **Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου**, δηλαδή ο αριθμός των κόμβων που έχουν εναπομείνασα ενέργεια που τους καθιστά ικανούς να λειτουργούν, κατά την διάρκεια εκτέλεσης ενός πειράματος
- **Συνδεσιμότητα κατά την πάροδο του χρόνου**, δηλαδή ο μέσος βαθμός (ο μέσος αριθμός γειτόνων) του κάθε κόμβου κατά την διάρκεια εκτέλεσης ενός πειράματος
- **Χρονοκάλυψη**, δηλαδή ο μέσος αριθμός κάλυψης (coverage) του δικτύου από κόμβους 1000 τυχαίων σημείων δίκτυο κατά την πάροδο του χρόνου. Στα γραφήματα τα χρώματα υποδηλώνουν τον αριθμό κάλυψης του σημείου σύμφωνα με την εικόνα 5.1.
- **Ενεργειακός χάρτης του δικτύου**, ο οποίος είναι μια απεικόνιση του συνολικού δικτύου που εμφανίζονται οι σχετικές ενέργειες των κόμβων



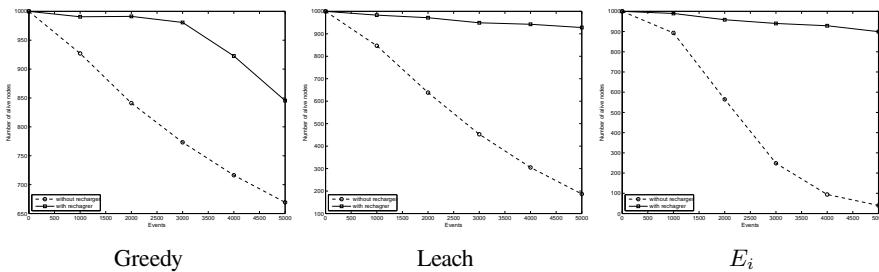
Εικόνα 5.1: Ο μέσος αριθμός κάλυψης των σημείων σε χρώματα.

Στην πειραματική αξιολόγηση ερευνώνται οι στρατηγικές που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο 4 ώστε να βρεθεί η βέλτιστη στρατηγική και οι αντίστοιχοι παράμετροι ενέργειας στους κόμβους και στον κινητό φορτιστή με κύριο στόχο την μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του δικτύου. Στα 3 πρώτες σειρές πειραμάτων χρησιμοποιείται ο προσαρμοστικός φορτιστής ο οποίος διαισθητικά είναι και ο καλύτερος. Στην τελευταία σειρά πειραμάτων, αφού βρεθούν οι κατάλληλες παράμετροι κατανομής της ενέργειας για το δίκτυο, ο προσαρμοστικός φορτιστής συγκρίνεται με τους υπόλοιπους φορτιστές.

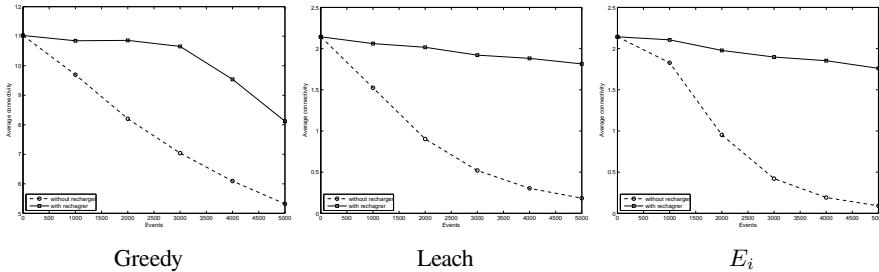
5.1 Με και Χωρίς Φόρτιση

Η πρώτη σειρά από πειράματα αφορά την σύγκριση του δικτύου με φόρτιση και του δικτύου χωρίς φόρτιση. Όταν επιλέγεται το δίκτυο να είναι χωρίς φόρτιση τότε η συνολική ενέργεια του δικτύου κατανέμεται όλη στους στατικούς κόμβους του δικτύου, δηλαδή ο κάθε κόμβος ξεκινάει με το 100% της αρχικής του ενέργειας. Αντίθετα όταν επιλέγεται το δίκτυο να είναι με φόρτιση, δηλαδή με έναν κινητό φορτιστή που φορτίζει τους κόμβους, η συνολική ενέργεια κατανέμεται ανάμεσα στους στατικούς κόμβους και τον κινητό φορτιστή. Οι στατικοί κόμβοι σε αυτή την περίπτωση δεν ξεκινάνε με πλήρη αρχική ενέργεια αλλά με ένα ποσοστό της αρχικής ενέργειας. Στο πείραμα αυτό, καθώς δεν έχει βρεθεί η βέλτιστη αναλογία ενέργειας ανάμεσα στον κινητό φορτιστή και τους στατικούς κόμβους,

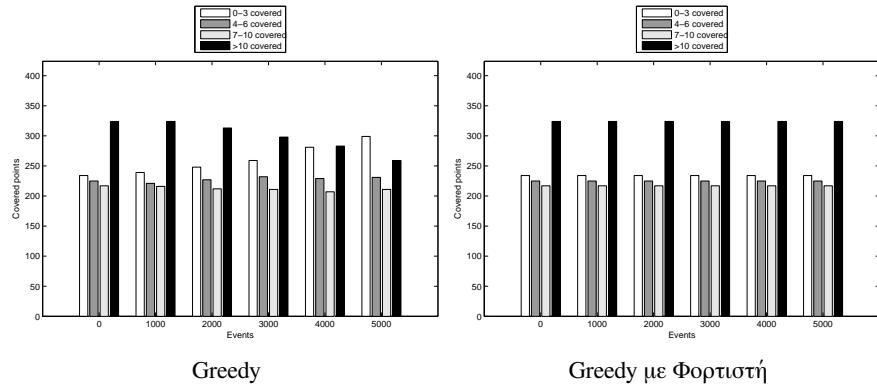
οι τελευταίοι ξεκινάνε με το με το 60% της αρχικής τους ενέργειας και επομένως ο φορτιστής κατέχει αρχικά το 40% της αρχικής ολικής ενέργειας του δικτύου. Χρησιμοποιείται ο προσαρμοστικός φορτιστής. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στις εικόνες 5.2, 5.3, 5.46, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 και 5.9. Η διαισθητική εικόνα που αφήνουν τα αποτελέσματα είναι ότι δίνοντας ένα μέρος της συνολικής αρχικής ενέργειας του δικτύου στον φορτιστή, ακόμα και χωρίς να έχει βελτιστοποιηθεί το μέγεθος που δίνεται, υπάρχουν σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα σε όλες τις μετρικές.



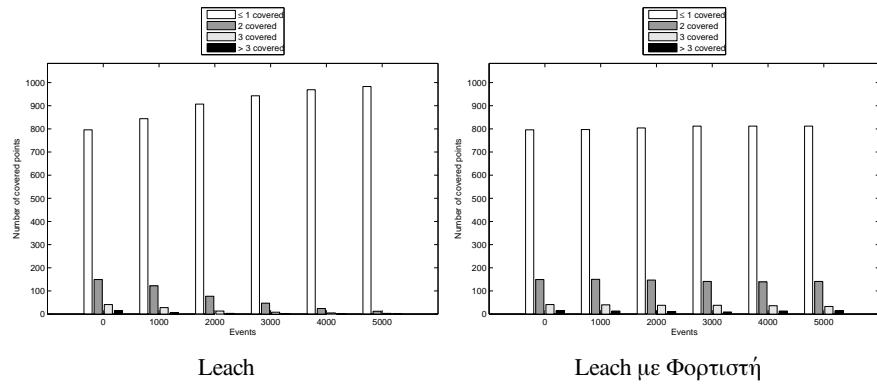
Εικόνα 5.2: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου. Η συνεχόμενη γραμμή αντιστοιχεί στο δίκτυο με κινητό φορτιστή. Γίνεται εμφανές ότι υπάρχει αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου αν δοθεί μέρος της συνολικής ενέργειας στον φορτιστή (εδώ δόθηκε 40%).



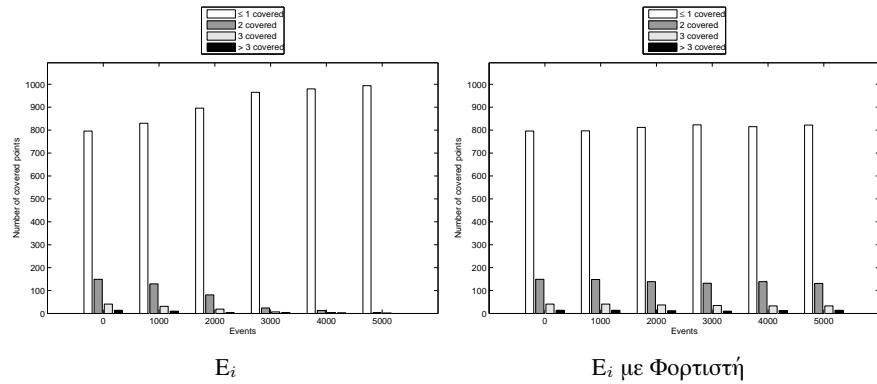
Εικόνα 5.3: Συνδεσιμότητα κατά την πάροδο του χρόνου. Η συνεχόμενη γραμμή αντιστοιχεί στο δίκτυο με κινητό φορτιστή. Υπάρχει σημαντική αύξηση της συνδεσιμότητας του δικτύου αν δοθεί μέρος της συνολικής ενέργειας στον φορτιστή (εδώ δόθηκε 40%).



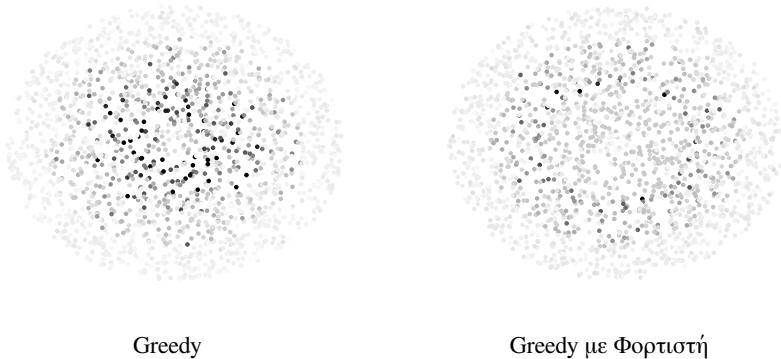
Εικόνα 5.4: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Greedy. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη κάλυψη των σημείων του δικτύου.



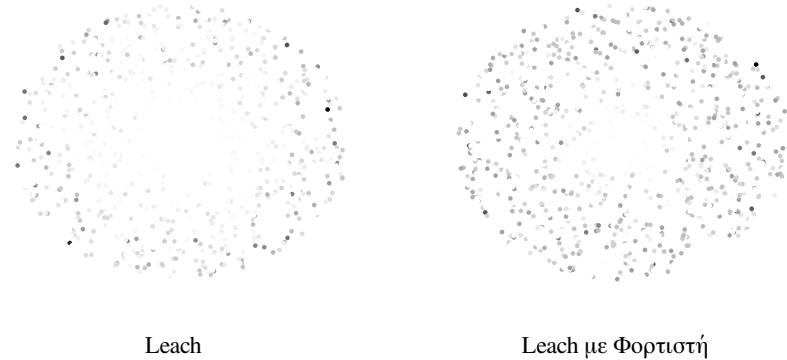
Εικόνα 5.5: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Leach. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη κάλυψη των σημείων του δικτύου.



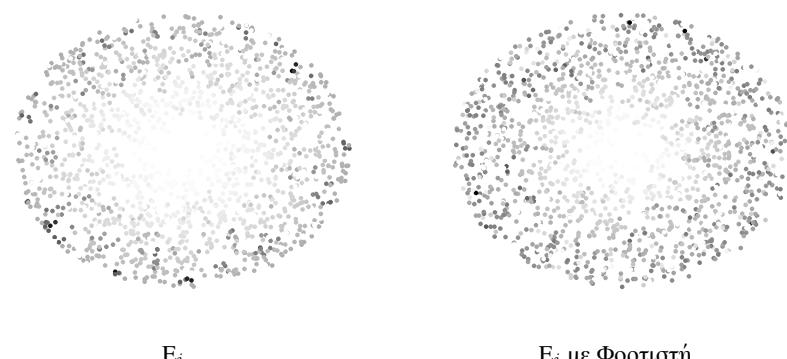
Εικόνα 5.6: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο E_i . Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη κάλυψη των σημείων του δικτύου.



Εικόνα 5.7: Ενεργειακός χάρτης του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Greedy. Όσο πιο μαύρο τόσο λιγότερη ενέργεια έχει ο κόμβος. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη εξισορρόπηση ενέργειας.



Εικόνα 5.8: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Leach. Όσο πιο μαύρο τόσο λιγότερη ενέργεια έχει ο κόμβος. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη εξισορρόπηση ενέργειας.



Εικόνα 5.9: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο E_i . Όσο πιο μαύρο τόσο λιγότερη ενέργεια έχει ο κόμβος. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη εξισορρόπηση ενέργειας.

Όπως φαίνεται και από τα σχεδιαγράμματα, στην περίπτωση που στο δίκτυο χρησιμοποιείται φόρτιση, αυτό έχει μεγαλύτερο χρόνο ζωής αφού ο φορτιστής επιλέγει να δώσει την ενέργεια εκεί που πραγματικά την χρειάζεται.

