



University of Thessaly

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Η/Υ



*Προσομοίωση Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων για
Μελέτη Βέλτιστης Ενεργειακής Κατανάλωσης
Κόμβων*

*Wireless Sensor Network Simulation for Optimal
Energy Node Consumption*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Χατζής

Βόλος, Απρίλιος 2016
Εξεταστική Επιτροπή:

Σταμούλης Γεώργιος
Καθηγητής Η.Μ.Μ.Υ – Π.Θ

Ν. Ευμορφόπουλος.
Επίκουρος Καθηγητής Η.Μ.Μ.Υ – Π.Θ.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντα της εργασίας, καθηγητές ΗΜΜΥ, κ. Σταμούλη Γεώργιο και Ν Ευμορφόπουλο, τον Ερευνητή – Συνεργάτη του τμήματος ΗΜΜΥ, Ξενάκη Απόστολο για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθεια που μου έδειξε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον συνάδελφό μου κ. Μόσχο Λάκη για την υποστήριξή του τόσο σε τεχνικό όσο και σε φιλικό επίπεδο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς, τους φίλους και τα υπέροχα κορίτσια στη γραμματεία, που μου στάθηκαν υποστηρικτικά και επέδειξαν υπομονή στην προσπάθειά μου να ολοκληρώσω με επιτυχία την παρούσα εργασία.

Copyright © Γεώργιος Χατζής
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	2
Περίληψη.....	6
Abstract	7
Keywords: Wireless Sensor Networks, Energy efficient Clustering, Network Lifetime	7
1. Εισαγωγή	8
2. Αρχιτεκτονική και Τεχνολογίες WSN.....	11
2.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου	11
2.2 Πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	13
2.3 Μέσα μετάδοσης.....	14
2.4 Ενεργειακά Βέλτιστες Τοπολογίες WSN	14
2.5 Κατανάλωση ενέργειας.....	23
2.6 Διάρκεια Ζωής του Δικτύου	23
3. Αλγόριθμος Ομαδοποίησης LEACH και οι Παραλλαγές του	26
3.1 Βασικά χαρακτηριστικά του LEACH	26
3.2 Μοντέλο Συστήματος.....	26
3.3 Χαρακτηριστικά του LEACH.....	27
3.3 Περιγραφή Φάσεων του LEACH.....	29
3.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του LEACH	31
3.4 Παραλλαγές του LEACH.....	32
3.4.1 I-LEACH	32
3.4.2 L-LEACH.....	35
3.4.3 W-LEACH.....	39
4. Προτεινόμενος Αλγόριθμος Ενεργειακά Βέλτιστης ομαδοποίησης κόμβων	44
4.1 Εισαγωγή.....	44
4.2 Μοντέλο Συστήματος.....	45
4.3 Προτεινόμενος Αλγόριθμος και Φάσεις του Αλγορίθμου	47
4.3.1 Φάση 1: Εκλογή Clusterheads και Δημιουργία Συστάδων (clusters).....	48
4.3.2 Φάση 2: Αποστολή Δεδομένων.....	51
4.3.3 Φάση 3: Εναλλαγή (Rotation) του ρόλου του Clusterhead	52
5. Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα	53
6. Συμπεράσματα	59
Βιβλιογραφία	61

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Δομή ενός αισθητήρα	9
Εικόνα 2: Πεδίο αισθητήρων [6]	11
Εικόνα 3: Αρχιτεκτονική WSN [6]	12
Εικόνα 4: (a)Αρχική τοπολογία και (b) η νέα τοπολογία με την χρήση του A3 [28]	15
Εικόνα 5: Πρωτόκολλο EECDS [29].....	16
Εικόνα 7: Δημιουργία τοπολογίας ενός μικρού WSN βάσει του CDS-RULE k (α-δημιουργία δένδρων μέσω DFS, b- αποκοχή μικρότερων δένδρων, c- Clustering).....	17
Εικόνα 6: Πρίν την εκτέλεση (αριστερά) και μετά την εκτέλεση (δεξιά) του HEED [34]	17
Εικόνα 8: Διάγραμμα Voronoi ενός WSN [32]	18
Εικόνα 9: Σύνολο σημείων (αριστερά) και το Γράφημα Σχετικής Γειτνιάσής του(δεξιά)	18
Εικόνα 10: Γειτονικά κατα Gabriel (αριστερά) και μη γειτονικά (δεξιά)	19
Εικόνα 11: Πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) από την εφαρμογή του LMST [35].....	19
Εικόνα 12: Παράδειγμα γράφου Yao [33].....	20
Εικόνα 13: Γράφος πλησιέστερου γείτονα 100 σημείων [36]	20
Εικόνα 14: cone-based distributed για διάφορες τιμές του α [25]	21
Εικόνα 15:Αρχική τοπολογία πριν (αριστερά) και μετά την εφαρμογή του K-neigh (δεξιά) [29]	21
Εικόνα 16:Οργάνωση ενός WSN σε συστάδες όπου μπορεί να εκτελεστεί ο LEACH	28
Εικόνα 17: Δύο στιγμιότυπα του LEACH για το ίδιο δίκτυο[2]. Τα clusters οροθετούνται από τις ευθείες γραμμές. Με μαύρο χρώμα είναι οι cluster-heads και με άσπρο οι υπόλοιποι κόμβοι.....	29
Εικόνα 18: Αριθμός ζωντανών κόμβων vs rounds για ένα δίκτυο μεγέθους 200 κόμβων [10]	34
Εικόνα 19: Κατανάλωση ενέργειας ανά γύρο [10]	35
Εικόνα 20 : Αριθμός ζωντανών κόμβων ανά γύρο (κόκκινο για τον από LEACH και διακεκομμένη γραμμή για τον L-LEACH) [11]	37
Εικόνα 21: Συνολική κατανάλωση ενέργειας στο χρόνο (κόκκινο για τον από LEACH και διακεκομμένη γραμμή για τον L-LEACH) [11]	37
Εικόνα 22: Συνολική αποστολή δεδομένων στο χρόνο (κόκκινο για τον από LEACH και διακεκομμένη γραμμή για τον L-LEACH) [11]	38
Εικόνα 23: Θάνατος πρώτου κόμβου, τελευταίου κόμβου και μέση διάρκεια ζωής κόμβου για δίκτυο στο οποίο οι κόμβοι κατανέμονται στο επίπεδο ομοιόμορφα[12]	41
Εικόνα 24: Θάνατος πρώτου κόμβου, τελευταίου κόμβου και μέση διάρκεια ζωής κόμβου για δίκτυο στο οποίο οι κόμβοι κατανέμονται στο επίπεδο μη - ομοιόμορφα[12]	41
Εικόνα 25: Αριθμός ζωντανών κόμβων σε ομοιόμορφο WSN [12]	42
Εικόνα 26: Αριθμός ζωντανών κόμβων σε μη ομοιόμορφο WSN [12]	42
Εικόνα 27: Εναπομείνουσα Ενέργεια σε ομοιόμορφο δίκτυο για LEACH/W-LEACH [12]	43
Εικόνα 28: WSN με ομοιόμορφα κατανεμημένους κόμβους (μπλε) και Base-station (κόκκινο) στη θέση (50,50)	45

Εικόνα 29: Τυχαία διάταξη WSN με 30 ενεργούς κόμβους (μαύρα σημεία) και 1 σταθμό βάσης (κόκκινο σημείο) τοποθετημένο στο (50,50).....	49
Εικόνα 30: Διάρκεια ζωής (Lifetime Rounds) για τα κριτήρια FND,HND και LND για τοπολογία 30 κόμβων με έναν σταθμό βάσης τοποθετημένο στο (50,50).....	54
Εικόνα 31: Διάρκεια ζωής (Lifetime Rounds) για τα κριτήρια FND,HND και LND για τοπολογία 30 κόμβων με έναν σταθμό βάσης τοποθετημένο στο (50,-100).....	56
Εικόνα 32: Τοπολογία πλέγματος με 100 κόμβους (99 απλούς και 1 σταθμό βάσης). Οι απλοί κόμβοι με μαύρο χρώμα και ο σταθμός βάσης με κόκκινο χρώμα.....	57
Εικόνα 33: Ποσοστό κόμβων με θετικά ενεργειακά αποθέματα (ζωντανοί κόμβοι) vs rounds για δίκτυο με 30 κόμβους και σταθμό βάσης στην θέση (50,50).....	58



Περίληψη

Η χρησιμοποίηση των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων (Α.Δ.Α) σε περιβαλλοντικές, στρατιωτικές, γεωργίας ακριβείας κτλ, έφερε επανάσταση στον τρόπο διακίνησης της πληροφορίας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η τοποθέτηση των κόμβων γίνεται σε δύσβατες περιοχές χωρίς προ υπάρχουσα επικοινωνιακή υποδομή. Χάρη στα Α.Δ.Α καθίσταται δυνατή η σύνδεση πολλών συσκευών – κόμβων, που μπορεί να απέχουν πολλά μέτρα χωρίς την χρήση καλωδίων, αλλά ασύρματα. Τα Α.Δ.Α επιτρέπουν την κατανεμημένη επεξεργασία των δεδομένων, κάτι που τα καθιστά προτιμητέα ιδιαίτερα σε δύσβατες περιοχές.

Ωστόσο, υπάρχουν βασικοί περιορισμοί στην λειτουργία των αισθητήρων, όπως περιορισμένη μνήμη, αστάθειες στο ασύρματο μέσο και περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα. Ειδικότερα για την δεύτερη περίπτωση, πολλοί αλγόριθμοι έχουν προταθεί από την διεθνή βιβλιογραφία πάνω στους τομείς της ισορροπημένης κατανάλωσης ενέργειας, την βέλτιστη τοποθέτηση κόμβων και οργάνωσή τους σε συστάδες ώστε η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου να είναι η λιγότερη δυνατή. Εάν η συνολική κατανάλωση ενέργειας σε Α.Δ.Α είναι μικρή, αυτό συνεπάγεται επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου που σημαίνει περισσότερα δεδομένα διαθέσιμα προς ανάλυση.

Στην παρούσα διπλωματική προτείνεται και παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης κόμβων σε Α.Δ.Α, ο οποίος κατανέμει την ενεργειακή κατανάλωση ομοιόμορφα μεταξύ των κόμβων μίας συστάδας με σκοπό την επιμήκυνση της συνολικής διάρκειας ζωής του δικτύου. Αναλυτικά, ο αλγόριθμος αυτός συγκρίνεται πειραματικά με τον γνωστό αλγόριθμο LEACH για ομοιόμορφη κατανομή κατανάλωσης ενέργειας και οργάνωσης κόμβων σε Α.Δ.Α. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων πιστοποιούν ότι πετυχαίνουμε μία αύξηση της συνολικής διάρκειας ζωής του δικτύου κατά 20% - 30%.

Λέξεις-Κλειδιά: Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, Ενεργειακά αποδοτικός αλγόριθμος ομαδοποίησης κόμβων, Διάρκεια ζωής δικτύου.

Abstract

The use of Wireless Sensor Networks (WSNs) in environmental, military, agriculture and many other civilian application domains has revolutionized the way information is collected and processed, especially in applications where sensors are not easy to install and there is a lack of communication infrastructure. In WSNs, many homogeneous and heterogeneous sensor devices are connected, which form an ad hoc distributed wireless network. Therefore, WSNs allow distributed information collection and processing, which is preferable especially in rough areas. However, there are certain hardware limitations in the use of sensors networks, such as limited sensor memory and processing capabilities, limited battery supply and potential wireless medium instabilities. In particular, in order to cope with the limited energy reserves in order a WSN to properly function, many algorithms have been proposed. These algorithms concern optimal energy consumption and optimal sensor placements for energy efficient communications. The problem of minimum energy consumption in a WSN is vital for extending network lifetime and thus collecting more data.

In this thesis, we propose and present a cluster-based algorithm for WSNs, which succeeds to balance energy consumption uniformly among sensor nodes inside a cluster, so as to extend total network lifetime. Our proposed algorithm is compared with LEACH algorithm, a well-known efficient energy and cluster based algorithm for WSNs. The simulation results certify that our algorithm succeeds an extension of network lifetime 20% - 30% more compared to LEACH.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Energy efficient Clustering, Network Lifetime

1. Εισαγωγή

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Α.Δ.Α) είναι ένας τύπος ασύρματου δικτύου, όπου η μετάδοση και λήψη των δεδομένων γίνεται ασύρματα, χωρίς την χρήση κάποιας καλωδιακής υποδομής. Το πρώτο ασύρματο δίκτυο ήταν το ALOHA net (1971) το οποίο συνέδεε ασύρματα τα νησιά της Χαβάης μέσω ενός ραδιοζεύξης. Πρόκειται για μία βολική λύση σύνδεσης, δεδομένου ότι δεν χρειάζεται τίποτε άλλο παρά την ίδια την συσκευή για τη σύνδεση στο δίκτυο. Η χρήση ασυρμάτων δικτύων έχει στις μέρες μας παγιωθεί και το ασύρματο μέσο χρησιμοποιείται για να συνδέσει μία πληθώρα συσκευών (κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές, tablets, laptops κτλ). Το ασύρματο μέσο που χρησιμοποιείται από τα διάφορα είδη ασυρμάτων δικτύων για τη σύνδεση συσκευών είναι:

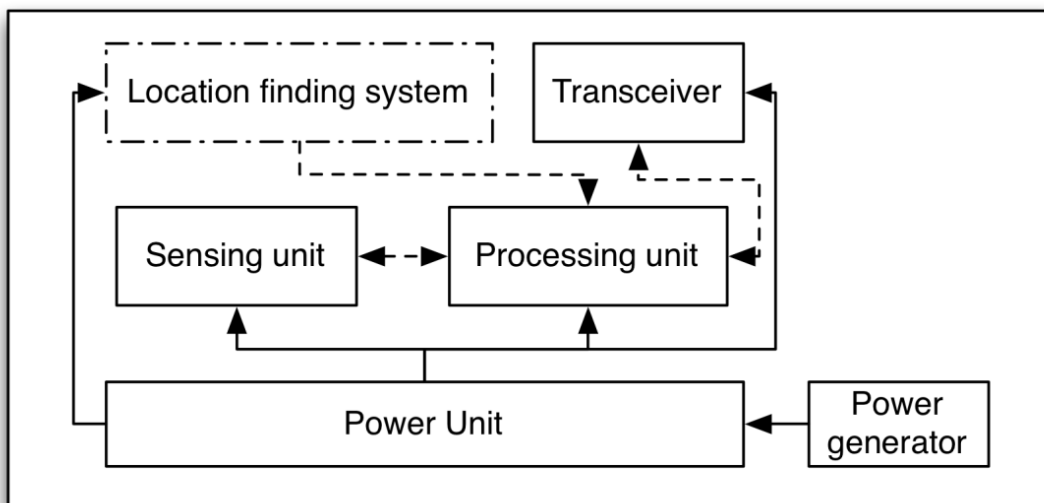
- Μικροκύματα
- Υπέρυθρες
- Λείζερ
- Ραδιοκύματα, κτλ.

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι ασύρματων δικτύων:

- Wireless Local Area Networks (LAN): Σύνδεση δύο ή και παραπάνω συσκευών σε ένα χώρο (πχ. γραφείο, κτίριο) χρησιμοποιώντας ασύρματη σύνδεση που παρέχει σύνδεση μέσω access points στο διαδίκτυο.
- Wireless Metropolitan Area Networks (MAN): Σύνδεση πολλών ασύρματων LAN.
- Wireless Wide Area Networks (WAN): Ασύρματη κάλυψη εκτάσεων όπως γειτονικές πόλεις
- Wireless Personal Area Networks (PAN): Διασύνδεση συσκευών στο χώρο ενός ατόμου (πχ. smartphone με Laptop)

Ένα είδος ασύρματου δικτύου είναι και τα Α.Δ.Α (Wireless Sensor Networks – WSNs) [1]. Αυτά τα δίκτυα αποτελούνται από πολλούς διασκορπισμένους αυτόνομους αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της φυσικών/ περιβαλλοντικών δεδομένων όπως θερμοκρασία, υγρασία, μέτρηση ρύπων της ατμόσφαιρας, ηλιακής ακτινοβολίας κτλ. Τα δεδομένων των μετρήσεων των αισθητήρων, μεταφέρονται σε ένα κεντρικό σημείο, κυρίως στον κόμβο – βάση (Gateway), όπου είναι διαθέσιμα να μεταφερθούν μέσω internet σύνδεσης σε άλλο σημείο για περαιτέρω ανάλυση.

Οι αισθητήρες αποτελούνται από 4 βασικά μέρη σύμφωνα με την εικόνα 1: 1) υποσύστημα μέτρησης φυσικών ποσοτήτων (sensing unit), 2) υποσύστημα για την επεξεργασία (processing unit) των λαμβανόμενων δεδομένων και 3) υποσύστημα για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων (transceiver), 4) Την πηγή ενέργειας που είναι συνήθως μπαταρία (power unit). Σε κάποιες εφαρμογές μπορεί η ενέργεια να συλλεχθεί από το περιβάλλον, όπως φωτοβολταϊκά. Τέλος διαθέτει μνήμη για την αποθήκευση δεδομένων στην περίπτωση της τοπικής επεξεργασίας, καθώς επίσης (προαιρετικά) και σύστημα εντοπισμού θέσης (location finding system, π.χ. GPS), κάτι που είναι αρκετά ενεργοβόρο για τον αισθητήρα.



Εικόνα 1: Δομή ενός αισθητήρα

Οι ασύρματοι μικρό – αισθητήρες είναι μικροί σε μέγεθος, φθηνοί και μπορούν να συνδεθούν κατά χιλιάδες σχηματίζοντας ένα Α.Δ.Α. Η αστοχία κάποιου αριθμού αυτών δεν θα επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα των μετρούμενων μεγεθών, διότι οι μετρήσεις τους παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό αλληλοσυσχέτισης. Σε ένα Α.Δ.Α συνήθως συνδέονται ομοιογενείς κόμβοι (με ίδια χαρακτηριστικά υλικού και λογισμικού), αλλά μπορούν να συνδεθούν και ετερογενείς μικροαισθητήρες, που να επιτελούν διαφορετικούς ρόλους. Για παράδειγμα κάποιος μπορεί να είναι υπεύθυνος για την συλλογή δεδομένων από μία συστάδα (cluster) ή να μπορούν να μετρούν θέσεις στο χώρο (μέσω GPS) ή να μπορούν να επικοινωνούν με άλλα δίκτυα, ασύρματα ή/και ενσύρματα.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν τα δίκτυα W.S.N ιδιαίτερα χρήσιμα σε πολλές και διάφορες εφαρμογές όπως γεωργική παραγωγή ([3], [4],[5],[8]), περιβαλλοντικές μελέτες ([6], [7]), ασφάλεια([7]).

Ωστόσο, ένα από τους μεγαλύτερους περιορισμούς στην λειτουργία των Α.Δ.Α είναι τα περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα. Προκύπτουν συνεπώς ζητήματα διαχείρισης της λιγοστής ενέργειας καθώς επίσης και του τρόπου της κατανομής της υπάρχουσας στους κόμβους, ανάλογα με τον ρόλο που επιτελεί ο καθένας. Τα προβλήματα της ενέργειας είναι σύνθετα στις εφαρμογές Α.Δ.Α και πολλές μελέτες έχουν γίνει που να αντιμετωπίζουν ζητήματα δρομολόγησης δεδομένων (routing protocols) ([6][10][11][12]), τοποθέτησης κόμβων (topology control protocols) ([16][18][22][25]), ώστε τελικά η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου (network lifetime) να επεκταθεί. Αυτό σημαίνει ότι ο ενεργειακός θάνατος ενός ή περισσότερων κόμβων παρατείνεται, με αποτέλεσμα να μην μειώνεται η ποιότητα (και η ποσότητα) των μετρούμενων φυσικών ποσοτήτων πεδίου. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι πρωταρχικός στόχος των σχεδιαστών βέλτιστων ενεργειακών πρωτοκόλλων σε Α.Δ.Α. είναι να ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας σε κάθε κόμβο ξεχωριστά αλλά και συνολικά ώστε να επιμηκύνεται η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου.

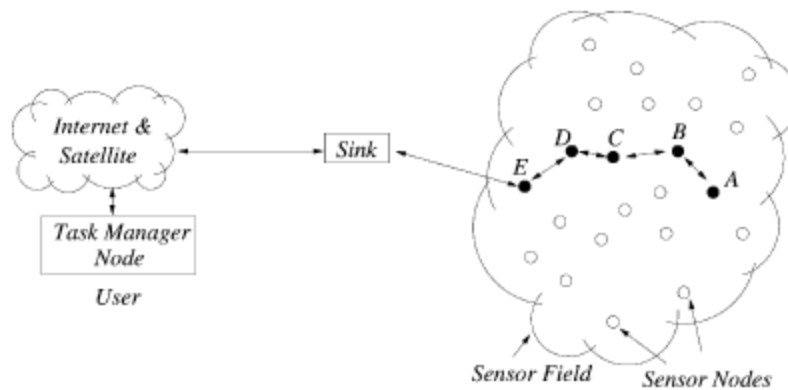
Στην παρούσα διπλωματική, προτείνεται και παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης κόμβων σε συστάδες (clustering algorithm) με σκοπό να επιμηκυνθεί η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη τα χαμηλά ενεργειακά αποθέματα των κόμβων και τις σχετικές αποστάσεις τους και βάση ενεργειακών κριτηρίων επιλέγει κατάλληλα κόμβους – αρχηγούς συστάδων. Σε δεύτερο βήμα, αλλάζει τους ρόλους μεταξύ των κόμβων, ώστε να κατανέμεται ομοιόμορφα η κατανάλωση ενέργειας.

Η διάρθρωση του τόμου είναι η ακόλουθη: Στην ενότητα 2, παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν την αρχιτεκτονική και τις τεχνολογίες Α.Δ.Α, καθώς επίσης και τοπολογίες. Στην ενότητα 3, αναλύεται ο γνωστός αλγόριθμος ομαδοποίησης LEACH καθώς και κάποιες παραλλαγές αυτού. Στην ενότητα 4, παρουσιάζεται και αναλύεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος και οι φάσεις του. Στη ενότητα 5 γίνεται σύγκριση με προσομοίωση του LEACH με τον προτεινόμενο αλγόριθμο όσο αφορά τα ενεργειακά αποθέματα κόμβων και της διάρκειας ζωής του δικτύου. Τέλος στην ενότητα 6 αναφέρουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και ακολουθεί η προτεινόμενη βιβλιογραφία. Στο τέλος του τόμου, στο παράρτημα (appendix) παραθέτουμε κώδικα σε MATLAB.

2. Αρχιτεκτονική και Τεχνολογίες WSN

2.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου

Οι κόμβοι ενός Α.Δ.Α. είναι διασκορπισμένοι τυχαία εντός του πεδίου παρατήρησης, βάση μίας στατιστικής κατανομής (π.χ. ομοιόμορφης), με της οποίας προκύπτει η θέση του κάθε αισθητήρα – κόμβου. Ένα παράδειγμα τυχαίας διασποράς κόμβων και μεταφοράς της πληροφορίας σε εξωτερικό παρατηρητή, φαίνεται στην εικόνα 2:



Εικόνα 2: Πεδίο αισθητήρων [6]

Κάθε κόμβος μπορεί να συλλέγει και δρομολογεί δεδομένα στον sink (κεντρικός κόμβος) και στους τελικούς χρήστες. Ο sink επικοινωνεί με τον task manager, μέσω διαδικτύου ή δορυφόρου. Οι λειτουργίες που εκτελούνται είτε σε επίπεδο κόμβων είτε σε επίπεδο δικτύου αφορούν τα επίπεδα λειτουργίας του OSI μοντέλου και είναι τα ακόλουθα:

- Επίπεδο εφαρμογής (Application Layer): Ανάλογα με την εφαρμογή Α.Δ.Α., διάφορα είδη λογισμικού εφαρμογών μπορούν να γραφτούν.
- Επίπεδο μεταφοράς (Transport Layer): Είναι υπεύθυνο για τη ροή πληροφορίας αν το απαιτεί η εφαρμογή που εκτελεί ο αισθητήρας.
- Επίπεδο δικτύου (Network Layer): Είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση των δεδομένων που προμηθεύει το Επίπεδο μεταφοράς.
- Επίπεδο δεδομένων (Data Link Layer): Λόγω κινητικότητας αισθητήρων και του θορύβου στο σήμα, το επίπεδο MAC πρέπει να μπορεί να ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις που προκύπτουν από την broadcast κίνηση μεταξύ των γειτονικών κόμβων, και επιπρόσθετα να υποστηρίζει ενεργειακά βέλτιστη μετάδοση πακέτων.