5.2 Ολική και Μερική Φόρτιση

Η πρώτη παραμετροποίηση ή στρατηγική της διαδικασίας της φόρτισης που μελετάται είναι μέχρι ποιο επίπεδο θα πρέπει ο κινητός φορτιστής να φορτίζει τους στατικούς κόμβους. Οι 2 στρατηγικές που συγκρίνονται είναι:

- **Ολική φόρτιση**, δηλαδή σε κάθε καινούργια φόρτιση ο φορτιστής φορτίζει

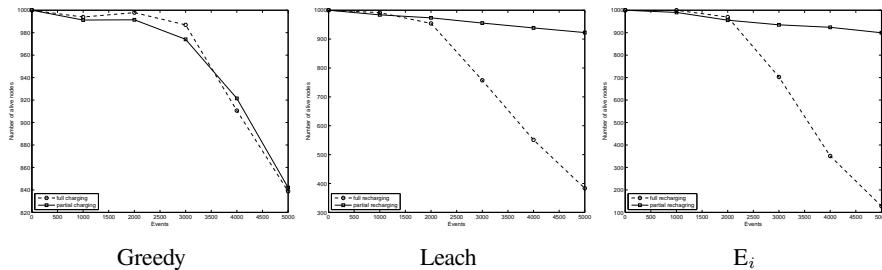
μέχρις ότου ο στατικός κόμβος να ανακτήσει πλήρως την αρχική του ενέργεια

- **Μερική φόρτιση**, δηλαδή σε κάθε καινούργια φόρτιση ο φορτίζει μέχρις ότου για την ενέργεια του στατικού κόμβου e_i ισχύει ότι

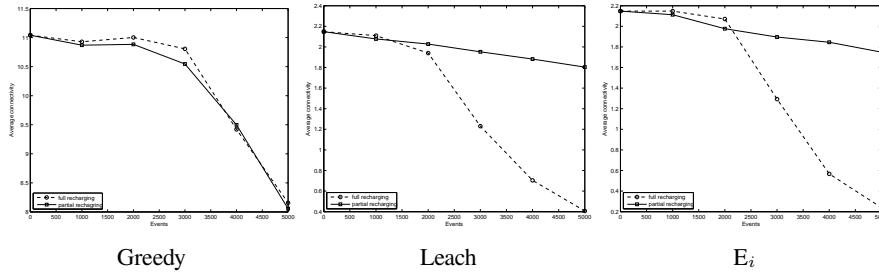
$$e_i \approx \frac{E_{MC}^{curr}}{E_{MC}^{init}} \cdot E_{sensor}^{max}$$

όπου E_{MC}^{curr} , E_{MC}^{init} η τρέχουσα ενέργεια και αρχική ενέργεια του κινητού φορτιστή ενώ E_{sensor}^{max} η αρχική ενέργεια ενός στατικού κόμβου.

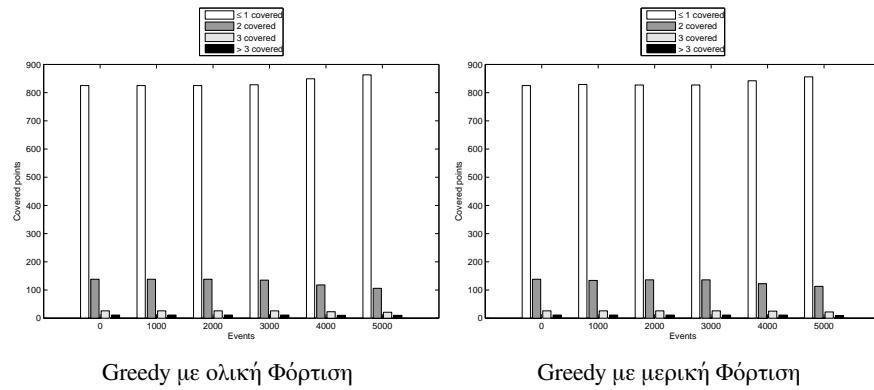
Ξανά οι στατικοί κόμβοι σε αυτή την περίπτωση δεν ξεκινάνε με πλήρη αρχική ενέργεια αλλά με ένα ποσοστό της αρχικής ενέργειας, και συγκεκριμένα με το 60% της αρχικής τους ενέργειας και επομένως ο φορτιστής κατέχει αρχικά το 40% της αρχικής ολικής ενέργειας του δικτύου. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στις εικόνες 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 και 5.14. Η στρατηγική της μερικής φόρτισης κερδίζει την στρατηγική της ολικής φόρτισης στα πρωτόκολλα Leach και E_i ενώ χάνει για πολύ λίγο στο πρωτόκολλο Greedy. Αυτό συμβαίνει επειδή στο πρωτόκολλο Greedy, υπάρχει ένας μικρός αριθμός κόμβων, αυτοί που είναι κοντά στην πηγή, οι οποίοι έχουν πολύ μεγάλο ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας. Επομένως φορτίζοντάς τους πλήρως είναι πιο πιθανόν να μείνουν ζωντανοί μέχρι να ξανάρθει σε αυτούς ο φορτιστής. Αντίθετα στα 2 άλλα πρωτόκολλα, τα οποία παράγουν ένα πιο εξισορροπημένο, ενεργειακά, δίκτυο η στρατηγική της πλήρης φόρτιση ξοδεύει πολύ πιο γρήγορα την πολύτιμη ενέργεια του φορτιστή και ενώ κερδίζει αρχικά, μόλις τελειώσει η ενέργεια του φορτιστή, το οπόιο συμβαίνει γρήγορα, οι κόμβοι του δικτύου αρχίζουν και πεθαίνουν.



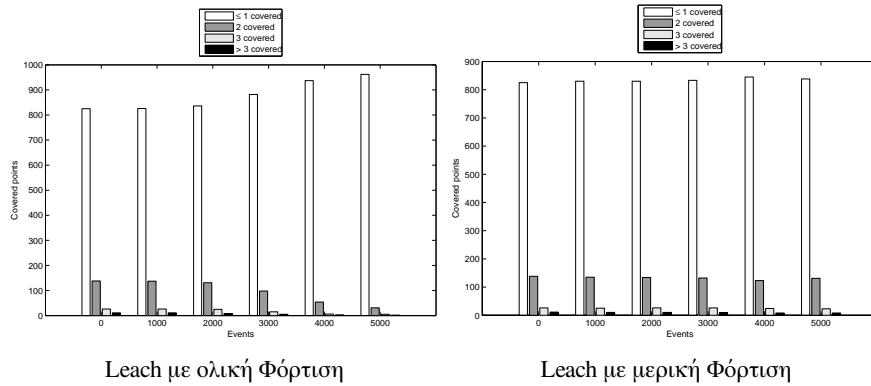
Εικόνα 5.10: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου. Η συνεχόμενη γραμμή αντιστοιχεί στην μερική φόρτιση. Στο Greedy πρωτόκολλο, η πλήρης φόρτιση έχει ελάχιστα καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ρυθμός κατανάλωσης των κόμβων που είναι κοντά στην Πηγή είναι πολύ μεγάλος και επομένως συμφέρει να φορτίζονται πλήρως. Αντίθετα στα άλλα 2 πρωτόκολλα, η μερική φόρτιση υπερνικάει την στρατηγική της πλήρους φόρτισης.



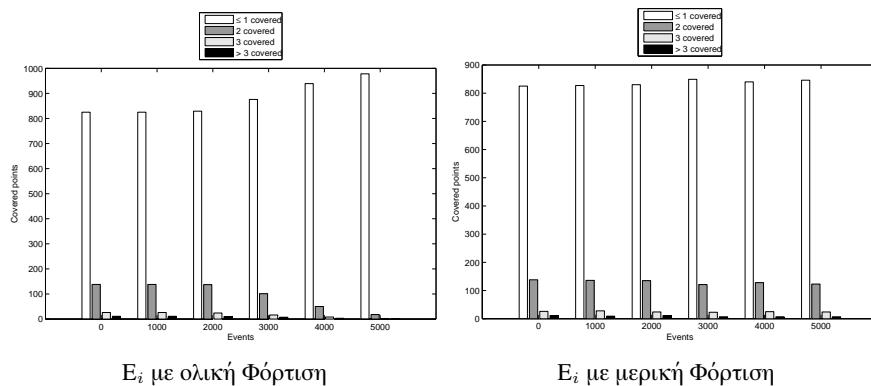
Εικόνα 5.11: Συνδεσιμότητα κατά την πάροδο του χρόνου. Η συνεχόμενη γραμμή αντιστοιχεί στην μερική φόρτιση. Στο Greedy πρωτόκολλο, η πλήρης φόρτιση έχει ελάχιστα καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ρυθμός κατανάλωσης των κόμβων που είναι κοντά στην Πηγή είναι πολύ μεγάλος και επομένως με την μερική φόρτιση οι κόμβοι πεθαίνουν πιο γρήγορα και το δίκτυο αποσυνδέεται. Αντίθετα στα άλλα 2 πρωτόκολλα, η μερική φόρτιση υπερνικάει την στρατηγική της πλήρους φόρτισης.



Εικόνα 5.12: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Greedy. Οι δύο στρατηγικές έχουν παρόμοια αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ρυθμός κατανάλωσης των κόμβων που είναι κοντά στην Πηγή είναι πολύ μεγάλος και επομένως η στρατηγική της μερικής φόρτισης δεν αποδίδει καλά.



Εικόνα 5.13: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Leach. Είναι εμφανές ότι η στρατηγική της μερικής φόρτισης έχει καλύτερα αποτελέσματα.

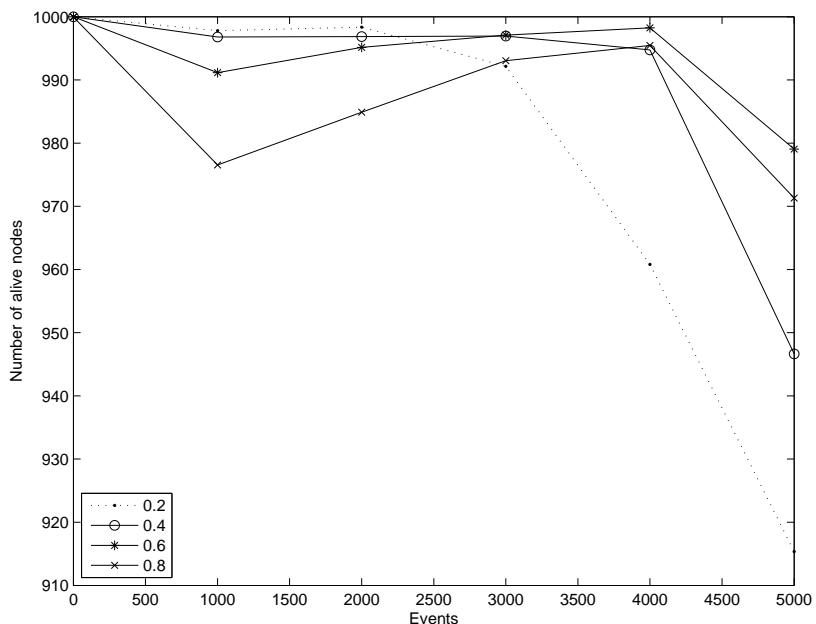


Εικόνα 5.14: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο E_i . Είναι εμφανές ότι η στρατηγική της μερικής φόρτισης έχει καλύτερα αποτελέσματα.

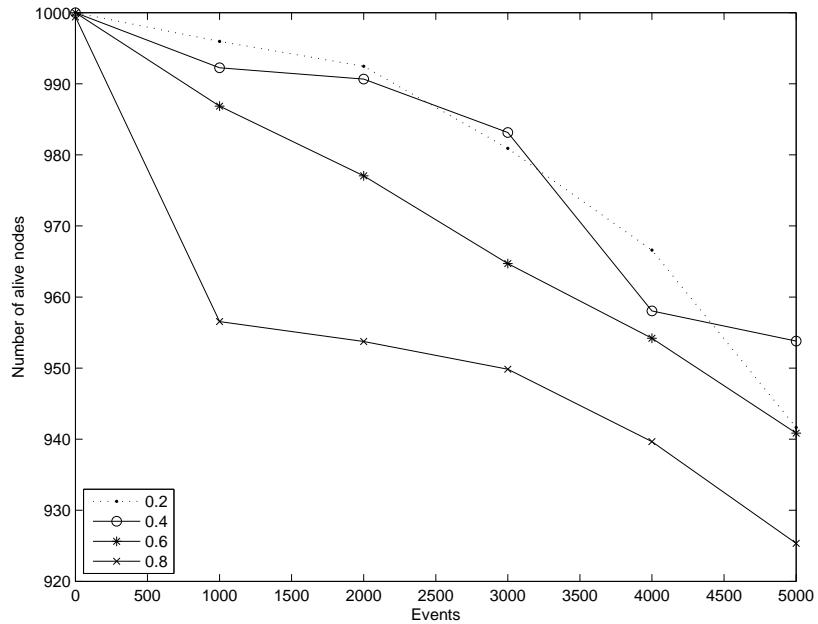
5.3 Ποσοστό Ενέργειας στον Φορτιστή

Η επόμενη παραμετροποίηση που εξερευνάται είναι η βέλτιστη κατανομή ενέργειας ανάμεσα στον κινητό φορτιστή και τους στατικούς κόμβους σε σχέση με την συνολική αρχική ενέργεια που διατίθεται στο δίκτυο. Διεξάχθηκαν πειράματα με διάφορες κατανομές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα με το 20%, 40%, 60%, και 80% της συνολικής αρχικής ενέργειας να δίνεται στον κινητό φορτιστή και το υπόλοιπο στους στατικούς κόμβους. Χρησιμοποιήθηκε ο προσαρμοστικός φορτιστής. Η πειραματική αξιολόγηση έδειξε ότι ένα ποσοστό κοντά στο 20% είναι η πιο αποδοτική στρατηγική. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στις εικόνες 5.15, 5.16 και 5.17. Στο Greedy πρωτόκολλο 5.15, καθώς ένα μικρό μέρος του δικτύου έχει πολύ μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, μια στρατηγική που θα δίνει στον φορτιστή το 60% της συνολικής αρχικής ενέργειας του δικτύου φαίνεται να

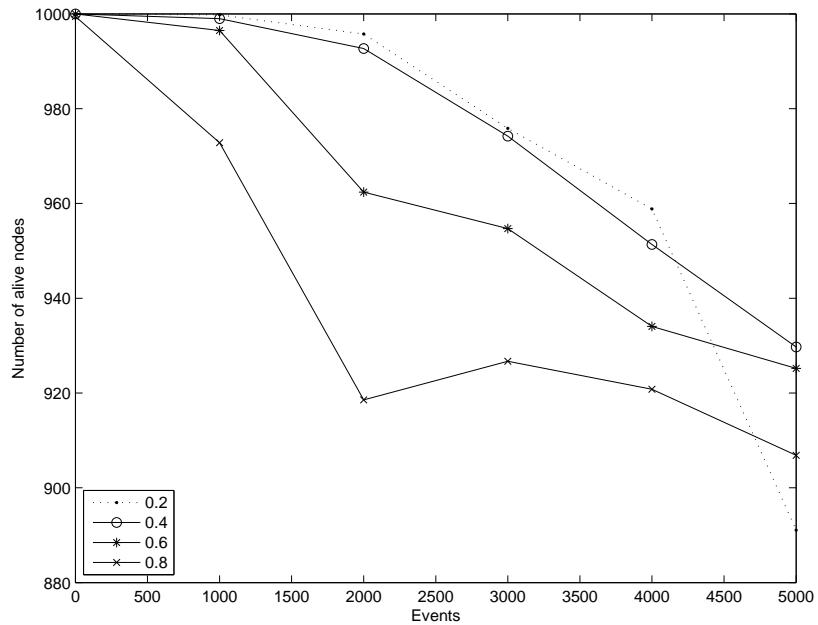
είναι η πιο αποδοτική. Επίσης φαίνεται στην περίπτωση που δοθεί 80% στον φορτιστή, στην αρχή πεθαίνουν πολλοί κόμβοι (καθώς έχουν μόνο το 20% της ενέργειάς τους) αλλά μετά από λίγο ο φορτιστής μπορεί και το επαναφέρει, κυρίως λόγω της φύσης του πρωτοκόλλου (λίγοι κόμβοι με μεγάλο ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας). Αντίθετα στα πρωτόκολλα Leach 5.16 και E_i 5.17 μια στρατηγική που δίνει το 20%-30% της αρχικής ενέργειας στον φορτιστή φαίνεται να είναι η βέλτιστη. Επίσης φαίνεται ότι όταν ο φορτιστής έχει το 80% της ενέργειας επειδή τα πρωτόκολλα έχουν καλύτερη εξισορρόπηση ενέργειας, ο φορτιστής δεν μπορεί να επαναφέρει το δίκτυο καθώς οι κόμβοι πεθαίνουν πιο κοντά ο ένας στον άλλον από ότι στο Greedy πρωτόκολλο.