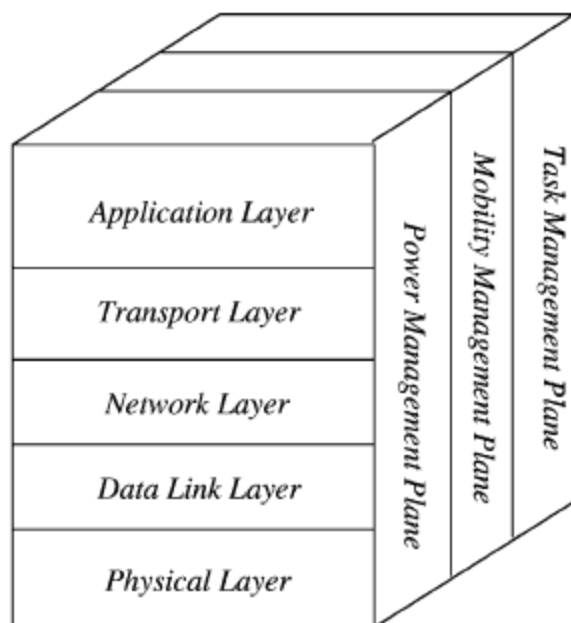
- Φυσικό επίπεδο (Physical Layer): Το επίπεδο αυτό αφορά τεχνικές μετάδοσης και λήψης σήματος, όσο και επιλογή της καταλληλότερης διαμόρφωσης.

Επιπρόσθετα με τις παραπάνω λειτουργίες των επιπέδων, ορίζονται και τα ακόλουθα στρώματα:

- *Στρώμα διαχείρισης ενέργειας (Power Management Plane)*
- *Στρώμα κινητικότητας (Mobility Plane)*
- *Στρώμα διαχείρισης εργασιών (Task Management Plane)*

όπως φαίνεται στην εικόνα 3, και είναι υπεύθυνα για την παρακολούθηση της κίνησης (ή μετακίνησης) κόμβων, της ενεργειακής κατανάλωσης σε όλα τα επίπεδα του OSI και την κατανομή του φόρτου εργασιών (task management) σε κατανεμημένες εφαρμογές. Τα στρώματα αυτά βοηθούν τους κόμβους να συντονίζουν τις εργασίες τους, να είναι συνεργατικοί και να πετυχαίνουν συνολικά την λιγότερη κατανάλωση ενέργειας κατά τις εργασίες του τοπικού υπολογισμού και της ανταλλαγής μηνυμάτων.

Όλα τα επίπεδα και τα στρώματα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3: Αρχιτεκτονική WSN [6]

2.2 Πρωτόκολλα δρομολόγησης

Η εφαρμογή ενεργειακά αποτελεσματικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι σημαντική για εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, όπου η κατανάλωση ενέργειας παίζει πρωταρχικό ρόλο στην δυνατότητα μεταφοράς όλων των μετρήσεων σε κάποιον σταθμό βάσης για περαιτέρω ανάλυση. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα παρακάτω πρωτόκολλα δρομολόγησης:

- Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV) [13]
- Dynamic Source Routing (DSR) [14]
- Time Synchronized Mesh Protocol [15]

Το πρώτο πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο δημιουργεί on-demand μονοπάτι δρομολόγησης, το οποίο διατηρείται όσο χρειάζεται. Ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των reactive protocols, των οποίων χαρακτηριστικό είναι η εύρεση του μονοπατιού μεταξύ πηγής και προορισμού την στιγμή που χρειάζεται. Τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Αποθηκεύονται μόνο τα απαραίτητα δρομολόγια
- Ελαχιστοποιείται η ανάγκη για broadcast
- Μειώνονται οι ανάγκες για μνήμη και διπλότυπα
- Άμεση απόκριση στη διάσπαση ενεργών δρομολόγιων
- Τα δρομολόγια δεν έχουν βρόχους με τη χρήση του destination sequence number
- Παίρνει χρόνο η δημιουργία των δρομολόγιων

Ο δεύτερος αλγόριθμος λειτουργεί όμοια με τον AODV, όσον αφορά την δυναμική κατασκευή των δρομολόγιων, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί source routing αντί των πινάκων δρομολόγησης των ενδιάμεσων κόμβων. Η απόδοση εξαρτάται από παράγοντες όπως η συχνότητα επικοινωνίας μεταξύ κινητών κόμβων για τους οποίους δεν υπάρχει αποθηκευμένο δρομολόγιο και μετακίνησης των κόμβων σε βαθμό που σταματούν να δουλεύουν. Το βασικό κριτήριο λειτουργίας του βασίζεται στην μείωση του όγκου πληροφορίας που αφορά περιττά μονοπάτια δρομολόγησης.

Το τρίτο πρωτόκολλο είναι ένα πρωτόκολλο πρόσβασης και δικτύωσης σχεδιασμένο για το πρόσφατο επικυρωμένο πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας HART στο βιομηχανικό

αυτοματισμό. Εξασφαλίζει αξιόπιστη και ασφαλές μετάδοση χρησιμοποιώντας channel hopping, ανάλογα με τη χρονική στιγμή μετάδοσης, η αποστολή γίνεται σε διαφορετικές συχνότητες αποφεύγοντας παρεμβολές. Επίσης η επικοινωνία μεταξύ κόμβων γίνεται με timeslots παρόμοια με άλλα TDM συστήματα, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας εφόσον ενεργοποιείται μόνο σε περιόδους προγραμματισμένης επικοινωνίας.

2.3 Μέσα μετάδοσης

Το μέσο μετάδοσης είναι ασύρματο, δηλαδή μπορεί να είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα, υπέρυθρες ή ακόμη και οπτικά μέσα [16]. Οι συχνότητες (bands) που είναι ελεύθερα διαθέσιμες για δίκτυα που βασίζονται στα πρότυπα IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee), ονομάζονται Industrial, Scientific and Medical (ISM) bands. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι διατίθενται χωρίς χρέωση, αλλά το μειονέκτημα αφορά το περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης, τις παρεμβολές και τον θόρυβο από άλλες συσκευές στην ίδια συχνότητα. Η επιλογή υπέρυθρων έναντι ηλεκτρομαγνητικού σήματος αντιμετωπίζει το πρόβλημα των παρεμβολών, όμως απαιτεί οπτική ορατότητα μεταξύ πομπού και δέκτη. Η εύρεση του κατάλληλου μέσου μετάδοσης ανάλογα την εφαρμογή είναι ένα απαιτητικό και σύνθετο θέμα. Γενικά όμως η άμεση επικοινωνία κόμβων με το λιγότερο ενεργειακά κόστος είναι ο στόχος που πρέπει να επιτευχθεί.

2.4 Ενεργειακά Βέλτιστες Τοπολογίες WSN

Η δημιουργία και συντήρηση της συνδεδεμένης τοπολογίας σε Α.Δ.Α. παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στην ενεργειακή κατανάλωση, όσο και στην συνεχή και αδιάλειπτη επικοινωνία εξωτερικής πηγής με τον κόμβο – βάση. Ο αριθμός των κόμβων ποικίλει από μερικές εκατοντάδες έως αρκετές χιλιάδες. Η δε πυκνότητα μπορεί να φτάσει και 20 nodes/m^3 . Μία τοπολογία Α.Δ.Α. μπορεί να είναι στατική, δηλαδή οι κόμβοι να παραμένουν σταθεροί σε μία θέση όταν τοποθετηθούν ή δυναμική, δηλαδή οι θέσεις των κόμβων να αλλάζουν λόγω μετακίνησής τους. Το σχήμα της τοπολογίας καθορίζεται και βάση της απόδοσης που επιζητά ο σχεδιαστής του δικτύου αλλά και βάση της συνολικής ενέργειας που υπολογίζει ότι θα καταναλωθεί.

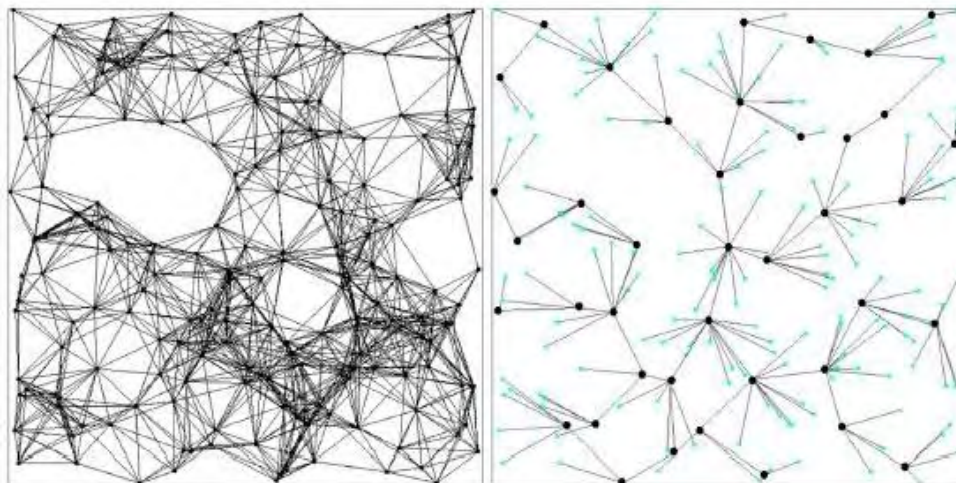
Οι αλγόριθμοι κατασκευής τοπολογίας είναι δύο κατηγοριών:

- A) Hierarchical: Ομαδοποιούν τους κόμβους βάση κριτηρίων όπως φυσική απόσταση και ορίζουν μία σχέση «πατέρα – παιδί» ανάμεσα σε δύο κόμβους, δημιουργώντας έναν Γράφο επικοινωνίας.
- B) Tx Range Based: Η κατασκευή της τοπολογίας βασίζεται στον τρόπο που θα δημιουργηθούν οι ακμές μεταξύ του κάθε ζεύγους κόμβων και βασίζεται στην ισχύ εκπομπής.

Στην (A) κατηγορία ενδεικτικά αναφέρουμε τους παρακάτω αλγορίθμους:

- A1) CDS-based: A3 [17], EECDS [18], CDS-Rule K [19]
- A2) Cluster-based: HEED[20]

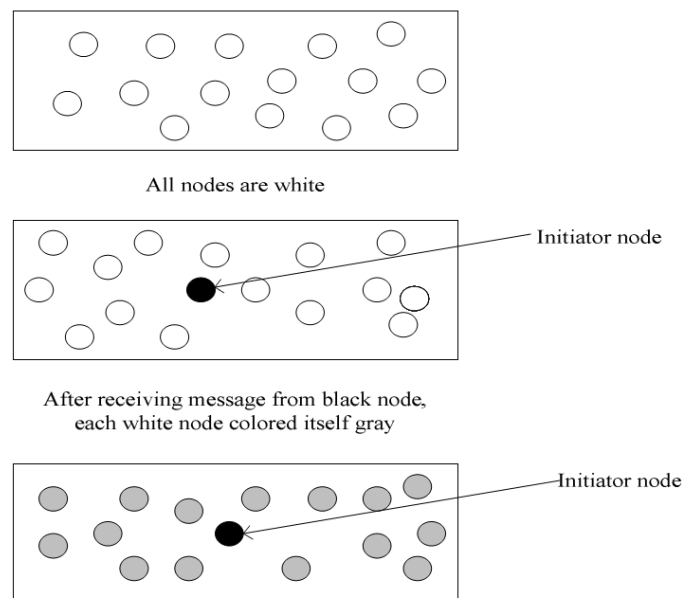
Ο αλγόριθμος **A3** κατασκευάζει την τοπολογία με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο. Απενεργοποιεί τους περιττούς κόμβους, διατηρώντας παράλληλα τη δικτυακή συνεκτικότητα και την επικοινωνιακή κάλυψη. Η ικανότητά του δεν επηρεάζεται από την κομβική πυκνότητα του δικτύου, ενώ η a priori γνώση της θέσης/προσανατολισμού των κόμβων δεν χρειάζεται.



a. Original topology b. Reduced topology with A3
Εικόνα 4: (α) Αρχική τοπολογία και (β) η νέα τοπολογία με την χρήση του A3 [28]

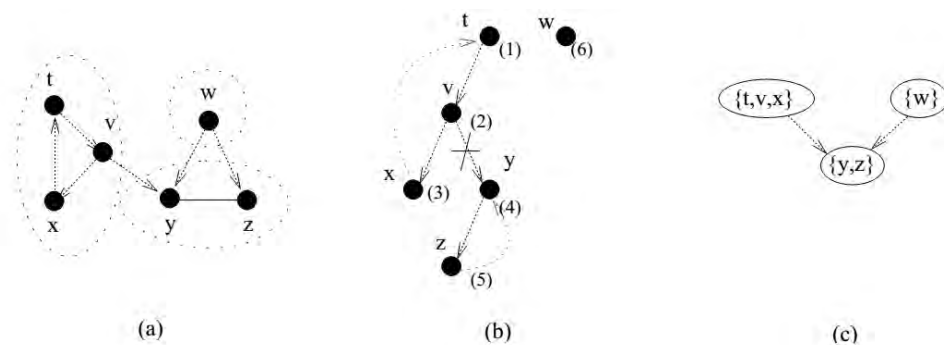
Ο **EECDS** χρησιμοποιεί μία μέθοδο χρωματισμού των κόμβων για την δημιουργία του μέγιστου ανεξάρτητου συνόλου (MIS -Maximal Independent Set). Αρχικά οι κόμβοι είναι λευκοί με εξαίρεση τον αρχικό κόμβο ο οποίος είναι μαύρος, ο οποίος ξεκινά στέλνοντας «μαύρο» μήνυμα στους γείτονές του για να τους πει ότι είναι μέρος του MIS με αποτέλεσμα

αυτοί να γίνονται γκριζοί. Αυτοί με τη σειρά τους στέλνουν ένα «γκρίζο» μήνυμα να ειδοποιήσουν τους δικούς τους γείτονες. Οι λευκοί κόμβοι που έλαβαν γκριζό μήνυμα δεν είναι μέρος του MIS. Απαιτείται αυτοί να γίνουν μαύροι. Γι' αυτό στέλνεται σε αυτούς μήνυμα για ανάκτηση της κατάστασής τους. Αν στείλουν αρνητικό για μαύρο σαν απάντηση και έχει ο κόμβος το μέγιστο βάρος, τότε γίνεται μαύρος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Το συνδεδεμένο ανεξάρτητο σύνολο (Connected Dominating Set) εν συνεχεία φτιάχνεται από κόμβους που δεν ανήκουν στο MIS.



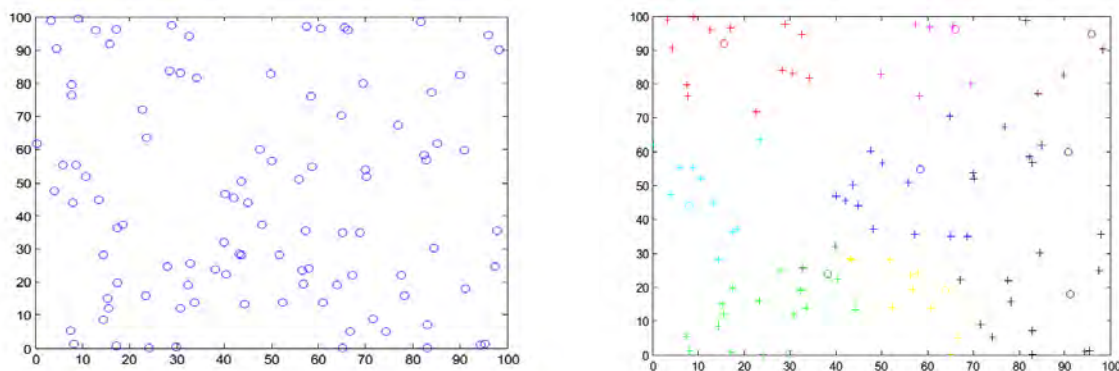
Εικόνα 5: Πρωτόκολλο EECDS [29]

Ο **CDS-Rule K** χρησιμοποιεί «σημάδεμα» των κόμβων και τον κανόνα «κλαδέματος». Ξεκινάμε από ένα μεγάλο σύνολο κόμβων και κλαδεύουμε σταδιακά. Αρχικά οι κόμβοι ανταλλάσσουν βάσεις δεδομένων σχετικά με γείτονες. Κάθε κόμβος προχωρεί, αν υπάρχει τουλάχιστον ένα ζευγάρι χωριστών γειτόνων. Έπειτα, κάθε κόμβος επιλέγει να αποσημαδευτεί, εάν όλοι οι γείτονές του καλύπτονται από σημαδεμένους κόμβους υψηλής προτεραιότητας, η οποία είναι αντίστροφα ανάλογη με το επίπεδο στο δέντρο (χαμηλό επίπεδο-υψηλή προτεραιότητα). Το τελικό δέντρο σχηματίζεται και οι πλεονάζοντες κόμβοι υψηλότερης ή ίσης προτεραιότητας απομακρύνονται.



Εικόνα 6: Δημιουργία τοπολογίας ενός μικρού WSN βάσει του CDS-RULE k (a-δημιουργία δένδρων μέσω DFS, b- αποκοπή μικρότερων δένδρων, c- Clustering)

Ο **HEED** είναι ένας καταναμημένος αλγόριθμος, ο οποίος επιλέγει πιθανοκρατικά τους cluster-heads βάσει της εναπομένουσας ενέργειας τους και ενσωματώνει τους κόμβους σε cluster με το ελάχιστο επικοινωνιακό κόστος. Εκμεταλλεύεται την διαθεσιμότητα πολλαπλών επιπέδων ενέργειας μετάδοσης.



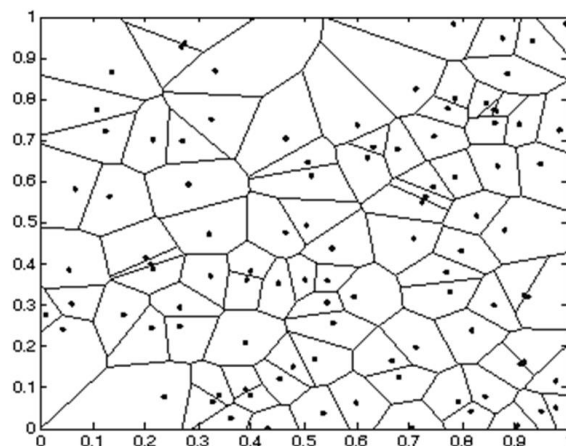
Εικόνα 7: Πρίν την εκτέλεση (αριστερά) και μετά την εκτέλεση (δεξιά) του HEED [34]

Στην κατηγορία (B) ανήκουν ενδεικτικά οι παρακάτω αλγόριθμοι:

- B1) Geometry-based: Gabriel graph (GG) [31], Relative neighborhood graph (RNG) [30], Voronoι διαγράμματα[32]
- B2) Spanning Tree Based: LMST [21], iMST [22]
- B3) Direction Based: Yao graph[23] and Nearest neighbor graph[24], Cone Based Topology Control (CBTC)[25]
- B4) Neighbor based: KNeigh[27]

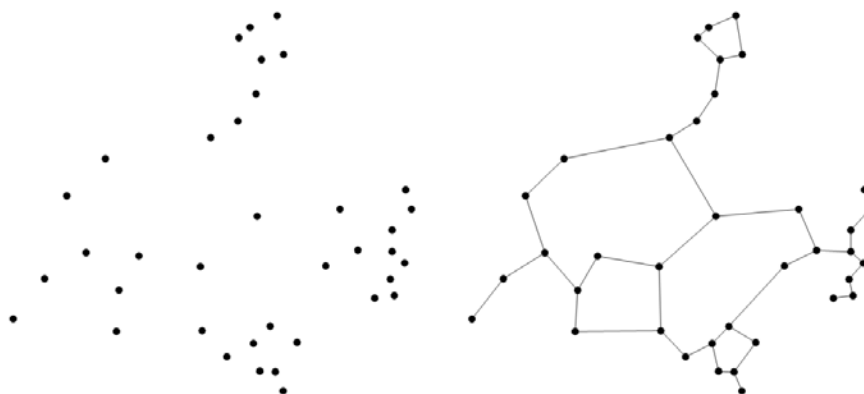
➤ B5) Routing based: COMPOW [26]

Στα διαγράμματα **Voronoi**, το πλέγμα κατατέμενεται σε περιοχές βάσει της απόστασης από σημεία ενός υποσυνόλου του πεδίου (εδώ το δίκτυο). Τα σημεία του εν λόγω υποσυνόλου έχουν προεπιλεγεί και για κάθε ένα από αυτά αντιστοιχεί μία περιοχή αποτελούμενη από τα πλησιέστερα σε αυτό σημεία που δεν ανήκουν στο υποσύνολο.



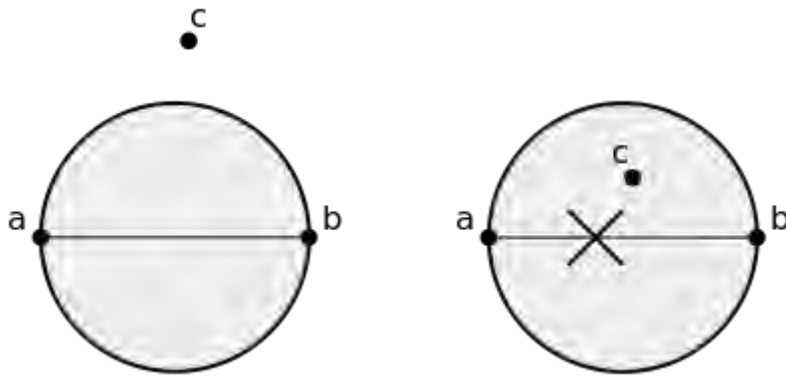
Εικόνα 8: Διάγραμμα Voronoi ενός WSN [32]

Το **Γράφημα Σχετικής Γειτνίασης (Relative Neighborhood Graph)** είναι ένα μη κατευθυνόμενο γράφημα το οποίο συνδέει δύο σημεία p και q με ακμή άμα δεν υπάρχει τρίτο σημείο r το οποίο να είναι πλησιέστερο τόσο στο p όσο και στο q από όσο είναι αυτά τα δύο μεταξύ τους.



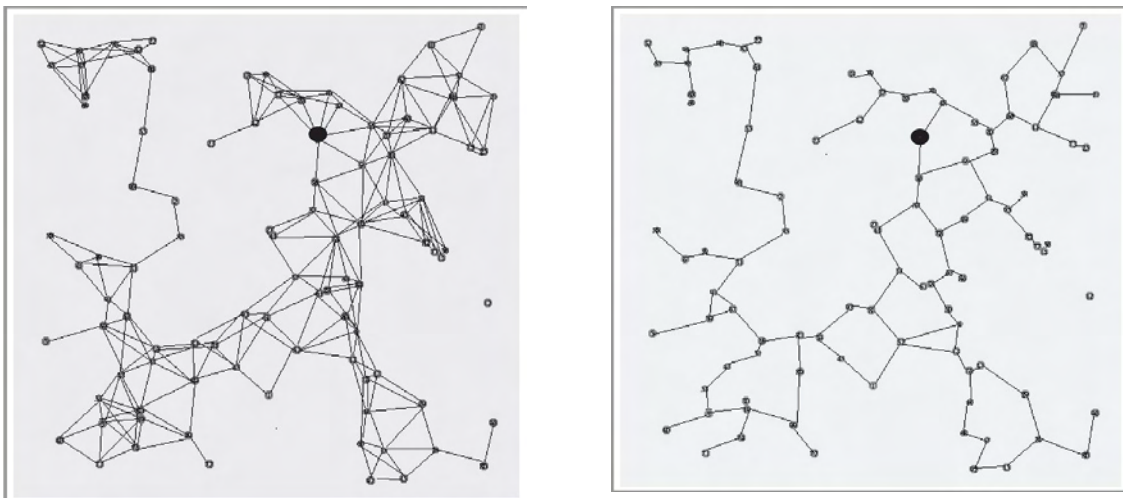
Εικόνα 9: Σύνολο σημείων (αριστερά) και το Γράφημα Σχετικής Γειτνίασής του(δεξιά)

Ο **Gabriel Graph** είναι ένας Γράφος όπου τα σημεία a και b θεωρούνται γειτονικά αν είναι διακριτά και ο δίσκος που σχηματίζεται από τα σημεία αυτά με διάμετρο ab δεν έχει άλλα σημεία.