Εικόνα 5.15: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο Greedy πρωτόκολλο με ποικίλα ποσοστά ενέργειας στον κινητό φορτιστή. Μία ποσότητα κοντά στο 60% στον φορτιστή φαίνεται να είναι η βέλτιστη, κυρίως λόγω της φύσης του πρωτοκόλλου.



Εικόνα 5.16: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο Leach πρωτόκολλο με ποικίλα ποσοστά ενέργειας στον κινητό φορτιστή. Μία ποσότητα κοντά στο 30% στον φορτιστή φαίνεται να είναι η βέλτιστη.



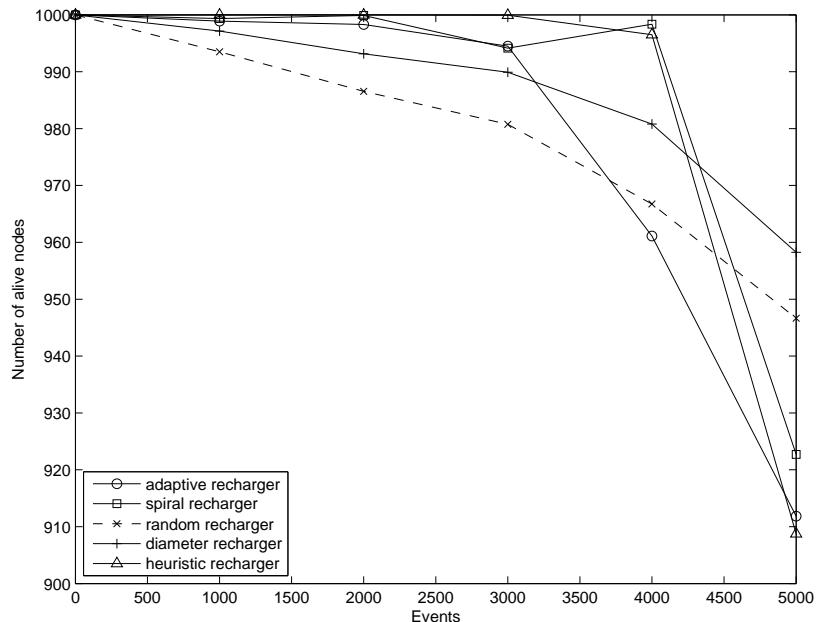
Εικόνα 5.17: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο E_i πρωτόκολλο με ποικίλα ποσοστά ενέργειας στον κινητό φορτιστή. Μία ποσότητα κοντά στο 30% στον φορτιστή φαίνεται να είναι η βέλτιστη.

5.4 Σύγκριση Διαδρομών Φορτιστή

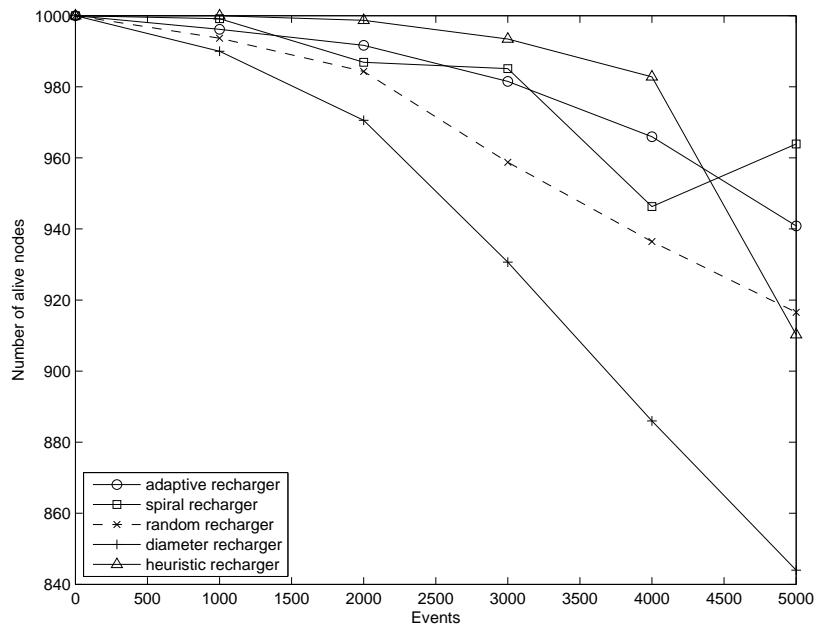
Αφού έχουν βρεθεί οι βέλτιστες στρατηγικές για τον κινητό φορτιστή (μερική φόρτιση, 20% της αρχικής ενέργειας), σε αυτήν την ενότητα συγκρίνεται ο προσαρμοστικός φορτιστής με τον αλγόριθμο καθολικής γνώσης καθώς και με τους υπόλοιπους αφελής αλγορίθμους. Στην πίνακα 5.1 φαίνονται οι διαδρομές που καλύπτει ο κάθε φορτιστής. Όπως φαίνεται ο προσαρμοστικός φορτιστής είναι πολύ κοντά στον φορτιστή καθολικής γνώσεις όσον αφορά την απόσταση που διανύει. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στις εικόνες 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 και 5.23. Από τα αποτελέσματα διακρίνεται ότι ο προσαρμοστικός φορτιστής, ενώ χρησιμοποιεί μόνο τοπική πληροφορία, τα πάει αρκετά καλά ειδικά στις περιπτώσεις των πρωτοκόλλων Leach και E_i .

Φορτιστής	Greedy	E_i	LEACH
Καθολικής Γνώσης	48974	64330	57458
Σπειροειδής	64167	64167	64167
Τυχαίος Περίπατος	181135	222462	222447
Διαμετρικός	152252	172734	173169
Προσαρμοστικός	42412	37856	38641

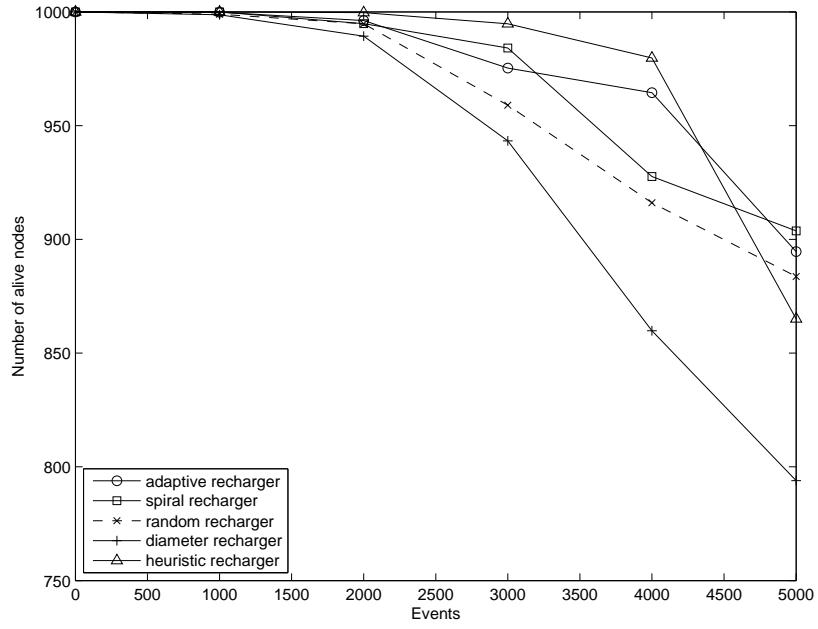
Πίνακας 5.1: Απόσταση που διήνυσε κάθε κινητός φορτιστής



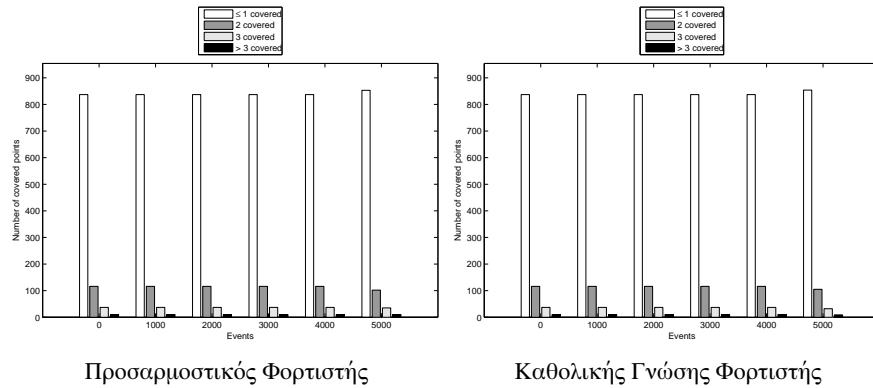
Εικόνα 5.18: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο Greedy πρωτόκολλο για τις διάφορες διαδρομές του κινητού φορτιστή. Χρησιμοποιείται μερική φόρτιση και έχει δοθεί το 20% της ενέργειας στον φορτιστή.



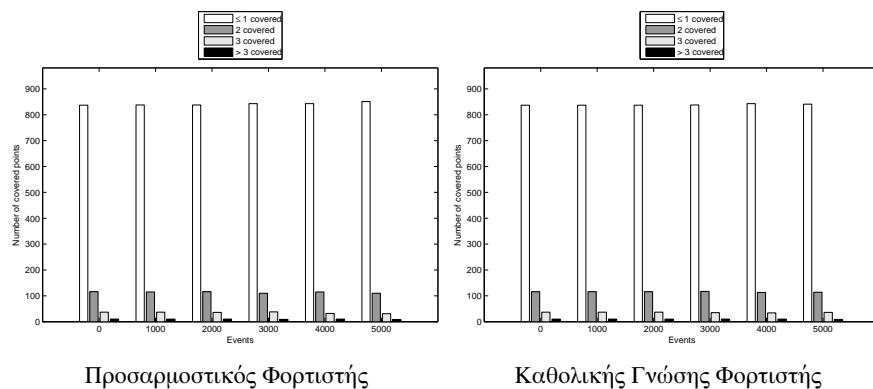
Εικόνα 5.19: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο Leach πρωτόκολλο για τις διάφορες διαδρομές του κινητού φορτιστή. Χρησιμοποιείται μερική φόρτιση και έχει δοθεί το 20% της ενέργειας στον φορτιστή.



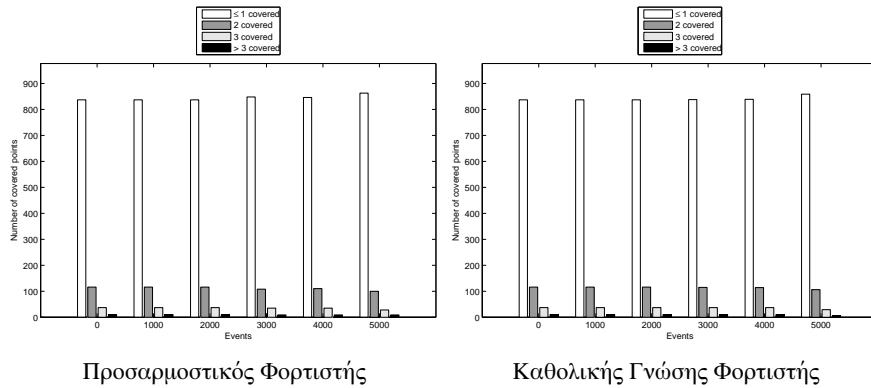
Εικόνα 5.20: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο E_i πρωτόκολλο για τις διάφορες διαδρομές του κινητού φορτιστή. Χρησιμοποιείται μερική φόρτιση και έχει δοθεί το 20% της ενέργειας στον φορτιστή.



Εικόνα 5.21: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Greedy. Χρησιμοποιείται μερική φόρτιση και έχει δοθεί το 20% της ενέργειας στον φορτιστή.



Εικόνα 5.22: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Leach. Χρησιμοποιείται μερική φόρτιση και έχει δοθεί το 20% της ενέργειας στον φορτιστή.

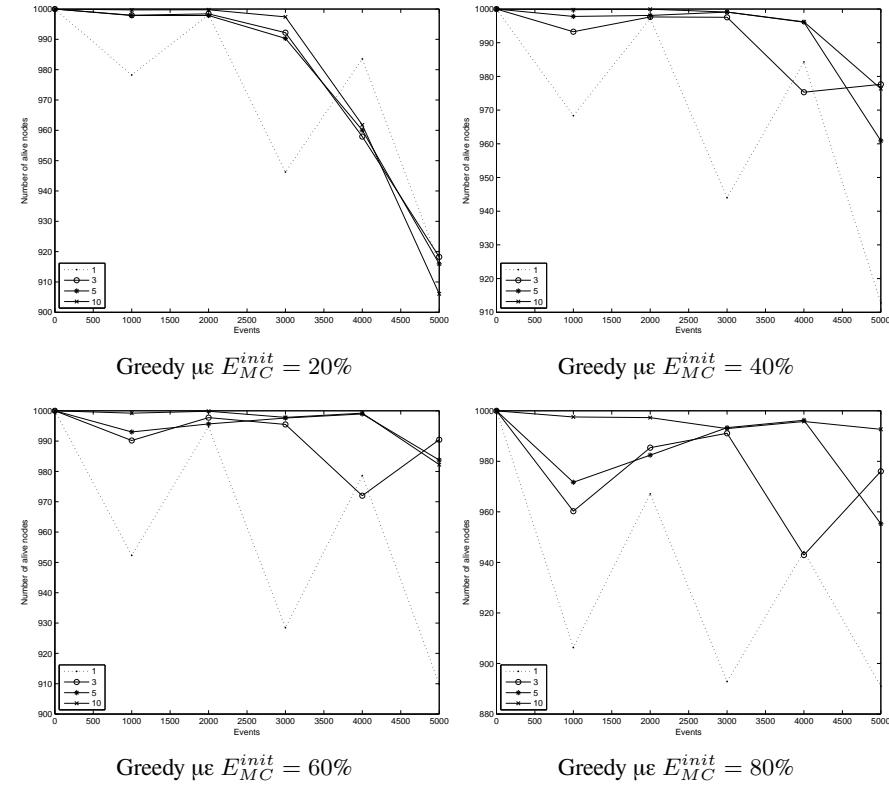


Εικόνα 5.23: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο E_i . Χρησιμοποιείται μερική φόρτιση και έχει δοθεί το 20% της ενέργειας στον φορτιστή.