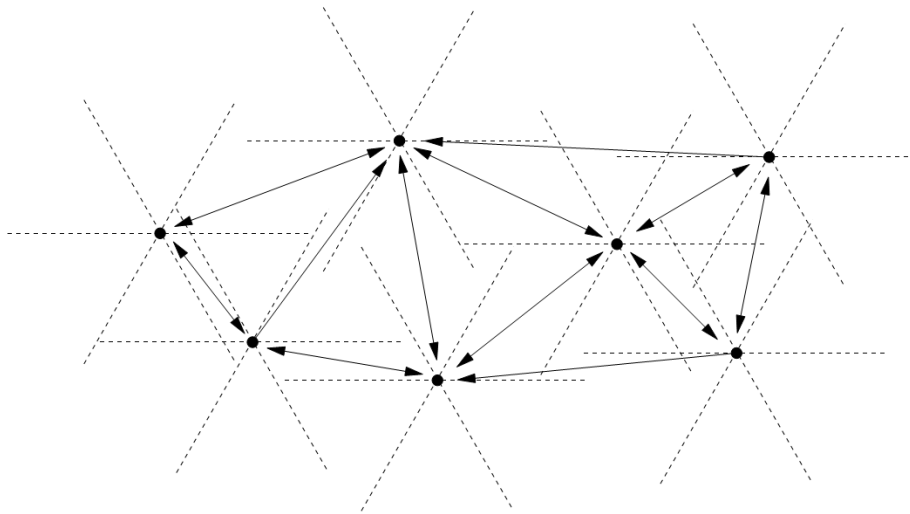
Εικόνα 10: Γειτονικά κατά Gabriel (αριστερά) και μη γειτονικά (δεξιά)

Τα **τοπικά ελάχιστα επικαλύπτοντα δέντρα (LMST)** είναι ένας πιθανοκρατικός αλγόριθμος ο οποίος σε ένα συνδεδεμένο γράφημα G και βάσει μιας παραμέτρου ϵ , $0 < \epsilon < \frac{1}{2}$, υπολογίζει το βάρος του ελάχιστου επικαλύπτοντος δέντρου με σχετικό σφάλμα το πολύ ϵ . Η προσέγγιση γίνεται σε υπογραμμικό χρόνο.



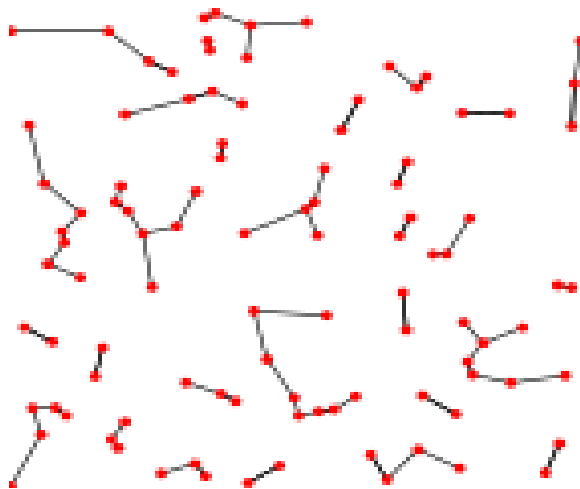
Εικόνα 11: Πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) από την εφαρμογή του LMST [35]

Στον **Γράφο Yao (Yao graph)**, κατασκευάζονται ελάχιστα επικαλύπτοντα δέντρα. Η βασική ιδέα είναι να περιβληθεί το κάθε ένα τα δεδομένα σημεία από ίσες ακτίνες που να μοιράζουν το πεδίο σε τομείς με ίσες γωνίες και να συνδέεται κάθε σημείο στον πλησιέστερο γείτονά του σε κάθε έναν από τους τομείς.



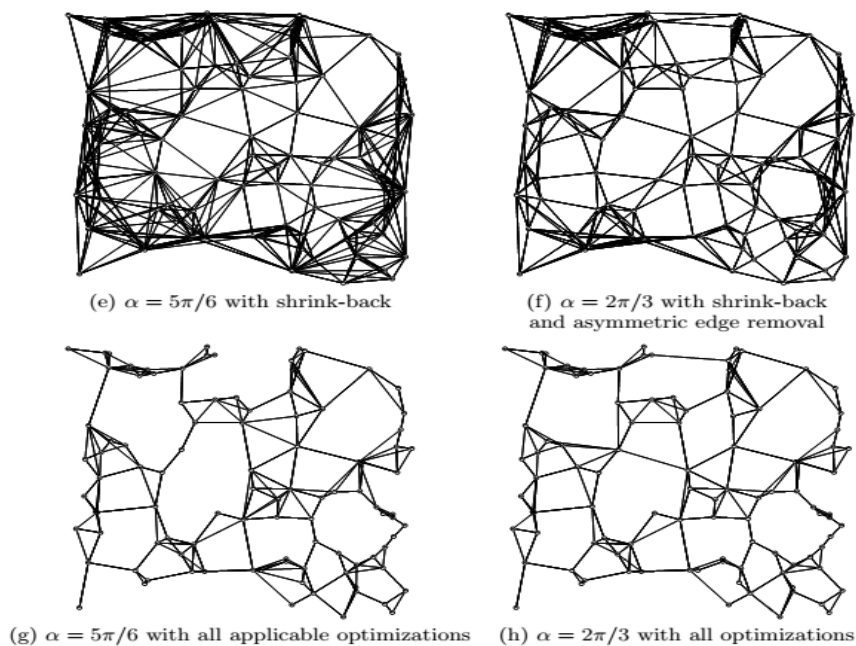
Εικόνα 12: Παράδειγμα γράφου Υαο [33]

Ο **Γράφος πλησιέστερου γείτονα (Nearest Neighbor Graph)** όπου κάθε σημείο ενώνεται με το πλησιέστερο του σε όλο το Γράφο.



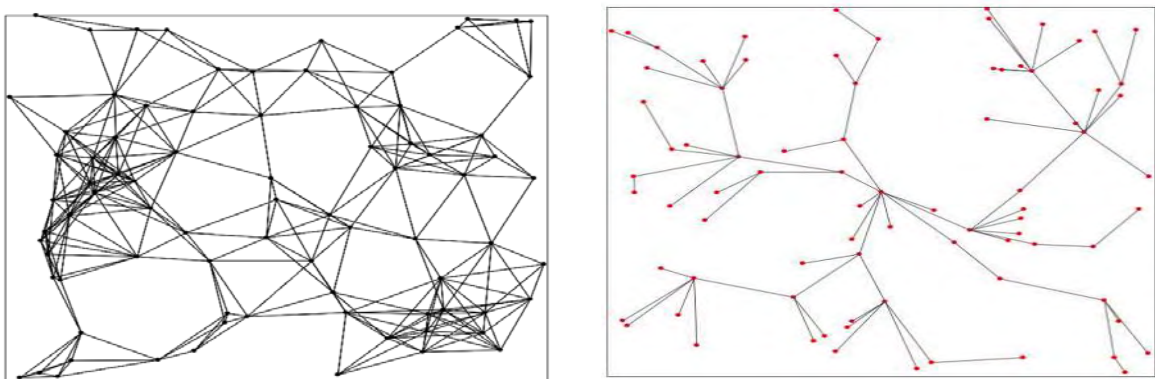
Εικόνα 13: Γράφος πλησιέστερου γείτονα 100 σημείων [36]

Ο **Cone Based Topology Control** βασίζεται στην πληροφορία της κατεύθυνσης (directional information). Η βασική ιδέα είναι ότι ένας κόμβος u που μεταδίδει μήνυμα με την ελάχιστη ισχύ $P_{u,a}$ που απαιτείται ώστε σε κάθε κώνο γωνίας α γύρω από τον u υπάρχει κάποιος κόμβος που μπορεί να δεχθεί το μήνυμα αυτό. Για τη διατήρηση της συνεκτικότητας αρκεί $\alpha=5\pi/6$.



Εικόνα 14: cone-based distributed για διάφορες τιμές του α [25]

Ο **K-Neigh**[27] ξεκινά ως εξής: Ο αρχικός κόμβος μεταδίδει ένα μήνυμα “Hello” σε όλους τους γείτονές της με τη μέγιστη ισχύ, το οποίο περιέχει τον αριθμό ταυτότητας και το επίπεδο στο δέντρο. Ο κόμβος που παίρνει το μήνυμα αυτό διατηρεί το ID του μεταδιδόμενου κόμβου και το επίπεδο στο δέντρο, υπολογίζει την απόσταση με το μεταδίδοντα κόμβο και θέτει την κατάστασή του στο reside. Μετά την αποδοχή του μηνύματος “Hello” προς το παρόν, ένας κόμβος μεταδίδει ένα δικό του μήνυμα “Hello” στους γείτονές της και θέτει ένα χρονόμετρο για να ακούσετε τα μηνύματα του γειτονικού κόμβου. Ο Kneigh υποθέτει ότι οι κόμβοι δεν έχουν καμία γνώση των θέσεών τους, και μπορούν να αλλάξουν ισχύ εκπομπής τους ομαλά.



Εικόνα 15: Αρχική τοπολογία πριν (αριστερά) και μετά την εφαρμογή του K-neigh (δεξιά) [29]

Μέχρι στιγμής είδαμε κάποια παραδείγματα αλγορίθμων κατασκευής τοπολογίας, που το βασικό κριτήριό τους είναι η κατασκευή βέλτιστων μονοπατιών και ο περιορισμός του πλήθους μηνυμάτων που ανταλλάσσονται. Σχετικά με τους αλγορίθμους clustering διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες:

- **Καθολικοί, Τοπικοί:** Οι καθολικοί αλγόριθμοι διαχειρίζονται όλους τους clusters του δικτύου, ενώ οι τοπικοί μόνο ένα υποσύνολο αυτών.
- **Δυναμικοί, στατικοί και μεικτοί :** Η δημιουργία του βέλτιστου πλήθους των clusters σε κάποιο Α.Δ.Α, ισοδυναμεί με το πρόβλημα του minimum dominating set, το οποίο είναι NP-complete. Οι αλγόριθμοι προσπαθούν προσεγγιστικά να προτείνουν τον βέλτιστο αριθμό των clusters. Επιπρόσθετα σε κάποιους το μέγεθος των clusters μπορεί να αλλάξει ή να παραμείνει στατικό.
- **Ενεργοποιούμενοι από χρόνο, ενέργεια, πυκνότητα, τυχαιότητα:** Στην κατηγορία αυτή η δημιουργία και η συντήρηση των clusters εξαρτάται από παράγοντες όπως χρόνος, καταναλισκόμενη ενέργεια, πυκνότητα κόμβων.

Βάση των παραπάνω κατηγοριών, αναφέρουμε ενδεικτικά κάποιους αλγόριθμους:

- **DGTRec (Dynamic Global Topology Recreation)[38]:** Καθολικός αλγόριθμος, ο οποίος περιοδικά ενεργοποιεί αδρανείς κόμβους, κάνει reset την υπάρχουσα τοπολογία στο δίκτυο και εφαρμόζει έναν αλγόριθμο κατασκευής, σαν αυτούς που είδαμε πρωτύτερα.
- **SGTRot (Static Global Topology Rotation)[38]:** Καθολικός αλγόριθμος. Αρχικά το πρωτόκολλο κατασκευής τοπολογίας πρέπει να δημιουργήσει περισσότερες από μία reduced τοπολογίες (ελπίζουμε να είναι όσο το δυνατόν ασύνδετες). Μετά, περιοδικά, ενεργοποιεί τους αδρανείς κόμβους και αλλάζει την τρέχουσα ενεργή reduced τοπολογία με την επόμενη.
- **HGTRotRec (Hybrid Global Topology Rotation and Recreation)[38]:** Ενεργεί όπως η προηγούμενη, αλλά αν η τρέχουσα ενεργή reduced τοπολογία ανιχνεύει ένα ορισμένο επίπεδο αποσύνδεσης, επαναφέρει την reduced τοπολογία και καλεί το πρωτόκολλο κατασκευής τοπολογίας για να αναδημιουργήσουν τη συγκεκριμένη reduced τοπολογία.
- **DL-DSR (Dynamic Local DSR-based TM)[38]:** Αυτό το πρωτόκολλο, με βάση το Dynamic Source Routing (DSR) αλγόριθμο δρομολόγησης, αναδημιουργεί τα μονοπάτια των αποσυνδεδεμένων κόμβων, όταν ένας κόμβος αποτύχει.

2.5 Κατανάλωση ενέργειας

Ο ασύρματος κόμβος αισθητήρα, αφού είναι μια μικρό-ηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να εφοδιαστεί με μια περιορισμένη πηγή ενέργειας (<0.5 Ah, 1.2V). Η αντικατάσταση αυτής της πηγής ενέργειας συνήθως είναι αδύνατη, συνεπώς η ζωή του κόμβου αισθητήρα εξαρτάται από αυτήν. Σε ένα δίκτυο αισθητήρων ο κάθε κόμβος παίζει το ρόλο του αποστολέα, του παραλήπτη, αλλά και του δρομολογητή (relay node) για άλλους κόμβους ώστε να προωθεί τα πακέτα τους. Τυχόν βλάβες σε κάποιους από τους κόμβους δημιουργούν ανάγκη για αναδιοργάνωση του δικτύου και επαναδρομολόγηση των μηνυμάτων. Συνεπώς, η σωστή διαχείριση της ενέργειας των κόμβων παίζει μεγάλο ρόλο. Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αποδοθεί σε τρεις λειτουργίες: 1) *μέτρηση φυσικών ποσοτήτων (sensing)*, 2) *επικοινωνία (transmission)* και 3) *επεξεργασία δεδομένων (data processing)*.