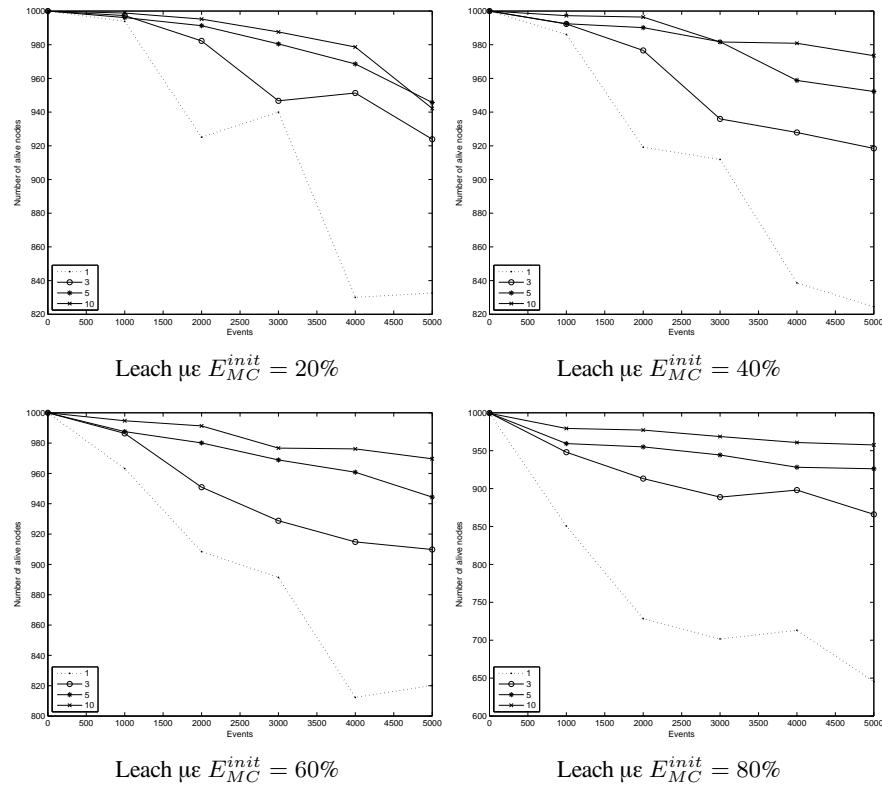
5.5 Παραμετροποιώντας την Τεχνολογία Φόρτισης

Αφού έχουν μελετηθεί όλοι οι παράμετροι (πολιτική φόρτισης, αναλογία ενέργειας, διαδρομές) του δικτύου που βελτιστοποιούν τον χρόνο ζωής του, σε αυτό το σημείο θα γίνει μια πειραματική αξιολόγηση της τεχνολογίας της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Συγκεκριμένα στα πειράματα μέχρι τώρα είχε υποτεθεί ότι ο φορτιστής μπορεί να φορτίζει μέχρι και 5 στατικούς μέχρι να γεννηθεί καινούργιο μήνυμα σε έναν κόμβο. Αυτό όμως είναι δεν είναι πάντα εφαρμόσιμο και εξαρτάται από την εκάστοτε τεχνολογία.

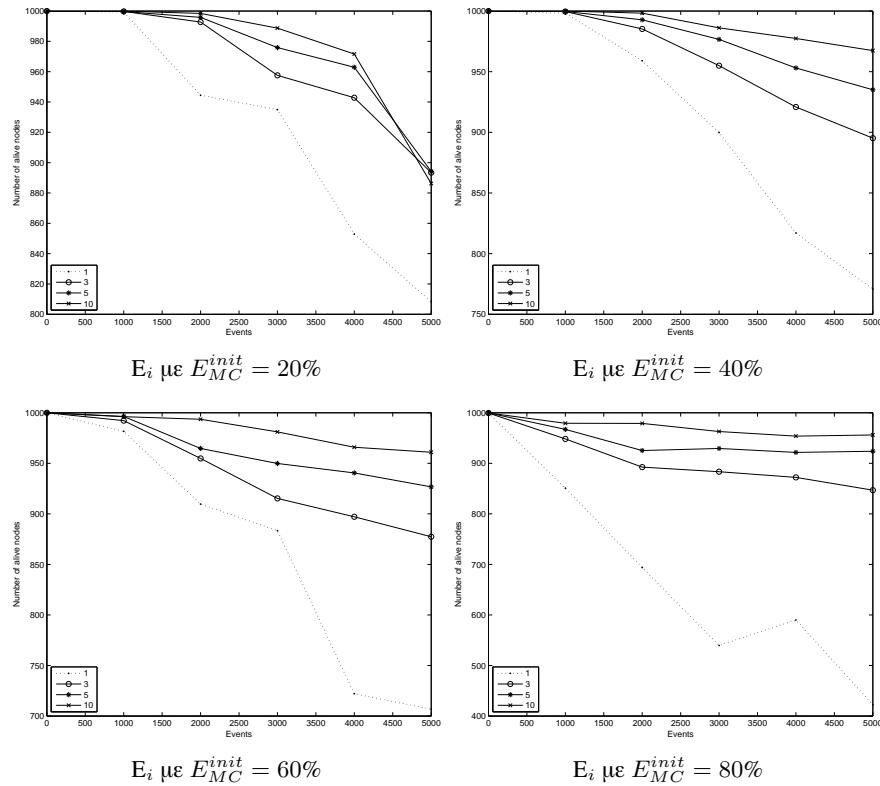
Σε αυτή την σειρά πειραμάτων θα μελετηθεί το κατώτερο όριο της τεχνολογίας της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας το οποίο εξασφαλίζει την επέκταση του χρόνου ζωής του δικτύου. Διεξάχθηκαν πειράματα με διάφορες κατανομές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα με το 20%, 40%, 60%, και 80% της συνολικής αρχικής ενέργειας να δίνεται στον κινητό φορτιστή και το υπόλοιπο στους στατικούς κόμβους. Χρησιμοποιήθηκε ο προσαρμοστικός φορτιστής. Επίσης όπως και στα προηγούμενα πειράματα, ο αριθμός των κόμβων είναι 1000. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες 5.24, 5.24, 5.24 τα οποία δείχνουν ότι το κατώτερο όριο για να υπάρχει κέρδος της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας αυτής στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει ο κινητός φορτιστής να είναι ικανός να φορτίζει τουλάχιστον 3 κόμβους ανά ένα καινούργιο πακέτο που δημιουργείται μέσα στο δίκτυο.



Εικόνα 5.24: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου για το Greedy πρωτόκολλο για διάφορες αποδόσεις της τεχνολογίας (αναλογία των αριθμού των κόμβων που φορτίζει ο φορτιστής ως προς τον αριθμό των μηνυμάτων που δημιουργούνται στο ίδιο χρονικό διάστημα στο δίκτυο) και για διάφορα ποσοστά αρχικής ενέργειας που δίνονται στον κινητό φορτιστή. Από τις εικόνες φαίνεται ότι θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη τεχνολογία ώστε ο φορτιστής να μπορεί να φορτίζει τουλάχιστον 3 κόμβους ανά ένα καινούργιο μήνυμα που απαιτεί πολύ βηματική δρομολόγηση.



Εικόνα 5.25: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου για το Leach πρωτόκολλο για διάφορες αποδόσεις της τεχνολογίας (αναλογία των αριθμού των κόμβων που φορτίζει ο φορτιστής ως προς τον αριθμό των μηνυμάτων που δημιουργούνται στο ίδιο χρονικό διάστημα στο δίκτυο) και για διάφορα ποσοστά αρχικής ενέργειας που δίνονται στον κινητό φορτιστή. Από τις εικόνες φαίνεται ότι θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη τεχνολογία ώστε ο φορτιστής να μπορεί να φορτίζει τουλάχιστον 3 κόμβους ανά ένα καινούργιο μήνυμα που απαιτεί πολύ βηματική δρομολόγηση.



Εικόνα 5.26: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου για το E_i πρωτόκολλο για διάφορες αποδόσεις της τεχνολογίας (αναλογία του αριθμού των κόμβων που φορτίζει ο φορτιστής ως προς τον αριθμό των μηνυμάτων που δημιουργούνται στο ίδιο χρονικό διάστημα στο δίκτυο) και για διάφορα ποσοστά αρχικής ενέργειας που δίνονται στον κινητό φορτιστή. Από τις εικόνες φαίνεται ότι θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη τεχνολογία ώστε ο φορτιστής να μπορεί να φορτίζει τουλάχιστον 3 κόμβους ανά ένα καινούργιο μήνυμα που απαιτεί πολύ βηματική δρομολόγηση.

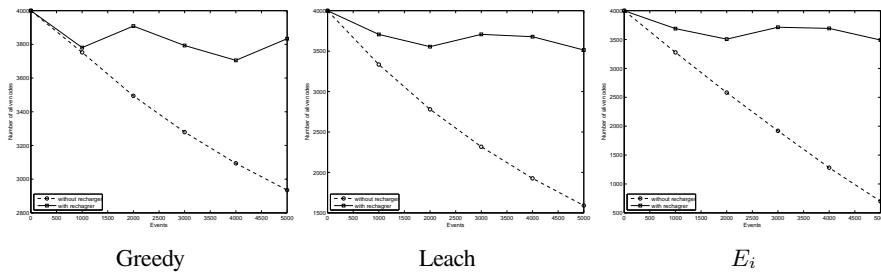
5.6 Αυξάνοντας τον αριθμό των κόμβων

Σε αυτό το πείραμα, ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται δραματικά. Συγκεκριμένα από 1000 κόμβους που ήταν στα προηγούμενα πειράματα, ο αριθμός των κόμβων γίνεται 4000. Ο κινητός φορτιστής πλέον τώρα έχει να εξυπηρετήσει 4 φορές παραπάνω κόμβους. Το πείραμα αυτό προσπαθεί να διαπιστώσει αν η αρχιτεκτονική του δικτύου που σχεδιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες έχει κάποια όρια στην εξυπηρέτηση των κόμβων.

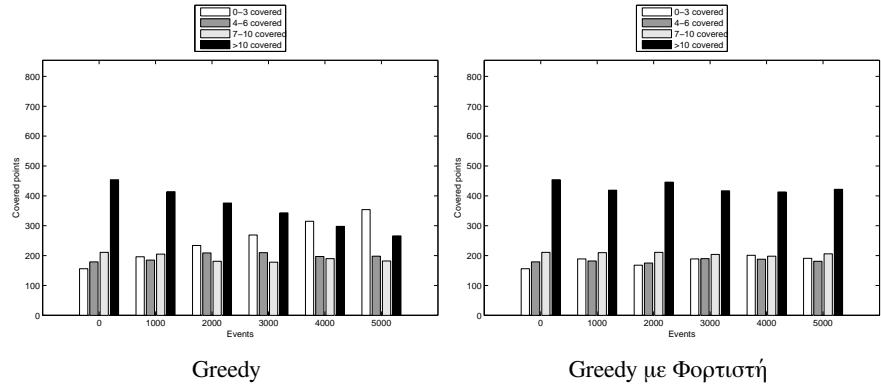
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι γενικώς ο φορτιστής μπορεί να βελτιώσει τις μετρικές του δικτύου αλλά σε περιορισμένο βαθμό και φυσικά με μικρότερη απόδοση σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα και τους 1000 κόμβους. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων στην εικόνα 5.27, ο κινητός φορτιστής επεκτείνει τον χρόνο ζωής του δικτύου αλλά εμφανίζεται μια μικρή αστάθεια ως προς το πλήθος των ζωντανών κόμβων κατά την διάρκεια του χρόνου ζωής του δικτύου. Αυτό

προϊδεάζει ότι η απόδοση του κινητού φορτιστή θα είναι χειρότερη σε αυτή την σειρά των πειραμάτων σε σχέση με τις προηγούμενες λόγω του αυξημένου αριθμού των κόμβων και δημιουργεί νέα κατεύθυνση έρευνας που θα διαχειρίζεται πολλαπλούς κινητούς κόμβους για καλύτερη διαχείριση της συνολικής ενέργειας του δικτύου.

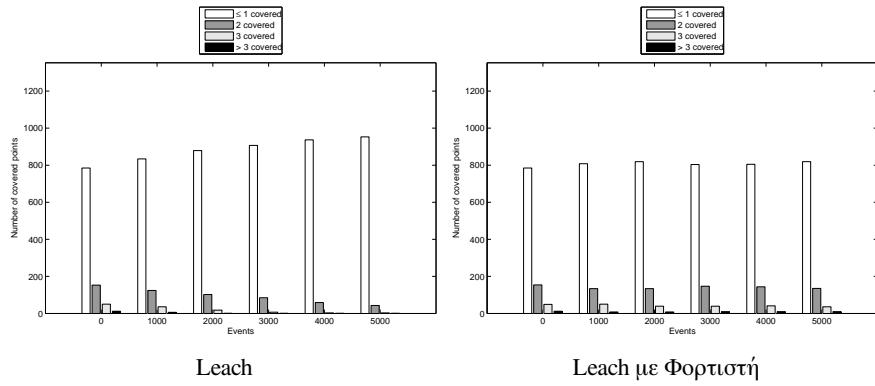
5.6.1 Με και Χωρίς Φόρτιση



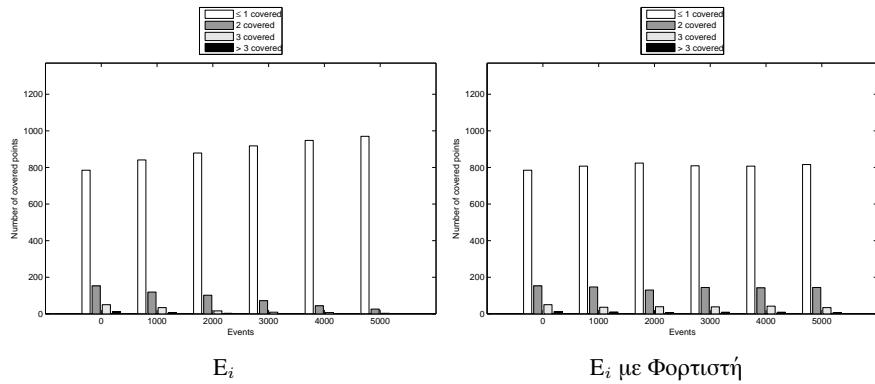
Εικόνα 5.27: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου. Η συνεχόμενη γραμμή αντιστοιχεί στο δίκτυο με κινητό φορτιστή. Γίνεται εμφανές ότι γενικά υπάρχει αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου αν δοθεί μέρος της συνολικής ενέργειας στον φορτιστή αλλά δεν υπάρχει τόση καλή ισορροπία όπως στις μετρήσεις της ενότητας 5.1.