Η πιο απαιτητική λειτουργία από άποψη κατανάλωσης ενέργειας είναι η επικοινωνία. Συνήθως για τις μικρές αποστάσεις που λειτουργούν οι αισθητήριοι κόμβοι η κατανάλωση είναι ίδια κατά την εκπομπή και την λήψη. Βεβαίως, εκτός από αυτό, σοβαρό ρόλο παίζει και το άνοιγμα και κλείσιμο του κυκλώματος του πομποδέκτη. Στο [16] η εξίσωση που περιγράφει την κατανάλωση ενέργειας του κόμβου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_c = N_T [P_T (T_{on} + T_{st}) + P_{out} (T_{on})] + N_R [P_R (R_{on} + R_{st})]$$

όπου P_T/R είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομπό/δέκτη, P_{out} η ενέργεια εξόδου του πομπού, T/R_{on} ο χρόνος που ο πομπός/δέκτης είναι ενεργός, T/R_{st} ο χρόνος έναρξης του πομπού/δέκτη και N_T/R ο αριθμός των φορών που ο πομπός/δέκτης ανοίγει στην μονάδα του χρόνου, ο οποίος και εξαρτάται από το ανατιθέμενο σκοπό αλλά και το πρωτόκολλο στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (MAC Layer). Οι σημερινοί πομποδέκτες έχουν τυπικές τιμές P_T και P_R περίπου στα 20 dbm και P_{out} κοντά στα 0 dbm.

2.6 Διάρκεια Ζωής του Δικτύου

Κρίσιμη σε οποιαδήποτε εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων είναι η αναμενόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου, δηλαδή μετά από πόσο χρονικό διάστημα θα σταματήσει το δίκτυο να επιτελεί την λειτουργία για την οποία σχεδιάστηκε. Ο ορισμός της διάρκειας ζωής ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή που εξετάζουμε και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως: τοπολογία δικτύου, πρωτόκολλα δρομολόγησης, πολιτικές εξοικονόμησης ενέργειας στους

κόμβους, παράμετροι στου PHY και MAC στρώμα καθώς επίσης και από το είδος της υπηρεσίας που το A.Δ.Α. προσφέρει. Υπάρχουν τρεις επικρατέστεροι ορισμοί της διάρκειας ζωής, που περιγράφονται από τις ακόλουθες μετρικές: 1) Ο πρώτος κόμβος που εξαντλεί τα ενεργειακά του αποθέματα (First Node Dies – FND), 2) Ο τελευταίος κόμβος που εξαντλεί τα ενεργειακά του αποθέματα (Last Node Dies – LND) και 3) Μισοί κόμβοι (ή ένα ποσοστό αυτών) εξαντλούν τα ενεργειακά τους αποθέματα (Half Nodes Dies – HND). Ανάλογα λοιπόν με το σενάριο εφαρμογής A.Δ.Α. που εξετάζουμε, υπάρχουν περιπτώσεις όπου είναι αναγκαίο όλοι οι κόμβοι να μένουν ζωντανοί όσο το δυνατόν περισσότερο, διότι σε διαφορετική περίπτωση η ποιότητα των μετρούμενων ποσοτήτων μειώνεται. Στην περίπτωση αυτή η μετρική FND είναι κατάλληλη. Σε άλλες περιπτώσεις όμως, όπου οι κόμβοι τοποθετούνται σε κοντινές αποστάσεις και η αλληλοσυσχέτιση στις μετρήσεις τους είναι μεγάλη, η μετρική HND είναι κατάλληλο διότι η ποιότητα του δικτύου δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον ενεργειακό θάνατο κάποιων κόμβων.

Ο στόχος και των εφαρμογών περιβαλλοντικού ελέγχου και των εφαρμογών ασφάλειας είναι να τοποθετηθούν κόμβοι, αψύλακτοι για μήνες ή ακόμη και έτη. Ο βασικός περιοριστικός παράγοντας για τη διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων είναι η χωρητικότητα του συσσωρευτή ενέργειας του συστήματος και κατ' επέκταση ο ενεργειακός ανεφοδιασμός των κόμβων. Κάθε κόμβος θα πρέπει να διαχειριστεί με τον βέλτιστο τρόπο τα ενεργειακά του αποθέματα, αλλά και συνεργατικά όλοι μαζί να στοχεύουν στο να μεγιστοποιηθεί η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ένα δίκτυο αισθητήρων που λειτουργεί ως σύστημα ασφάλειας, όπου κάθε κόμβος πρέπει να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, αφού η αποτυχία κάποιου μπορεί να δημιουργήσει ευπάθεια σε όλο το σύστημα ασφάλειας.

Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι δυνατό να γίνει χρήση εξωτερικής ενέργειας. Εντούτοις, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα στα ασύρματα συστήματα είναι η ευκολία της εγκατάστασης. Η απαίτηση, λοιπόν, να παρασχεθεί ενέργεια εξωτερικά σε όλους τους κόμβους στην ουσία καταργεί κατά ένα μεγάλο μέρος αυτό το πλεονέκτημα. Ένας συμβιβασμός είναι να υπάρξει μια μικρή ομάδα ειδικών κόμβων που συνδέονται με καλώδιο στην υποδομή ενέργειας.

Στα περισσότερα σενάρια εφαρμογών, η πλειοψηφία των κόμβων θα πρέπει να είναι αυτοτροφοδοτούμενοι. Θα πρέπει, λοιπόν, είτε να περιέχουν αρκετή αποθηκευμένη ενέργεια για να διαρκέσουν για χρόνια, είτε αυτοί θα πρέπει να είναι σε θέση να αντλήσουν ενέργεια από το περιβάλλον μέσω συσκευών όπως οι ηλιακές κυψέλες είτε οι πιεζοηλεκτρικές

γεννήτριες. Και οι δύο επιλογές απαιτούν η μέση κατανάλωση ενέργειας των κόμβων να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Ο σημαντικότερος παράγοντας στον καθορισμό της διάρκειας ζωής ενός ενεργειακού ανεφοδιασμού είναι η κατανάλωση ισχύος. Σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων ο ραδιοπομπός καταναλώνει ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας του συστήματος. Αυτή η κατανάλωση ισχύος μπορεί να μειωθεί είτε μέσω της μείωσης της ισχύος μετάδοσης ή μέσω της μείωσης του κύκλου ζωής του ραδιοπομπού, ή με κατάλληλη τοποθέτηση των κόμβων στο χώρο, ώστε οι αποστάσεις πομπού – δέκτη να είναι μικρές, ή μέσω ενεργειακά αποδοτικού αλγορίθμου δρομολόγησης.

3. Αλγόριθμος Ομαδοποίησης LEACH και οι Παραλλαγές του

3.1 Βασικά χαρακτηριστικά του LEACH

Ο αλγόριθμος L.E.A.C.H (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [2] είναι ένας αλγόριθμος - πρωτόκολλο ομαδοποίησης κόμβων σε Α.Δ.Α., ο οποίος εφαρμόζει τυποποιημένη περιστροφή (randomized rotation) του ρόλου του cluster-head ώστε να κατανέμει ομοιόμορφα τα ενεργειακά αποθέματα μεταξύ των κόμβων στο δίκτυο. Ο κάθε cluster head χρησιμοποιεί TDMA πρωτόκολλο για να ειδοποιήσει τους κόμβους – μέλη της ομάδας του πότε μπορούν να στείλουν δεδομένα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του αλγορίθμου αυτού είναι τα εξής:

- Τοπική απόφαση για την δημιουργία και λειτουργία των cluster heads και των clusters.
- Τυχαία εναλλαγή του ρόλου cluster head με τον ρόλο του απλού κόμβου για εξισορρόπηση ενέργειας.
- Συμπίεση δεδομένων για την ελαχιστοποίηση της ολικής ενέργειας κατά την αποστολή δεδομένων.

Στις ακόλουθες ενότητες θα εξετάσουμε με λεπτομέρεια τον τρόπο λειτουργίας του LEACH, καθώς και κάποιες παραλλαγές αυτού.

3.2 Μοντέλο Συστήματος

Το μοντέλο συστήματος δικτύου αισθητήρων για το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί ο LEACH είναι το ακόλουθο:

- Η θέση του σταθμού βάσης (Base Station) είναι σταθερή και δεν αλλάζει.
- Όλοι οι απλοί κόμβοι είναι ομογενείς όσο αφορά το υλικό, το λογισμικό τους και έχουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα. Αρχικά επιφορτίζονται με την ίδια ενέργεια.
- Δύο κόμβοι θεωρούνται γείτονες, εάν ο ένας είναι εντός της επικοινωνιακής εμβέλειας του άλλου.
- Οι θέσεις των κόμβων είναι σταθερές και δεν αλλάζουν. Αυτό σημαίνει ότι η τοπολογία Α.Δ.Α. είναι στατική.
- Ο κάθε αισθητήρας «αντιλαμβάνεται» το περιβάλλον του, λαμβάνει μετρήσεις και δημιουργεί πακέτα δεδομένων μήκους k bits.

Η κατανάλωση ενέργειας, τόσο για την αποστολή όσο και για την λήψη δεδομένων, βασίζεται στο *first order radio model*. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ο κόμβος καταναλώνει ενέργεια ίση με $E_{elec}= 50\text{nJ/bit}$ για τη λειτουργία του κυκλώματος αποστολέα/ παραλήπτη και $e_{amp}=100\text{pJ/bit/m}^2$ για τον ενισχυτή μετάδοσης για την επίτευξη ενός ικανοποιητικού σηματοθρομβικού λόγου E_b/N_o . Συνεπώς για την μετάδοση ενός μηνύματος μήκους k bits σε απόσταση d , η απαιτούμενη ενέργεια δίνεται από την σχέση:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + e_{amp} * k * d^2 \quad (1)$$

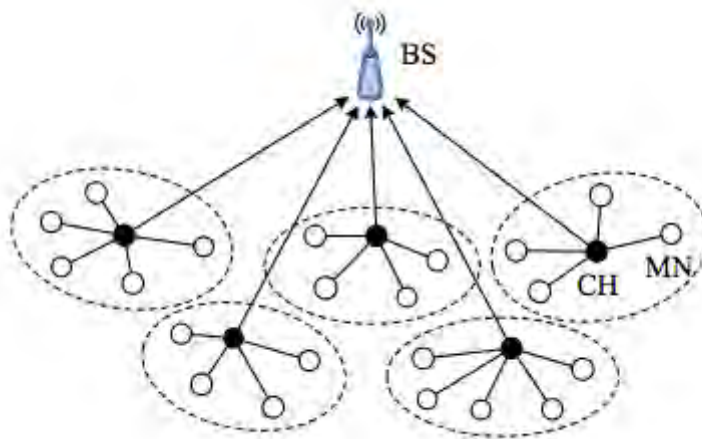
ενώ για την λήψη ενός μηνύματος η απαιτούμενη ενέργεια δίνεται από την σχέση:

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k \quad (2)$$

Το κανάλι θεωρείται συμμετρικό, με την έννοια ότι η απαιτούμενη ενέργεια για τη μετάδοση δεδομένων από τον Α στον Β και αντίστροφα είναι ίδια για δεδομένο SNR.