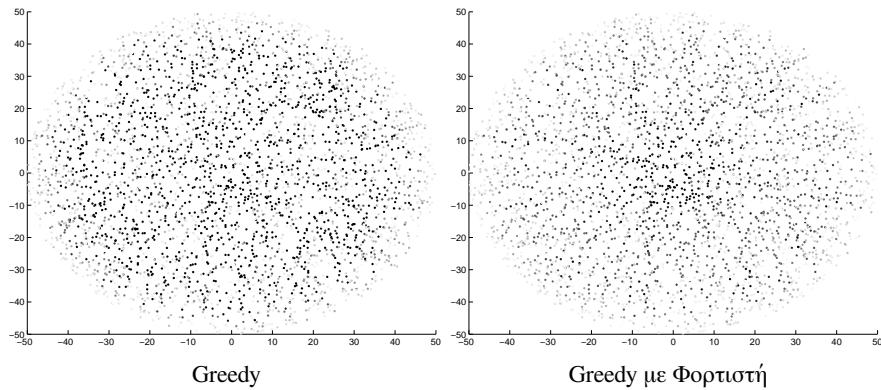
Εικόνα 5.28: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Greedy. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη κάλυψη των σημείων του δικτύου.



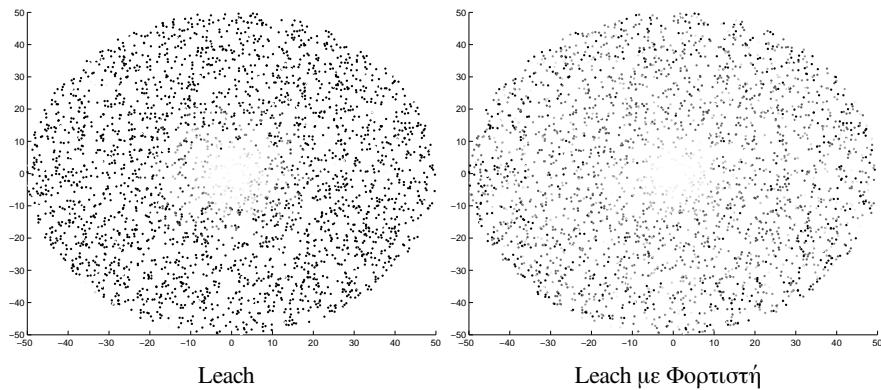
Εικόνα 5.29: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Leach. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη κάλυψη των σημείων του δικτύου.



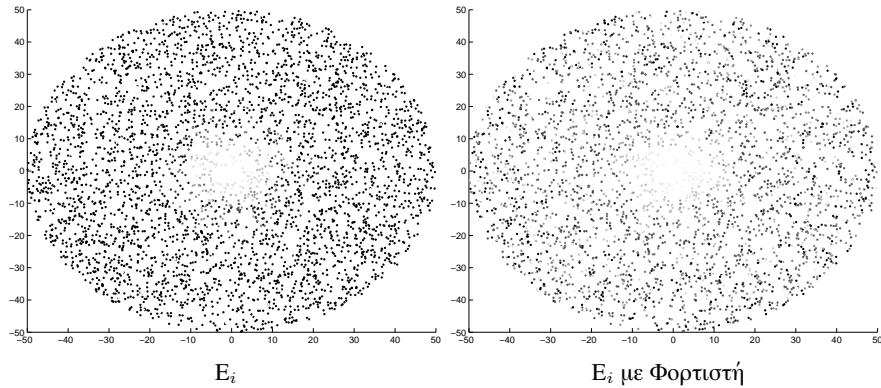
Εικόνα 5.30: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο E_i . Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη κάλυψη των σημείων του δικτύου.



Εικόνα 5.31: Ενεργειακός χάρτης του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Greedy. Όσο πιο μαύρο τόσο λιγότερη ενέργεια έχει ο κόμβος. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη εξισορρόπηση ενέργειας.

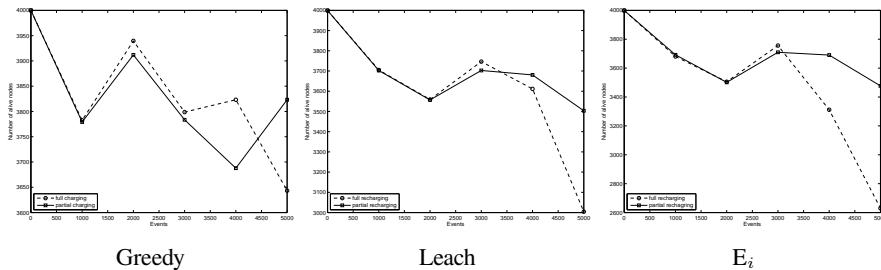


Εικόνα 5.32: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Leach. Όσο πιο μαύρο τόσο λιγότερη ενέργεια έχει ο κόμβος. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη εξισορρόπηση ενέργειας.

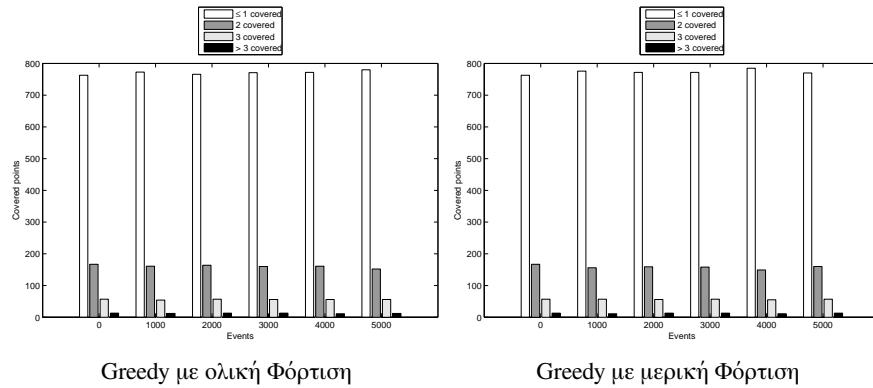


Εικόνα 5.33: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο E_i . Όσο πιο μαύρο τόσο λιγότερη ενέργεια έχει ο κόμβος. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις φαίνεται ότι στο δίκτυο με φορτιστή υπάρχει καλύτερη εξισορρόπηση ενέργειας.

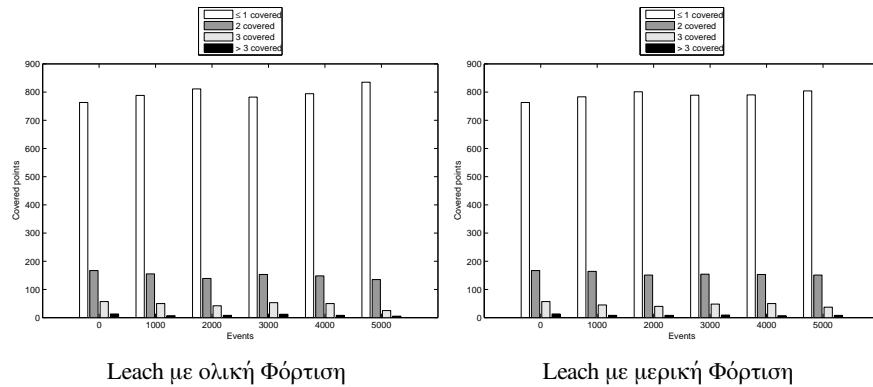
5.6.2 Ολική και Μερική Φόρτιση



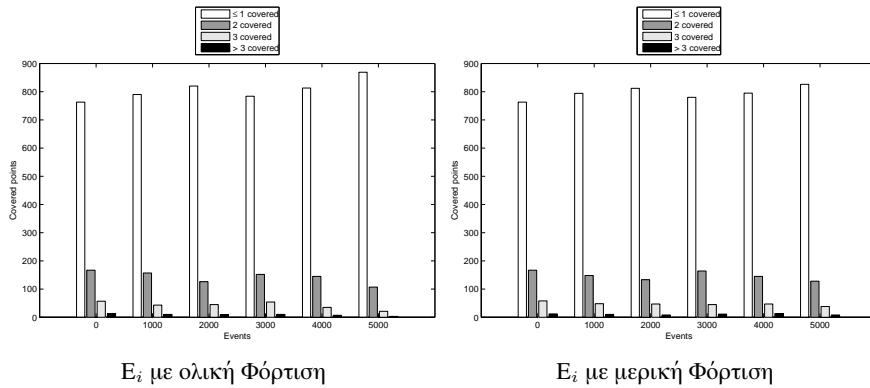
Εικόνα 5.34: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου. Η συνεχόμενη γραμμή αντιστοιχεί στην μερική φόρτιση. Στο Greedy πρωτόκολλο, η πλήρης φόρτιση έχει ελάχιστα καλύτερα αποτελέσματα και έρχεται σε αντιστοίχιση με την εικόνα 5.10. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ρυθμός κατανάλωσης των κόμβων που είναι κοντά στην Πηγή είναι πολύ μεγάλος και επομένως συμφέρει να φορτίζονται πλήρως. Αντίθετα στα άλλα 2 πρωτόκολλα, η μερική φόρτιση υπερτερεί της στρατηγικής της πλήρους φόρτισης αλλά χωρίς μεγάλη διαφορά όπως στην περίπτωση των 1000 κόμβων. Επίσης φαίνεται και οι "κοιλιά" που κάνει το δίκτυο στην αρχή λόγω της αδυναμίας του κινητού φορτιστή να εξυπηρετήσει τον μεγάλο αριθμό των κόμβων.



Εικόνα 5.35: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Greedy. Οι δύο στρατηγικές έχουν παρόμοια αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ρυθμός κατανάλωσης των κόμβων που είναι κοντά στην Πηγή είναι πολύ μεγάλος και επομένως η στρατηγική της μερικής φόρτισης δεν αποδίδει καλά.

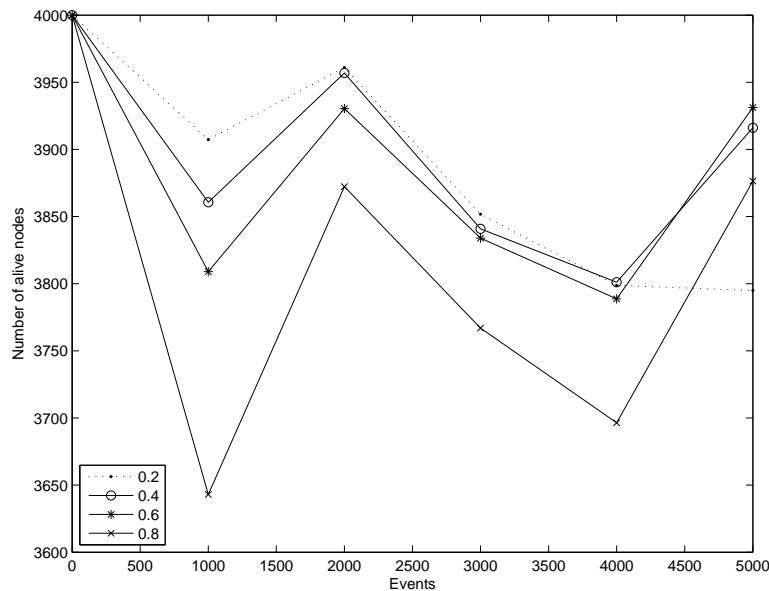


Εικόνα 5.36: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο Leach. Δεν είναι εμφανές ποια στρατηγική έχει καλύτερα λόγω του μεγάλου αριθμού κόμβων.

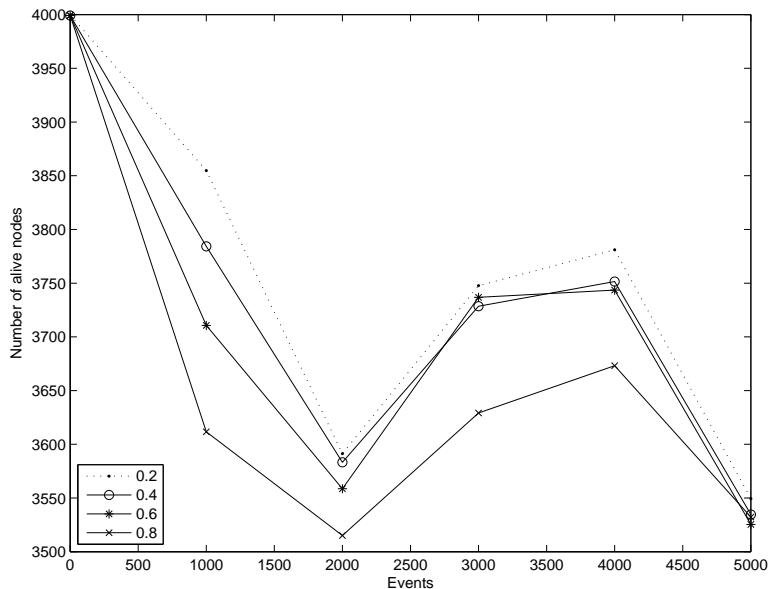


Εικόνα 5.37: Κάλυψη του δικτύου κατά την πάροδο του χρόνου για το πρωτόκολλο E_i . Δεν είναι εμφανές ποια στρατηγική έχει καλύτερα λόγω του μεγάλου αριθμού κόμβων.

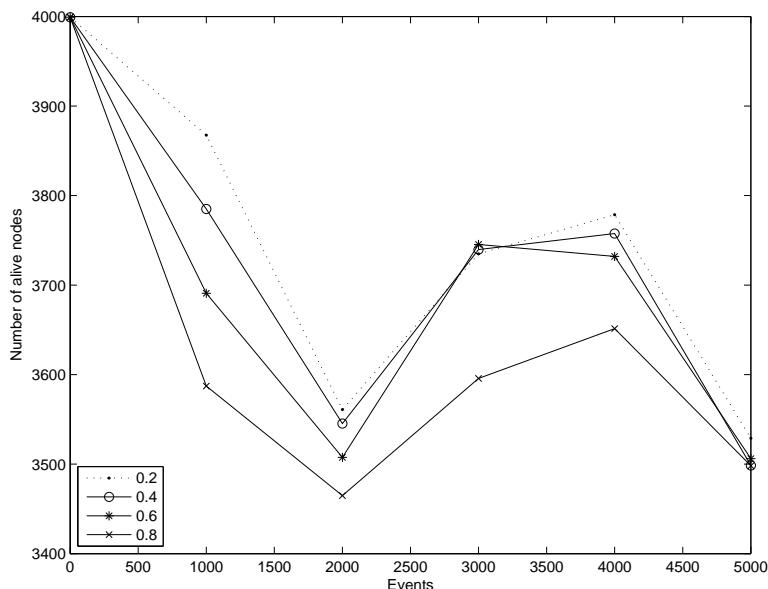
5.6.3 Ποσοστό Ενέργειας στον Φορτιστή



Εικόνα 5.38: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο Greedy πρωτόκολλο με ποικίλα ποσοστά ενέργειας στον κινητό φορτιστή. Στη γραφική αυτή φαίνεται ξεκάθαρα η ανικανότητα του κινητού φορτιστή να διαχειριστεί αποδοτικά μεγάλο μέρος της συνολικής ενέργειας του δικτύου λόγω μεγάλου αριθμού κόμβων.

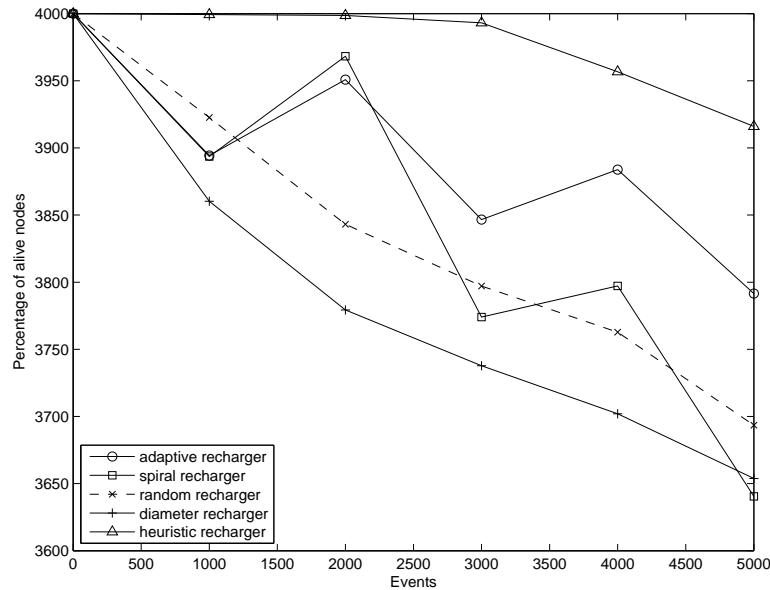


Εικόνα 5.39: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο Leach πρωτόκολλο με ποικίλα ποσοστά ενέργειας στον κινητό φορτιστή. Στη γραφική αυτή φαίνεται ξεκάθαρα η ανικανότητα του κινητού φορτιστή να διαχειριστεί αποδοτικά μεγάλο μέρος της συνολικής ενέργειας του δικτύου λόγω μεγάλου αριθμού κόμβων.

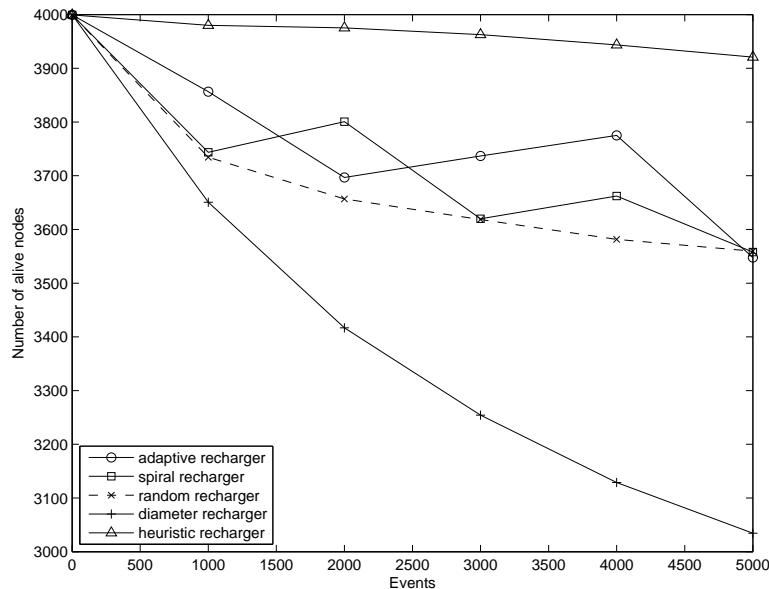


Εικόνα 5.40: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο E_i πρωτόκολλο με ποικίλα ποσοστά ενέργειας στον κινητό φορτιστή. Στη γραφική αυτή φαίνεται ξεκάθαρα η ανικανότητα του κινητού φορτιστή να διαχειριστεί αποδοτικά μεγάλο μέρος της συνολικής ενέργειας του δικτύου λόγω μεγάλου αριθμού κόμβων.

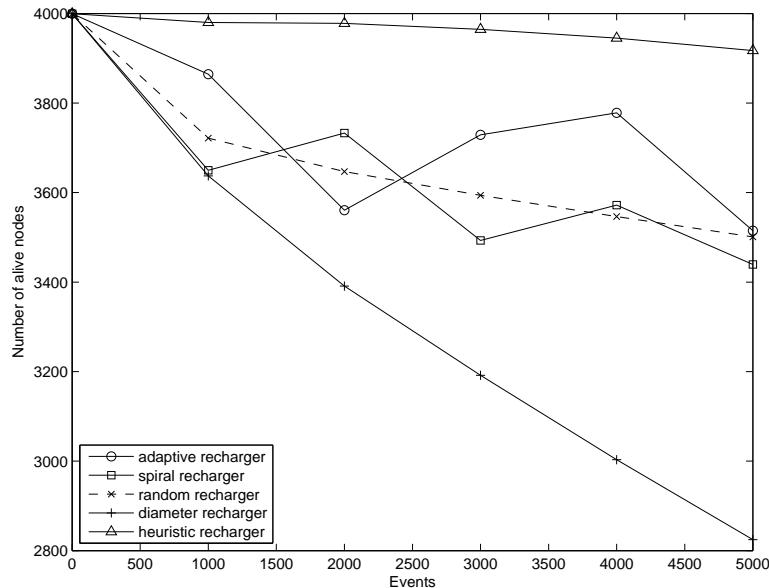
5.6.4 Σύγκριση Διαδρομών Φορτιστή



Εικόνα 5.41: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο Greedy πρωτόκολλο για τις διάφορες διαδρομές του κινητού φορτιστή με μερική φόρτιση και 20% της ενέργειας. Ο τυχαίος περίπατος έχει συγκρίσιμη απόδοση με τους υπόλοιπους που σημαίνει ότι δεν υπάρχει καλή διαχείριση ενέργειας.

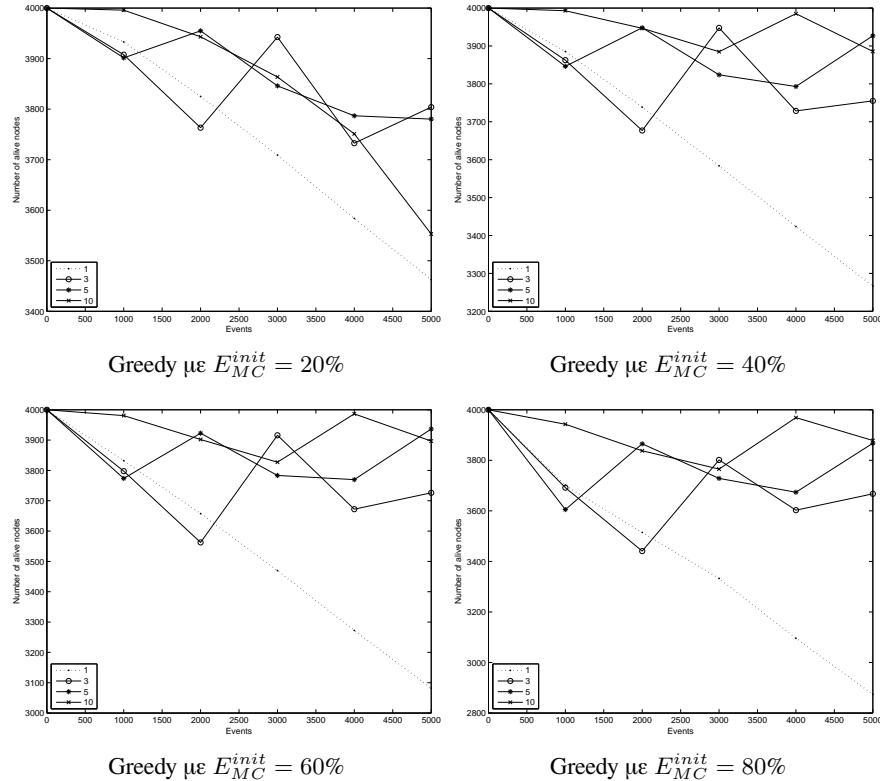


Εικόνα 5.42: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο Leach πρωτόκολλο για τις διάφορες διαδρομές του κινητού φορτιστή με μερική φόρτιση και 20% της ενέργειας. Ο τυχαίος περίπατος έχει συγκρίσιμη απόδοση με τους υπόλοιπους που σημαίνει ότι δεν υπάρχει καλή διαχείριση ενέργειας.

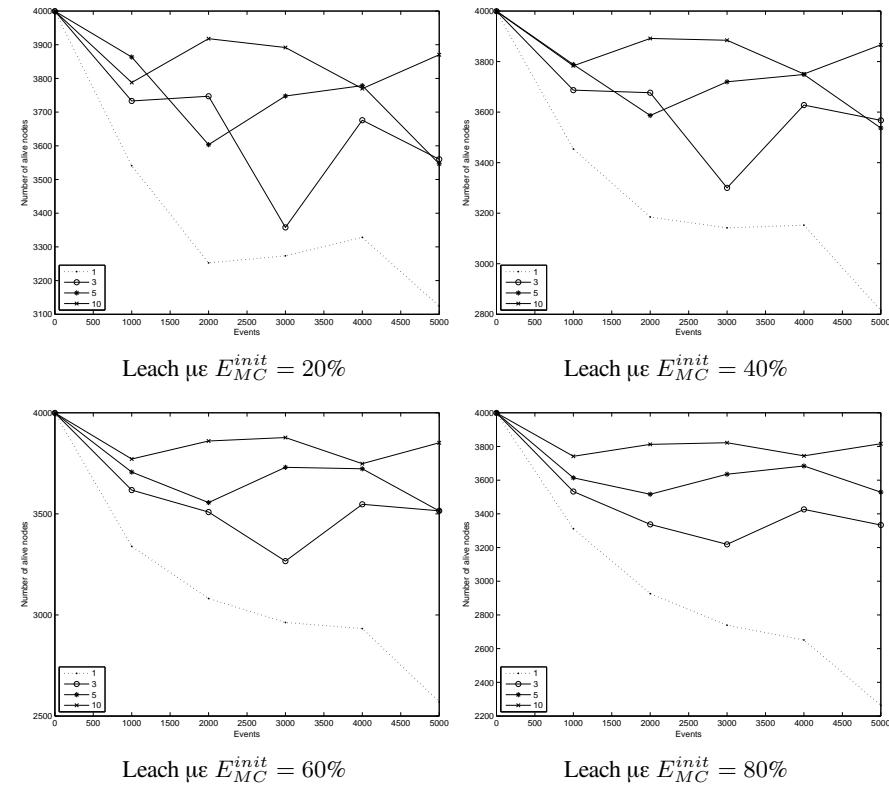


Εικόνα 5.43: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου στο E_i πρωτόκολλο για τις διάφορες διαδρομές του κινητού φορτιστή με μερική φόρτιση και 20% της ενέργειας. Ο τυχαίος περίπατος έχει συγκρίσιμη απόδοση με τους υπόλοιπους που σημαίνει ότι δεν υπάρχει καλή διαχείριση ενέργειας.

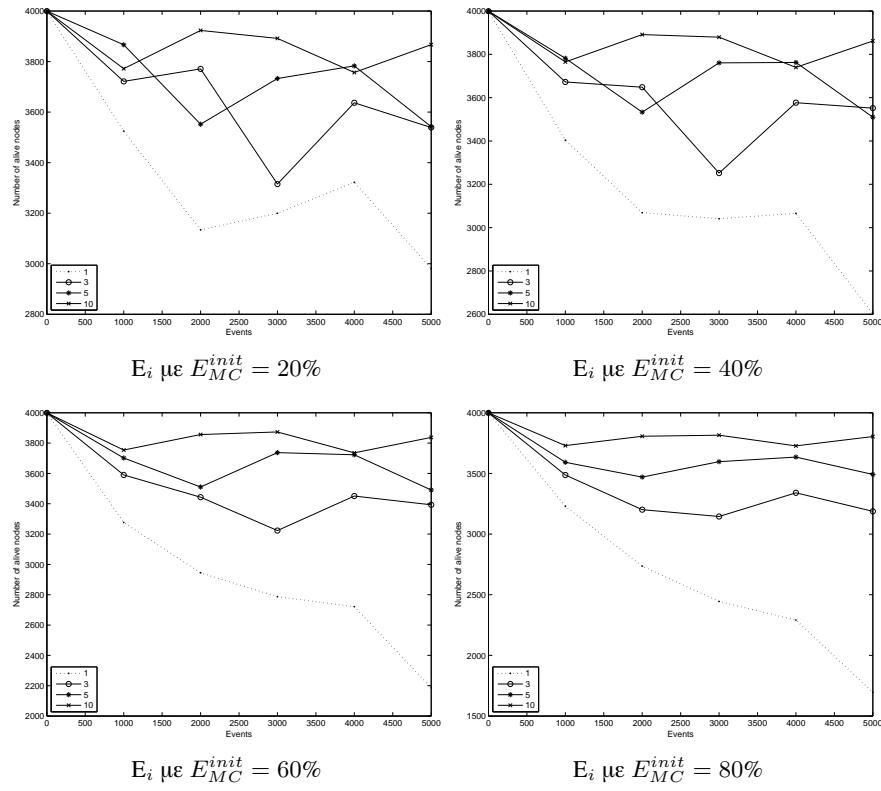
5.6.5 Παραμετροποιώντας την Τεχνολογία Φόρτισης



Εικόνα 5.44: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου για το Greedy πρωτόκολλο για διάφορες αποδόσεις της τεχνολογίας (αναλογία του αριθμού των κόμβων που φορτίζει ο φορτιστής ως προς τον αριθμό των μηνυμάτων που δημιουργούνται στο ίδιο χρονικό διάστημα στο δίκτυο) και για διάφορα ποσοστά αρχικής ενέργειας που δίνονται στον κινητό φορτιστή. Από τις εικόνες φαίνεται ότι θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη τεχνολογία ώστε ο φορτιστής να μπορεί να φορτίζει τουλάχιστον 3 κόμβους ανά ένα καινούργιο μήνυμα που απαιτεί πολύ βηματική δρομολόγηση.