3.3 Χαρακτηριστικά του LEACH

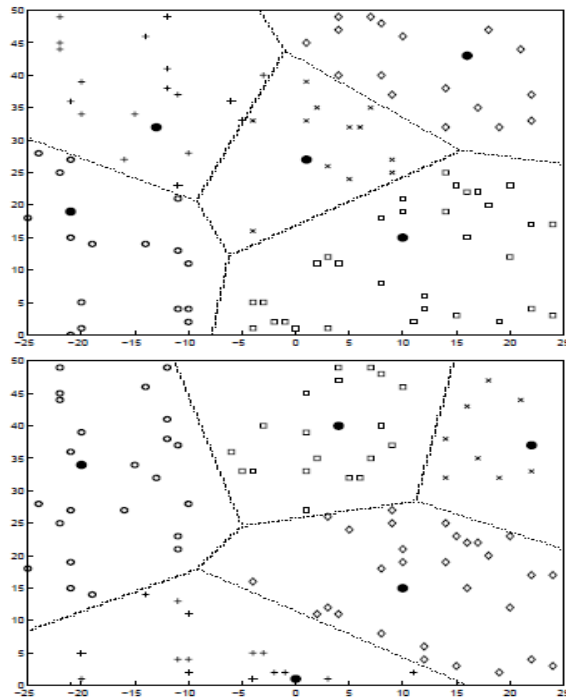
Ο LEACH είναι ένας ενεργειακά αποδοτικός αλγόριθμος ομαδοποίησης, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί για να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Βάση των χαρακτηριστικών του πετυχαίνει ομοιόμορφη κατανομή ενέργειας ανάμεσα στους κόμβους και συνεπώς οδηγεί σε ομοιόμορφο «θάνατο» των κόμβων. Οι κόμβοι οργανώνονται τοπικά σε cluster (συστάδες), όπου σε κάθε μία εκλέγεται ένας cluster-head. Το βασικό πλεονέκτημα της λειτουργίας του LEACH είναι ότι εναλλάσσει τον ρόλο του απλού κόμβου με αυτού του cluster-head. Σε διαφορετική περίπτωση, εάν οι cluster heads παραμένουν σταθεροί, θα καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια αφού δέχονται περισσότερα μηνύματα από έναν απλό κόμβο, με αποτέλεσμα ο συνολικός χρόνος ζωής του δικτύου να μειώνεται. Η τυχαία εναλλαγή των ρόλων εντός του cluster λύνει το πρόβλημα της πρόωρης εξάντλησης ενέργειας σε κάποιον κόμβο. Για την περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας κατά την αποστολή, ο LEACH πραγματοποιεί τοπική συμπίεση δεδομένων προς τον σταθμό βάσης. Συνεπώς, ο κάθε cluster head βάση ενός συντελεστή c , με $c \leq 1$, αποστέλλει ένα μήνυμα μήκους $c \times z$ bits. Στην εικόνα 16 φαίνεται η οργάνωση ενός Α.Δ.Α. σε clusters.



Εικόνα 16: Οργάνωση ενός WSN σε συστάδες όπου μπορεί να εκτελεστεί ο LEACH

Ο LEACH εκτελεί τις φάσεις του σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο που ονομάζεται round. Οι κόμβοι με μία πιθανότητα p θέτουν τους εαυτούς τους ως τοπικούς cluster heads μετά από κάθε round. Κατόπιν, οι απλοί κόμβοι, που δεν εκλέχτηκαν ως clusters για τον συγκεκριμένο round, προσαρτώνται σε ένα cluster βάση της ισχύος του σήματος που έλαβαν από έναν cluster. Μεγαλύτερη ισχύ σημαίνει καλύτερο SNR και άρα μεγαλύτερη πιθανότητα ο κόμβος να προσαρτηθεί στον cluster head με το καλύτερο κανάλι. Όταν ολοκληρωθεί η κατανομή των κόμβων σε κάθε cluster, ο εκάστοτε cluster-head χρονοπρογραμματίζει βάση TDMA πρωτοκόλλου την δυνατότητα των κόμβων να στέλνουν δεδομένα. Κατόπιν τα δεδομένα συμπίεζονται και στέλνονται 1-hop στον σταθμό βάσης. Η εξάντληση της ενέργειας του cluster head δεν είναι μεγάλη, αφού στον επόμενη γύρο (round) εκλέγεται νέος cluster head. Αυτό έχει ως συνέπεια να αλλάξει τόσο το μέγεθος ώστε και η κατανομή των κόμβων ανά cluster. Αυτό που παραμένει σταθερό είναι ο συνολικός αριθμός των cluster-heads (και κατ' επέκταση και το σύνολο των clusters), που είναι περίπου 5% επί του συνόλου των κόμβων στο Α.Δ.Α.

Παρόλα αυτά, ο ρόλος του cluster head είναι ενεργοβόρο, ακόμη και αν διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα. Η τυχαία εναλλαγή του ρόλου όμως παρατείνει την διάρκεια ζωής του δικτύου σε σχέση με μία στατική εκχώρηση του ρόλου του cluster head. Το αποτέλεσμα της εναλλαγής σε κάθε round συνεπάγεται την αλλαγή του σχήματος του cluster, όπως επίσης και του πλήθους κόμβων που ανήκουν σε αυτό, όπως φαίνεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 17: Δύο στιγμιότυπα του LEACH για το ίδιο δίκτυο[2]. Τα clusters οροθετούνται από τις ευθείες γραμμές. Με μαύρο χρώμα είναι οι cluster-heads και με άσπρο οι υπόλοιποι κόμβοι.

Παρατηρούμε ότι την χρονική στιγμή t_1 round (1^η εικόνα) οι συγκεκριμένοι cluster heads οριοθετούν τα clusters τους, ενώ σε μεταγενέστερο $t_1 + \Delta t$ round (2^η εικόνα) αφού έχουν αλλάξει οι clusters, τα clusters έχουν αλλάξει μέγεθος, αλλά το πλήθος τους είναι σταθερό.

3.3 Περιγραφή Φάσεων του LEACH

Η λειτουργία του LEACH χωρίζεται σε γύρους (rounds), όπου κάθε round αποτελείται από τις ακόλουθες φάσεις:

- Set-up phase: όπου οι clusters εκλέγονται
- Steady-state phase: όπου γίνεται η μεταφορά δεδομένων στον base-station

Αρχικά, στην **set up phase**, προκειμένου να δημιουργηθούν τα clusters, ο κάθε κόμβος αποφασίζει αν θα γίνει cluster-head ή όχι, τυχαία βάση πιθανότητας και ενός προαποφασισμένου ποσοστού P , που δηλώνει το συνολικό ποσοστό των clusters. Στην συνέχεια παράγεται με μία ομοιόμορφη κατανομή $\text{rand}(\cdot)$ ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ $0 \dots 1$, ο οποίος συγκρίνεται με το αριθμό $T(n)$ που δίνεται από την σχέση:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod 1/P)}, & \text{if } n \in G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

όπου P το επιθυμητό ποσοστό των cluster-heads ($P = 0.005$), r ο τρέχων γύρος και G το σύνολο των κόμβων που δεν ήταν cluster-heads τους τελευταίους $1/P$ γύρους, τότε ο κόμβος n γίνεται cluster-head. Εάν $\text{rand}(\cdot) < T(n)$, τότε ο κόμβος n γίνεται cluster για τον συγκεκριμένο round.

Στη συνέχεια, οι νέο-εκλεγμένοι cluster-heads ανακοινώνουν με broadcast μήνυμα τον νέο τους ρόλο στους υπόλοιπους κόμβους, βάση CSMA MAC πρωτοκόλλου, ώστε να αποφεύγονται περιπτώσεις παρεμβολών λόγω των όμοιων επιπέδων ισχύος που χρησιμοποιούν οι cluster heads. Οι απλοί κόμβοι κατανέμονται στο κάθε cluster βάση του επιπέδου ισχύος και του SNR που μετρούν στο δέκτη τους. Όταν ληφθεί η απόφαση, ο κάθε κόμβος πληροφορεί τον εκάστοτε cluster head ότι είναι μέλος του cluster που έχει οριοθετήσει, επίσης χρησιμοποιώντας CSMA MAC.

Μετά την cluster set-up φάση, όλοι οι cluster-heads θέτουν τους πομποδέκτες τους σε λειτουργία και έπεται η φάση του cluster creation, όπου ο cluster head λαμβάνει τα μηνύματα των υποψηφίων μελών του cluster και τους οργανώνει βάση TDMA scheduling για το πότε μπορεί ο καθένας να στείλει δεδομένα.

Τέλος, ακολουθεί η φάση της μετάδοσης δεδομένων (data transmission phase). Υποθέτουμε ότι οι κόμβοι έχουν πάντα να στείλουν δεδομένα στο cluster head και το κάνουν βάση του TDMA σχήματος που τους έχει αποδοθεί. Για περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας, οι κόμβοι ενεργοποιούν τους πομποδέκτες τους μόνο όταν έλθει η χρονοθυρίδα τους για αποστολή δεδομένων. Μόλις ολοκληρωθεί η αποστολή και συγκομιδή όλων των δεδομένων στον cluster head, συμπιέζονται και στέλνεται ένα ενιαίο σήμα στον σταθμό βάσης. Φυσικά η απόσταση του κάθε cluster head με τον σταθμό βάσης παίζει ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας βάση των σχέσεων (1) και (2). Η **steady-state** φάση αφορά την συλλογή όλων των πακέτων από κάθε cluster head και την αποστολή τους στον σταθμό βάσης. Κατόπιν ο αλγόριθμος

συνεχίζει από την αρχή, σε νέο round, όπου γίνεται νέο cluster election και σχηματίζονται τα νέα clusters.

3.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του LEACH

Ο LEACH είναι ένα πρωτόκολλο ομαδοποίησης και δρομολόγησης, το οποίο πετυχαίνει να ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας σε Α.Δ.Α., συγκρινόμενο με αλγόριθμους στατικών clusters ή απευθείας μετάδοσης δεδομένων. Συνεπώς, αποτελεί μία καλή λύση για ομοιόμορφη μεταξύ κόμβων κατανομή της ενέργειας μέσω δυναμικού σχηματισμού των clusters και την τυχαία εναλλαγή των ρόλων απλού κόμβου και cluster head σε κάθε round. Η ομαδοποίηση κόμβων μειώνει την απόσταση μεταξύ κόμβου και cluster head, συνεπώς και την ενέργεια κατά την αποστολή πακέτου. Ο LEACH λειτουργεί κατανεμημένα, χωρίς να χρειάζεται περαιτέρω έλεγχος από τον σταθμό βάσης. Προσομοιώσεις που έχουν γίνει [9] μαρτυρούν ότι ο LEACH πετυχαίνει μέχρι και 8 φορές περισσότερη μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε σύγκριση με αλγόριθμους ελάχιστης διαδρομής. Ωστόσο, παρουσιάζει διάφορα μειονεκτήματα.

Συγκεκριμένα, οι cluster heads επιλέγονται τυχαία, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη τα ενεργειακά αποθέματα των υποψηφίων cluster heads. Οι κόμβοι με χαμηλά ποσά ενέργειας έχουν στατιστικά την ίδια πιθανότητα να γίνουν cluster-heads με αυτούς που έχουν υψηλή ενέργεια, με αποτέλεσμα να οδηγηθούν γρηγορότερα σε ενεργειακό θάνατο. Επιπρόσθετα, η κατανομή των κόμβων στα clusters που δημιουργούνται μπορεί να μην είναι ενεργειακά βέλτιστη. Ο λόγος είναι ότι η παράμετρος της απόστασης μεταξύ κόμβων και cluster heads όπως και cluster heads – σταθμού βάσης δεν λαμβάνεται υπόψη. Οι κόμβοι επιλέγουν το cluster τους βάση της έντασης του λαμβανομένου σήματος και όχι βάση της ευκλείδειας απόστασης. Συνεπώς μπορεί να επιλέξουν cluster heads μακρινούς. Το ίδιο συμβαίνει και με τους cluster heads. Δεν επιλέγονται με κριτήριο που να αντικατοπτρίζει την σχετική απόστασή τους με τον σταθμό βάσης. Για όλους αυτούς τους λόγους, οι ερευνητικές ομάδες έχουν στοχεύσει στο να αναπτύξουν παραλλαγές του LEACH, στην προσπάθειά τους να μετατρέψουν τα μειονεκτηματά του σε πλεονεκτήματα.