Εικόνα 5.45: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου για το Leach πρωτόκολλο για διάφορες αποδόσεις της τεχνολογίας (αναλογία του αριθμού των κόμβων που φορτίζει ο φορτιστής ως προς τον αριθμό των μηνυμάτων που δημιουργούνται στο ίδιο χρονικό διάστημα στο δίκτυο) και για διάφορα ποσοστά αρχικής ενέργειας που δίνονται στον κινητό φορτιστή. Από τις εικόνες φαίνεται ότι θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη τεχνολογία ώστε ο φορτιστής να μπορεί να φορτίζει τουλάχιστον 3 κόμβους ανά ένα καινούργιο μήνυμα που απαιτεί πολύ βηματική δρομολόγηση.



Εικόνα 5.46: Ζωντανοί κόμβοι κατά την πάροδο του χρόνου για το E_i πρωτόκολλο για διάφορες αποδόσεις της τεχνολογίας (αναλογία του αριθμού των κόμβων που φορτίζει ο φορτιστής ως προς τον αριθμό των μηνυμάτων που δημιουργούνται στο ίδιο χρονικό διάστημα στο δίκτυο) και για διάφορα ποσοστά αρχικής ενέργειας που δίνονται στον κινητό φορτιστή. Από τις εικόνες φαίνεται ότι θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη τεχνολογία ώστε ο φορτιστής να μπορεί να φορτίζει τουλάχιστον 3 κόμβους ανά ένα καινούργιο μήνυμα που απαιτεί πολύ βηματική δρομολόγηση.

6

Επίλογος και Ανοιχτά Προβλήματα

6.1 Ανασκόπηση και Συμπεράσματα

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των εφαρμογών τους όπως είναι η παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος, υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον τα συστήματα αυτά να διατηρούν την λειτουργική τους κατάσταση για αρκετά χρόνια. Όμως το κύριο πρόβλημα σε αυτά τα συστήματα είναι η ανικανότητά τους να αποθηκεύσουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της αέναης λειτουργίας τους. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με την εκμετάλλευση μιας πολύ καινούργιας τεχνολογίας, την τεχνολογία της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας. Αυτή η διπλωματική ασχολείται με την αποδοτική αξιοποίηση και ενσωμάτωση της τεχνολογίας της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και γενικώς με την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας σε τέτοια συστήματα.

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή και παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (κεφάλαιο 1). Αμέσως μετά παρουσιάζονται οι πιο γνωστές τεχνικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας (κεφάλαιο 2) και επεξηγείται η απόδοσή τους. Γίνεται αναφορά σε αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης καθώς και τα διάφορα είδη τους όπως π.χ. iεραρχικά ή εξισορόπησης ενέργειας πρωτόκολλα. Επίσης, επεξηγούνται οι δυνατότητες των πρωτόκολλων δρομολόγησης που χρησιμοποιούν κινητούς κόμβους και κινητές Πηγές καθώς και σε συστήματα που χρησιμοποιούν εναλλακτικούς τρόπους εξασφάλισης ενέργειας όπως είναι η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας. Στην συνέχεια (κεφάλαιο 3) γίνεται μια ιστορική αναδρομή στην τεχνολογία της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας. Η τεχνολογία επεξηγείται πλήρως ενώ παρουσιάζονται και οι ιδιότητές της. Αμέσως μετά (κεφάλαιο 4) ορίζεται το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί ενσωματώνοντας αυτή την τεχνολογία στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και αποδεικνύεται ότι το πρόβλημα είναι NP-πλήρης (NP-complete). Στην συνέχεια προτείνονται ευρετικές στρατηγικές και αλγόριθμοι οι οποίοι δίνουν αποδοτική λύση στο πρόβλημα. Τέλος διεξάγονται εξονυχιστικά πειράματα των στρατηγικών και αλγορίθμων που προτάθηκαν τα οποία παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τις ιδιότητες της τεχνολογίας αυτής καθώς και για την αλληλεπίδραση που έχει με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Από αυτή την εργασία προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η τεχνολογία της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας θα πρέπει να ενσωματωθεί στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς όπως προέκυψε (5.1) η διο-

χέτευση μέρος της συνολικής ενέργειας του δικτύου στον κινητό φορτιστή μπορεί να αυξήσει δραματικά τον χρόνο ζωής του δικτύου. Επομένως μπορεί να λυθεί αποδοτικά το πρόβλημα της περιορισμένης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιώντας τέτοιους αυτόματους μηχανισμούς οι οποίοι θα μπορούν να φορτίζονται από μια βάση στην άκρη του δικτύου και να φορτίζουν τους κόμβους του δικτύου στο οποίο είναι αδύνατη η ανθρώπινη προσπέλαση.

- Η τεχνολογία της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας μπορεί να εξασφαλίσει εξισορρόπησης ενέργειας στο δίκτυο (εικόνες 5.7, 5.8, 5.9) αφού η ενέργεια δίνεται μόνον στους κόμβους που πραγματικά την χρειάζονται.
- Η μερική φόρτιση έχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα ειδικά όταν χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι δρομολόγησης οι οποίοι εξασφαλίζουν μια μερική ή ολική εξισορρόπησης ενέργειας (5.2).
- Το βέλτιστο ποσοστό ενέργειας που μπορεί να δοθεί στον κινητό φορτιστή (5.3) είναι κοντά στο 20% για πρωτόκολλα μερικής ή ολικής εξισορρόπησης ενέργειας ή το 50%-60% για δεντρικής μορφής πρωτόκολλα όπως το Directed Diffusion [28] και το Greedy[87].
- Η βέλτιστη τροχιά για τον κινητό φορτιστή είναι η προσαρμοστική τροχιά καθώς προσαρμόζεται ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου (5.4).

6.2 Μελλοντικές Αναζητήσεις

Η έρευνα στα ασύρματα επαναφορτιζόμενα δίκτυα αισθητήρων ουσιαστικά μόλις έχει ξεκινήσει και επομένως υπάρχουν πολλές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Η ανάλυση και η απόδειξη αποδοτικών προσεγγιστικών αλγορίθμων με εγγυήσεις απόδοσης αποτελεί μια ερευνητική πρόκληση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αναγωγή στο θεώρημα 1 για την απόδειξη της δύσκολης πολυπλοκότητας του προβλήματος δεν διαφυλάσσει τους προσεγγιστικούς λόγους (π.χ. γνωστοί αποδοτικοί αλγόριθμοι για το γεωμετρικό πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή μπορεί να μην είναι και τόσο αποδοτικοί για πρόβλημα της δρομολόγησης του κινητού φορτιστή, CDDP). Επίσης, υπάρχει ενδιαφέρον να μελετηθούν και να αναλυθούν στρατηγικές και τροχιές φόρτισης για μη ομοιόμορφες κατανομές ανάπτυξης των κόμβων του δικτύου. Διαφορετικά μοντέλα ως προς την ανάπτυξη των κόμβων μπορεί να οδηγήσουν σε τελείως διαφορετικούς αλγορίθμους για τον κινητό φορτιστή. Μια άλλη ερευνητική κατεύθυνση είναι η μοντελοποίηση, η ανάλυση και η εξομοίωση άλλων μοντέλων φόρτισης όπως είναι στο [90] το οποίο επιτρέπει την φόρτιση πολλαπλών συσκευών ταυτόχρονα. Η ανάλυση του λόγου επιτυχίας ως μια επιπλέον μετρική θα μπορούσε να ερευνηθεί αν και τα αποτελέσματα της αύξησης του χρόνου ζωής του δικτύου σηματοδοτούν και τον καλό λόγο επιτυχίας. Επίσης, όπως φαίνεται και από τα πειράματα πολύ μεγάλης κλίμακας στην ενότητα 5.6 ενδιαφέρον παρουσιάζει η αποδοτική διαχείριση ενέργειας με πολλαπλούς κινητούς κόμβους για δίκτυα αισθητήρων με πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων.

Όπως δείχθηκε από αυτή την εργασία, η διοχέτευση ενός μέρους της ενέργειας του δικτύου στον κινητό φορτιστή (και συγκεκριμένα το 20%) συμφέρει περισσότερο καθώς αυξάνει δραματικά τον χρόνο ζωής του δικτύου. Όμως σε αυτή την εργασία δεν έχει ληφθεί υπόψη η ενέργεια που σπαταλάει ο φορτιστής για την

κίνησή του. Επίσης, ο φορτιστής σε αυτή την εργασία εκτελεί εργασίας μόνο φόρτισης, δηλαδή δεν συλλέγει δεδομένα από τους κόμβους. Μια πολύ ενδιαφέρουσα ερευνητική κατεύθυνση είναι να εξεταστεί αν συμφέρει περισσότερο ο κινητός φορτιστής να εκτελεί μόνο χρέη φόρτισης ή να συλλέγει ταυτόχρονα και δεδομένα από τους κόμβους, λαμβάνοντας υπόψιν όμως την ενέργεια που σπαταλάται για την κίνηση, την ενέργεια διαθέσιμη για φόρτιση και την ενέργεια διαθέσιμη για την επικοινωνία με τους κόμβους ως μια ενιαία ενέργεια που έχει διαθέσιμη ο κινητός φορτιστής. Θα πρέπει να αναλυθεί σε ποιο σημείο θα πρέπει να δοθεί περισσότερο βάρος, ανάμεσα δηλαδή στην φόρτιση και την συλλογή δεδομένων, με κύριο στόχο την επέκταση του χρόνου ζωής του δικτύου αλλά και άλλες μετρικές όπως ο λόγος επιτυχίας και η χρονοκαθυστέρηση (latency). Η φόρτιση των κόμβων είναι ακριβή για τον κινητό φορτιστή αλλά σημαντική για την λειτουργία του δικτύου ενώ οι συλλογή δεδομένων είναι πολύ πιο φθηνή (ανάλογα, φυσικά, με τον όγκο των δεδομένων) αλλά σημαντική για τα δεδομένα του δικτύου και επομένως η λύση δεν είναι προφανής.

Αναφορές

- [1] E.J. Pauwels, A.A. Salah, and R. Tavenard. Sensor networks for ambient intelligence. In *Multimedia Signal Processing, 2007. MMSP 2007. IEEE 9th Workshop on*, pages 13 --16, oct. 2007. 1
- [2] H. Kenniche and V. Ravelomananana. Random geometric graphs as model of wireless sensor networks. In *Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference on*, volume 4, pages 103 --107, feb. 2010. 2
- [3] Aristeidis Karalis, J. D. Joannopoulos, and Marin Soljačić. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of Physics*, 323(1):34--48, January 2008. 3
- [4] Demin Wang, Bin Xie, and Dharma P. Agrawal. Coverage and lifetime optimization of wireless sensor networks with gaussian distribution. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(12):1444--1458, December 2008. 4, 36
- [5] James Aspnes and Eric Ruppert. An introduction to population protocols. In Benoît Garbinato, Hugo Miranda, and Luís Rodrigues, editors, *Middleware for Network Eccentric and Mobile Applications*, pages 97--120. Springer-Verlag, 2009. 4
- [6] Renita Machado and Sirin Tekinay. A survey of game-theoretic approaches in wireless sensor networks. *Comput. Netw.*, 52(16):3047--3061, November 2008. 5
- [7] CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA DEPT OF COMPUTER SCIENCE. *Proceedings of a Workshop on Distributed Sensor Nets Held at Pittsburgh, Pennsylvania on December 7-8, 1978*. Defense Technical Information Center, 1978. 5
- [8] Richard Rashid, Robert Baron, Ro Forin, David Golub, and Michael Jones. Mach: A system software kernel. In *In Proceedings of the 1989 IEEE International Conference, COMPCON*, pages 176--178. Press, 1989. 5
- [9] Chee-Yee Chong, Kuo-Chu Chang, and Shozo Mori. Distributed tracking in distributed sensor networks. In *American Control Conference, 1986*, pages 1863 --1868, june 1986. 5
- [10] Richard T. Lacoss. Distributed mixed sensor aircraft tracking. In *American Control Conference, 1987*, pages 1827 --1830, june 1987. 5
- [11] MIT Lincoln Laboratory. Distributed sensor networks. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/290Q/Papers/Historyontext/DistributedSensorNetworks-LL-1986.pdf>. Accessed: 12/07/2012. 6

- [12] The cooperative engagement capability. <http://techdigest.jhuapl.edu/td/td1604/APLteam.pdf>. Accessed: 12/07/2012.
- [13] Muhammad Omer Farooq and Thomas Kunz. Operating systems for wireless sensor networks: A survey. In *Sensors* 11, 2011. 9
- [14] Philip Levis, Sam Madden, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, Alec Woo, David Gay, Jason Hill, Matt Welsh, Eric Brewer, and David Culler. Tinyos: An operating system for sensor networks. In *in Ambient Intelligence*. Springer Verlag, 2004. 10
- [15] Adam Dunkels, Bjorn Gronvall, and Thiemo Voigt. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN '04*, pages 455--462, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society. 10
- [16] Shah Bhatti, James Carlson, Hui Dai, Jing Deng, Jeff Rose, Anmol Sheth, Brian Shucker, Charles Gruenwald, Adam Torgerson, and Richard Han. Mantis os: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms. In *ACM/Kluwer Mobile Networks & Applications (MONET), Special Issue on Wireless Sensor Networks*, page 2005, 2005. 10
- [17] Chih-Chieh Han, Ram Kumar, Roy Shea, Eddie Kohler, and Mani Srivastava. A dynamic operating system for sensor nodes. In *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services, MobiSys '05*, pages 163-176, New York, NY, USA, 2005. ACM. 10
- [18] A. Eswaran, A. Rowe, and R. Rajkumar. Nano-rk: an energy-aware resource-centric rtos for sensor networks. In *Real-Time Systems Symposium, 2005. RTSS 2005. 26th IEEE International*, pages 10 pp. --265, dec. 2005. 10
- [19] Philip Levis and David Culler. Maté: a tiny virtual machine for sensor networks. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, 36(5):85--95, October 2002. 11
- [20] D. Mahrenholz and S. Ivanov. Real-time network emulation with ns-2. In *Distributed Simulation and Real-Time Applications, 2004. DS-RT 2004. Eighth IEEE International Symposium on*, pages 29 -- 36, oct. 2004. 11
- [21] Gustavo Carneiro, Helder Fontes, and Manuel Ricardo. Fast prototyping of network protocols through ns-3 simulation model reuse. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(9):2063 -- 2075, 2011. 11
- [22] Xiaodong Xian, Weiren Shi, and He Huang. Comparison of omnet++ and other simulator for wsn simulation. In *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on*, pages 1439 --1443, june 2008. 11
- [23] M. Lord and D. Memmi. Netsim: a simulation and visualization software for information network modeling. In *e-Technologies, 2008 International MCETECH Conference on*, pages 167 --177, jan. 2008. 11
- [24] A. Sobeih, Mahesh Viswanathan, D. Marinov, and J.C. Hou. J-sim: An integrated environment for simulation and model checking of network protocols. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2007. IPDPS 2007. IEEE International*, pages 1 --6, march 2007. 11

- [25] Tobias Baumgartner, Ioannis Chatzigiannakis, Sandor P Fekete, Christos Koninis, Alexander Kroeller, and Apostolos Pyrgelis. Wiselib: A generic algorithm library for heterogeneous sensor networks. *Computer Engineering*, page 16, 2011. 11
- [26] Hedetniemi, Hedetniemi, and Liestman. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks. *NETWORKS: Networks: An International Journal*, 18, 1988. 15
- [27] Wendi Rabiner Heinzelman, Joanna Kulik, and Hari Balakrishnan. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '99, pages 174--185, New York, NY, USA, 1999. ACM. 16
- [28] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '00, pages 56--67, New York, NY, USA, 2000. ACM. 16, 21, 86
- [29] David Braginsky and Deborah Estrin. Rumor routing algorithim for sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, WSNA '02, pages 22--31, New York, NY, USA, 2002. ACM. 17
- [30] Yong Yao and Johannes Gehrke. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *SIGMOD Rec.*, 31(3):9--18, September 2002. 18
- [31] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences - Volume 8 - Volume 8*, HICSS '00, pages 8020--, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society. 18, 19, 21, 55
- [32] S. Lindsey and C.S. Raghavendra. Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE*, volume 3, pages 3--1125 -- 3--1130 vol.3, 2002. 19
- [33] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K.M. Sivalingam. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 13(9):924 -- 935, sep 2002. 19
- [34] Arati Manjeshwar and Dharma P. Agrawal. Teen: Arouting protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium*, IPDPS '01, pages 189--, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society. 19
- [35] Arati Manjeshwar and Dharma P. Agrawal. Apteen: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 16th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, IPDPS '02, pages 48--, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society. 20

- [36] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '01, pages 70--84, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [37] Yan Yu, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical report, 2001.
- [38] Xiaobing Wu, Guihai Chen, and Sajal K. Das. On the energy hole problem of nonuniform node distribution in wireless sensor networks. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2006 IEEE International Conference on*, pages 180 --187, oct. 2006.
- [39] Charilaos Efthymiou, Sotiris Nikoletseas, and Jose Rolim. Energy balanced data propagation in wireless sensor networks. *Wirel. Netw.*, 12(6):691--707, November 2006.
- [40] Aubin Jarry, Pierre Leone, Olivier Powell, and J Rolim. An optimal data propagation algorithm for maximizing the lifespan of sensor networks. *Distributed Computing in Sensor*, pages 405--421, 2006.
- [41] S. Olariu and I. Stojmenovic. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting. In *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pages 1 --12, april 2006.
- [42] S. Olariu and I. Stojmenovic. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting. In *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pages 1 --12, april 2006.
- [43] Richard Pon, Maxim A. Batalin, Jason Gordon, Aman Kansal, Duo Liu, Mohammad Rahimi, Lisa Shirachi, Yan Yu, Mark Hansen, William J. Kaiser, Mani Srivastava, Gaurav Sukhatme, and Deborah Estrin. Networked infomechanical systems: A mobile embedded networked sensor platform. In *in IEEE/ACM Fourth International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pages 376--381, 2005.
- [44] Arun A. Somasundara, Aditya Ramamoorthy, and Mani B. Srivastava. Mobile element scheduling with dynamic deadlines. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 6(4):395 --410, april 2007.
- [45] K. Dantu, M. Rahimi, H. Shah, S. Babel, A. Dhariwal, and G.S. Sukhatme. Robomote: enabling mobility in sensor networks. In *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on*, pages 404 -- 409, april 2005.
- [46] A. Erman-Tüysüz, L.F.W. van Hoesel, P.J.M. Havinga, and Jian Wu. Enabling mobility in heterogeneous wireless sensor networks cooperating with uavs for mission-critical management. *IEEE Wireless Communications*, 15(6):38--46, December 2008.

- [47] Philo Juang, Hidekazu Oki, Yong Wang, Margaret Martonosi, Li Shiuan Peh, and Daniel Rubenstein. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with zebranet. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, 36(5):96–107, October 2002. 25
- [48] Wei Wang, Vikram Srinivasan, and Kee-Chaing Chua. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. In *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '05, pages 270–283, New York, NY, USA, 2005. ACM. 26
- [49] Jun Luo and Jean pierre Hubaux. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. In *In Proceedijngs of IEEE INFOCOM*, pages 1735--1746. 27
- [50] Jun Luo, Jacques Panchard, Michał Piórkowski, Matthias Grossglauser, and Jean pierre Hubaux. Mobicroute: Routing towards a mobile sink for improving lifetime in sensor networks. In *in Sensor Networks in the 2nd IEEE/ACM DCOSS*, pages 480–497. Springer Verlag, 2006. 28
- [51] Constantinos-Marios Angelopoulos, Sotiris Nikoletseas, Dimitra Patroumpa, and Jose Rolim. Coverage-adaptive random walks for fast sensory data collection. In *Proceedings of the 9th international conference on Ad-hoc, mobile and wireless networks*, ADHOC-NOW'10, pages 81–94, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer-Verlag. 29
- [52] Zoltan Vincze, Rolland Vida, and Attila Vidacs. Deploying multiple sinks in multi-hop wireless sensor networks. In *Pervasive Services, IEEE International Conference on*, pages 55 --63, july 2007. 30
- [53] R.C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette. Data mules: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on*, pages 30 -- 41, may 2003. 30
- [54] Ming Ma and Yuanyuan Yang. Clustering and load balancing in hybrid sensor networks with mobile cluster heads. In *Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks*, QShine '06, New York, NY, USA, 2006. ACM. 31
- [55] T. Banerjee and D.P. Agrawal. Increasing lifetime of wireless sensor networks using controllable mobile cluster heads. In *Performance, Computing and Communications Conference, 2008. IPCCC 2008. IEEE International*, pages 77 --84, dec. 2008. 31
- [56] Ming Ma and Yuanyuan Yang. Data gathering in wireless sensor networks with mobile collectors. In *Parallel and Distributed Processing, 2008. IPDPS 2008. IEEE International Symposium on*, pages 1 --9, april 2008. 31
- [57] M. M. Solomon. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Oper. Res.*, 35(2):254--265, April 1987. 32
- [58] Wei Wang, Vikram Srinivasan, and Kee-Chaing Chua. Extending the lifetime of wireless sensor networks through mobile relays. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 16(5):1108--1120, October 2008. 33

- [59] You-Chiun Wang, Wen-Chih Peng, and Yu-Chee Tseng. Energy-balanced dispatch of mobile sensors in a hybrid wireless sensor network. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, 21(12):1836--1850, December 2010. 34
- [60] M. Rahimi, H. Shah, G.S. Sukhatme, J. Heideman, and D. Estrin. Studying the feasibility of energy harvesting in a mobile sensor network. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 19 -- 24 vol.1, sept. 2003. 35
- [61] Kris Lin, Jennifer Yu, Jason Hsu, Sadaf Zahedi, David Lee, Jonathan Friedman, Aman Kansal, Vijay Raghunathan, and Mani Srivastava. Heliomote: enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting. In *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '05, pages 309--309, New York, NY, USA, 2005. ACM. 35
- [62] Koushik Kar, Ananth Krishnamurthy, and Neeraj Jaggi. Dynamic node activation in networks of rechargeable sensors. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 14(1):15--26, February 2006. 35
- [63] Longbi Lin, Ness B. Shroff, and R. Srikant. Asymptotically optimal energy-aware routing for multihop wireless networks with renewable energy sources. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 15(5):1021--1034, October 2007. 36
- [64] Ren-Shiou Liu, P. Sinha, and C.E. Koksal. Joint energy management and resource allocation in rechargeable sensor networks. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pages 1 --9, march 2010. 36
- [65] V. Sharma, U. Mukherji, V. Joseph, and S. Gupta. Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 9(4):1326 --1336, april 2010. 36
- [66] Ioannis Chatzigiannakis, Athanasios Kinalis, and Sotiris Nikoletseas. Adaptive energy management for incremental deployment of heterogeneous wireless sensors. *Theor. Comp. Sys.*, 42(1):42--72, December 2007. 37
- [67] Bin Tong, Zi Li, Guiling Wang, and Wensheng Zhang. On-demand node reclamation and replacement for guaranteed area coverage in long-lived sensor networks. In Novella Bartolini, Sotiris E. Nikoletseas, Prasun Sinha, Valeria Cardellini, and Anirban Mahanti, editors, *QSHINE*, volume 22 of *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, pages 148--166. Springer, 2009. 37
- [68] Bin Tong, Guiling Wang, Wensheng Zhang, and Chuang Wang. Node reclamation and replacement for long-lived sensor networks. In *Proceedings of the 6th Annual IEEE communications society conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, SECON'09, pages 592--600, Piscataway, NJ, USA, 2009. IEEE Press. 37
- [69] Byoungwoo Kang and Gerbrand Ceder. Battery materials for ultrafast charging and discharging. *Nature*, 458(7235):190--193, March 2009. 37
- [70] Chunbo Zhu, Kai Liu, Chunlai Yu, Rui Ma, and Hexiao Cheng. Simulation and experimental analysis on wireless energy transfer based on magnetic resonances. In *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, pages 1 --4, sept. 2008. 37

- [71] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, and Marin Soljacic. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 317(5834):83–86, July 2007. 37
- [72] Aristeidis Karalis, J. D. Joannopoulos, and Marin Soljačić. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of Physics*, 323(1), January 2008. 37
- [73] Intel. Wireless resonant energy link (WREL) demo. <http://software.intel.com/en-us/videos/wireless-resonant-energy-link-wrel-demo/>, 2010. [Online; accessed 19-July-2012]. 37, 40
- [74] Witricity. WiT-3300 Deployment Kit. http://www.witricity.com/pdfs/WiT-3300_data_sheet.pdf, 2011. [Online; accessed 19-July-2012]. 37, 40
- [75] Nikola Tesla. Apparatus for Transmitting Electrical Energy. Number 1119732. US Patent, December 1914. 38
- [76] Systems Control Technology. Roadway powered electric vehicle project track construction and testing program. <http://www.path.berkeley.edu/PATH/Publications/PDF/PRR/94/PRR-94-07.pdf>, 1994. [Online; accessed 19-July-2012]. 39
- [77] Miao Zhao, Ji Li, and Yuanyuan Yang. Joint mobile energy replenishment and data gathering in wireless rechargeable sensor networks. In *Teletraffic Congress (ITC), 2011 23rd International*, pages 238 --245, sept. 2011. 43, 49, 50
- [78] D. S. Johnson M. R. Garey. *Computers and intractability*. W. H. Freeman and Company, 1979. 47
- [79] Christos H. Papadimitriou. The euclidean travelling salesman problem is np-complete. *Theoretical Computer Science*, 4(3):237 -- 244, 1977. 47
- [80] M. Rahimi, H. Shah, G.S. Sukhatme, J. Heideman, and D. Estrin. Studying the feasibility of energy harvesting in a mobile sensor network. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 19 -- 24 vol.1, sept. 2003. 48
- [81] Michael Buettner, Ben Greenstein, David Wetherall, and Joshua R. Smith. Revisiting smart dust with rfid sensor networks, 2008. 48
- [82] Fachang Jiang, Shibo He, Peng Cheng, and Jiming Chen. On optimal scheduling in wireless rechargeable sensor networks for stochastic event capture. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2011 IEEE 8th International Conference on*, pages 69 --74, oct. 2011. 48
- [83] Yang Peng, Zi Li, Wensheng Zhang, and Daji Qiao. Prolonging sensor network lifetime through wireless charging. In *Real-Time Systems Symposium (RTSS), 2010 IEEE 31st*, pages 129 --139, 30 2010-dec. 3 2010. 48, 50
- [84] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, and H. D. Sherali. Making sensor networks immortal: An energy-renewal approach with wireless power transfer. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, PP(99):1, 2012. 49, 50

- [85] Zi Li, Yang Peng, Wensheng Zhang, and Daji Qiao. J-roc: A joint routing and charging scheme to prolong sensor network lifetime. In *Network Protocols (ICNP), 2011 19th IEEE International Conference on*, pages 373 --382, oct. 2011. 49, 50
- [86] J. K. Lenstra and A. H. G. Rinnooy Kan. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2):221--227, 1981. 49
- [87] P. Spirakis I. Chatzigiannakis, S. Nikoletseas. Smart dust protocols for local detection and propagation. In *POMC*, 2002. 55, 86
- [88] P. Kumar P. Gupta. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks. *Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications*, 1998. 55
- [89] M. Penrose. *Random Geometric Graphs*. Oxford University Press, 2003. 55
- [90] Marin Soljacic Andre Kurs, Robert Moffatt. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices. In *Applied Physics Letters* 96, jan. 2010. 86