3.4 Παραλλαγές του LEACH

Μετά τον LEACH άλλοι ερευνητές πρότειναν κάποιες παραλλαγές αυτού, οι οποίες κατά κύριο λόγο δημιουργήθηκαν για να βελτιώσουν κάποια από τα μειονεκτήματα του LEACH. Παρόλα αυτά, σχεδόν όλες οι παραλλαγές του LEACH, ακολουθούν την ίδια λογική τόσο κατά την λειτουργία των φάσεων, όσο κατά την αποστολή/λήψη δεδομένων. Το σημείο που διαφοροποιούνται αφορά την ενσωμάτωση περισσότερων παραμέτρων στην σχέση (3) για την εκλογή του cluster head, ώστε να λαμβάνονται υπόψη κριτήρια όχι μόνο της εναπομείνουσας ενέργειας των κόμβων, αλλά των σχετικών αποστάσεών τους με τους cluster heads και του cluster head με τον σταθμό βάσης. Στο σημείο αυτό, επιλέγουμε και αναφέρουμε ενδεικτικά τις ακόλουθες παραλλαγές LEACH:

- I-LEACH [10]: *Improvement of LEACH Routing Protocol*
- L-LEACH[11]: *An Energy Balanced Clustering Algorithm Based on LEACH Protocol*
- W-LEACH[12]: *Weighted Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Aggregation Algorithm for Data Streams in Wireless Sensor Networks*

3.4.1 I-LEACH

Στο [10] προτείνεται ο I-LEACH, που αποτελεί μία από τις παραλλαγές του LEACH. Η επιλογή των cluster heads γίνεται βάση της εναπομείνουσας ενέργειας των κόμβων και βάση της απόστασης μεταξύ των cluster heads. Διαφορετικά από το μοντέλο συστήματος του LEACH, στον I-LEACH δίνεται η δυνατότητα στους κοντινούς του σταθμού βάσης cluster heads να επικοινωνούν μαζί του απευθείας (1-hop) ή να επιλέγουν άλλους cluster heads ως relays (multi-hop) με σκοπό να εξοικονομήσουν ενέργεια.

Σε αντιδιαστολή με τον LEACH, η εναπομείνουσα ενέργεια του κάθε κόμβου λαμβάνεται υπόψη στην διαδικασία επιλογής των νέων cluster heads, η οποία συγκρίνεται με την μέση ενέργεια όλων των κόμβων στο cluster. Επίσης λαμβάνεται υπόψη ένας παράγοντας απόστασης μεταξύ ενός κόμβου και του κοντινότερου υποψήφιου cluster head. Εάν ένας κόμβος έχει ενέργεια μικρή σε σχέση με την μέση ενέργεια όλων των υπολοίπων, έχει και λιγότερη πιθανότητα να εκλεγεί cluster head. Ο τύπος υπολογισμού του κατωφλιού $T(n)$ τροποποιείται ως εξής:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p(r \bmod (1/p))} \times \frac{E_{nc}}{E_{na}} \times \min\left(1, \frac{d_{nmin}}{d_0/2}\right), & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (4)$$

όπου E_{nc} η εναπομένουσα ενέργεια του κόμβου n , E_{na} η μέση ενέργεια όλων των κόμβων που «ζουν» ακόμα στο WSN, d_{nmin} η απόσταση μεταξύ κόμβου n και πλησιέστερου cluster-head και $d_0/2$ η απόσταση κατωφλίου. Η επιλογή του cluster-head στον οποίο υπάγεται ο κόμβος n γίνεται βάσει της παρακάτω κλαδικής εξίσωσης:

$$P(i, j) = \begin{cases} \frac{E_{cc(j)}}{E_{ca} \times d(i, j) \times d_{sink(j)}}, & d \leq d_0 \\ \frac{E_{cc(j)}}{E_{ca} \times d(i, j)^2 \times d_{sink(j)}}, & d > d_0 \end{cases} \quad (5)$$

Όπου $E_{cc(j)}$ η εναπομένουσα ενέργεια του cluster-head j , E_{ca} η μέση ενέργεια των cluster-heads, $d(i, j)$ η απόσταση μεταξύ κόμβου i και cluster-head j και $d_{sink(j)}$ η απόσταση μεταξύ cluster-head j και base-station. Τελικά διαλέγεται ο κόμβος με την μεγαλύτερη τιμή $P(i, j)$.

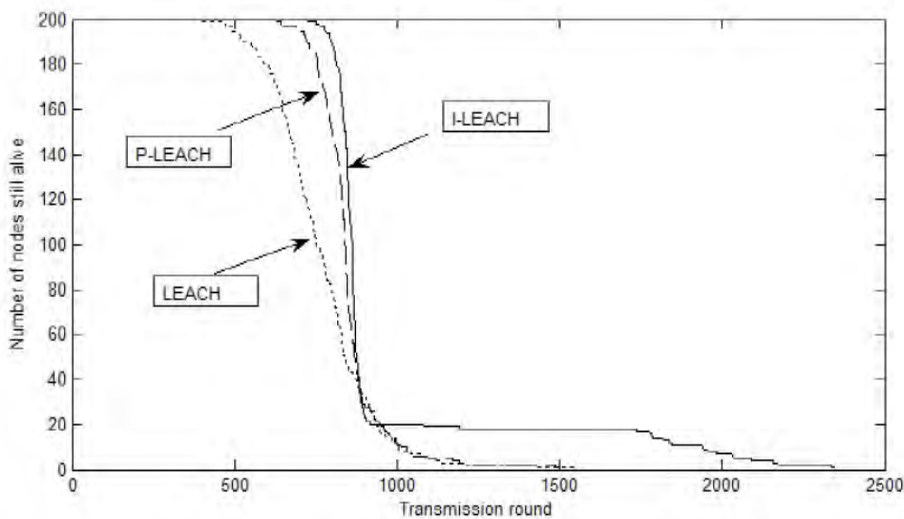
Για περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, οι clusters κάνουν *single-hop/multi-hop* αποστολή των μηνυμάτων στον base station, σε αντίθεση με τον απλό LEACH, ο οποίος κάνει μόνο *single-hop* αποστολή. Αρχικά υπολογίζουν την παράμετρο $C(i, j)$:

$$C(i, j) = \begin{cases} \frac{E_{ccurrnt}(i)^2}{d(i, j) \times d_{sink(i)}}, & d_{sink(i)} < d_{sink(j)} \\ 0, & d_{sink(i)} \geq d_{sink(j)} \end{cases} \quad (6)$$

όπου $d(i, j)$ η απόσταση μεταξύ των cluster-heads i και j . Ουσιαστικά η παράμετρος $C(i, j)$ χρησιμοποιείται για να καθορίσει την επικοινωνία μεταξύ των clusters, αφού στον I-LEACH υποστηρίζεται το σχήμα cluster-to-cluster επικοινωνίας. Κάποιοι cluster-heads θα αποστείλουν τα μηνυμάτά τους κατευθείαν στον base-station αν είναι αρκετά κοντά σε αυτόν ή αν οι γείτονές τους δεν έχουν αρκετοί ενέργεια. Οι υπόλοιποι θα στείλουν τα δεδομένα τους στον cluster-head j με τη μέγιστη τιμή $C(i, j)$.

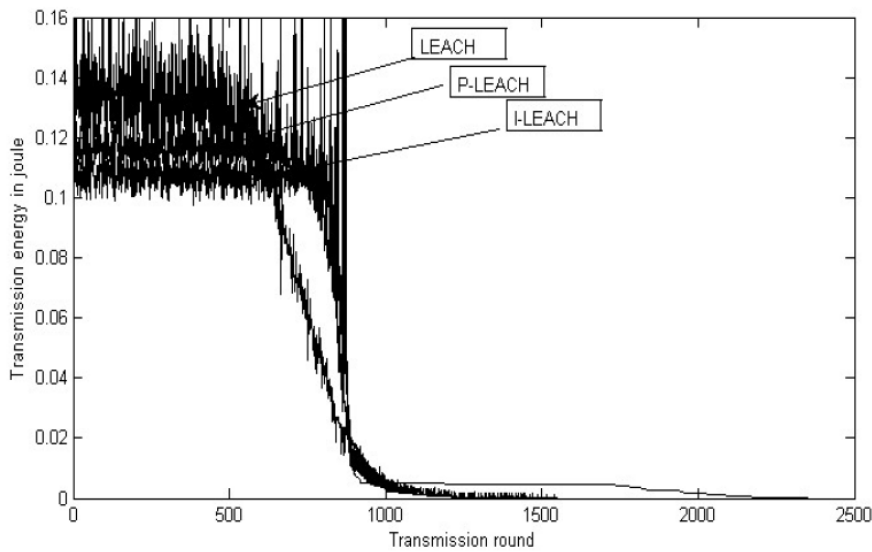
Αυτή η παραλλαγή του LEACH έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει μια ομοιόμορφα κατανομημένη κατανάλωση ενέργειας, δίνοντας μεγαλύτερη προτεραιότητα στους κόμβους με μεγαλύτερη ενέργεια να γίνουν cluster-heads. Με το κριτήριο της απόστασης εκλέγεται cluster head ο κόμβος που βρίσκεται κοντινότερα στους απλούς κόμβους και έχει μικρή απόσταση είτε από τον σταθμό βάσης, είτε από έναν άλλον cluster head που λειτουργεί ως relay.

Επίσης με την εισαγωγή της multi-hop δρομολόγησης, δύναται να μειωθεί η ενέργεια που δαπανά ένας cluster-head για την μετάδοση δεδομένων σε περίπτωση που είναι απομακρυσμένος από τον σταθμό βάσης. Κατά συνέπεια, ο I-LEACH διαχειρίζεται αποτελεσματικότερα τους ρόλους cluster head, απλού κόμβου και cluster head-relay. Στην συνέχεια παραθέτουμε ενδεικτικά αποτελέσματα από πειράματα που έγιναν και συγκρίνουν τον I-LEACH με τους LEACH και P – LEACH [37].



Εικόνα 18: Αριθμός ζωντανών κόμβων vs rounds για ένα δίκτυο μεγέθους 200 κόμβων [10]

Στην εικόνα 18 φαίνεται η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου, σε όρους transmission rounds, μέχρι να πεθάνουν όλοι οι κόμβοι του δικτύου. Ουσιαστικά γίνεται χρήση της LND μετρικής. Διαπιστώνουμε ότι ο πρώτος κόμβος πεθαίνει μετά από 388 γύρους στον LEACH, μετά από 625 γύρους στον P-LEACH και μετά από 726 γύρους με εφαρμογή του I-LEACH. Ο τελευταίος κόμβος στον I-LEACH πεθαίνει μετά από 2300 γύρους, ενώ κοντά στους 1500 γύρους για τον LEACH, P-LEACH. Συνεπώς, ο I-LEACH επιμηκύνει την διάρκεια ζωής για FND κατά 85% (σε σχέση με τον LEACH) και κατά 16% (σε σύγκριση με τον P-LEACH) και για LND κατά 53%, σε σύγκριση με τον LEACH/P-LEACH. Ο I-LEACH κατορθώνει να εξισορροπεί την κατανάλωση ενέργειας ανάμεσα στους κόμβους.



Εικόνα 19: Κατανάλωση ενέργειας ανά γύρο [10]

Η εικόνα 19 απεικονίζει την συνολική ενεργειακή κατανάλωση σε Joules για την αποστολή/λήψη μηνυμάτων σε σχέση με transmission rounds. Στην αρχή η ενέργεια που καταναλώνεται από τον I-LEACH είναι μικρότερη σε σχέση με τον LEACH και τον P-LEACH. Κατόπιν, μετά από περίπου 600 γύρους, η ενέργεια στον I-LEACH μεγαλώνει και ξεπερνά αυτή του LEACH, διότι ο αριθμός των κόμβων που είναι ζωντανοί στον I-LEACH είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν του LEACH. Συνεπώς αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας λόγω του αυξημένου αριθμού των μεταδόσεων στο δίκτυο.

3.4.2 L-LEACH

Μια άλλη παραλλαγή του LEACH είναι ο L-LEACH [11]. Εδώ ο αλγόριθμος διαφοροποιείται από τον LEACH ως εξής:

1. Στον τρόπο υπολογισμού του κατωφλιού $T(n)$ για την απόφαση σχετικά με το αν ο κόμβος n θα γίνει cluster-head.
2. Ο τρόπος επιλογής του cluster-head στον οποίο θα προσκολληθεί ένας απλός κόμβος, βάση μίας συνάρτησης κόστους.

Όσον αφορά το πρώτο σημείο, λαμβάνει υπόψιν όχι μόνο την ενέργεια του κόμβου αλλά και την απόσταση του από τον base-station.

Ο διαφοροποιημένος τύπος υπολογισμού του $T(n)$ είναι ο ακόλουθος:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{E_{cur}}{E_{ave}} * \left[\frac{(1-\alpha)p}{1-p * (r \bmod \frac{1}{p})} + \alpha p * \frac{D_{max} - D(n)}{D_{max} - D_{min}} \right], & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (7)$$

όπου E_{cur} η τρέχουσα ενέργεια του κόμβου n , E_{ave} η μέση ενέργεια κόμβου του δικτύου, D_{max} και D_{min} αντίστοιχα η μέγιστη και η ελάχιστη απόσταση κόμβου από τον base-station, $D(n)$ η απόσταση του τρέχοντος κόμβου n και α ένας παράγοντας επιρροής.

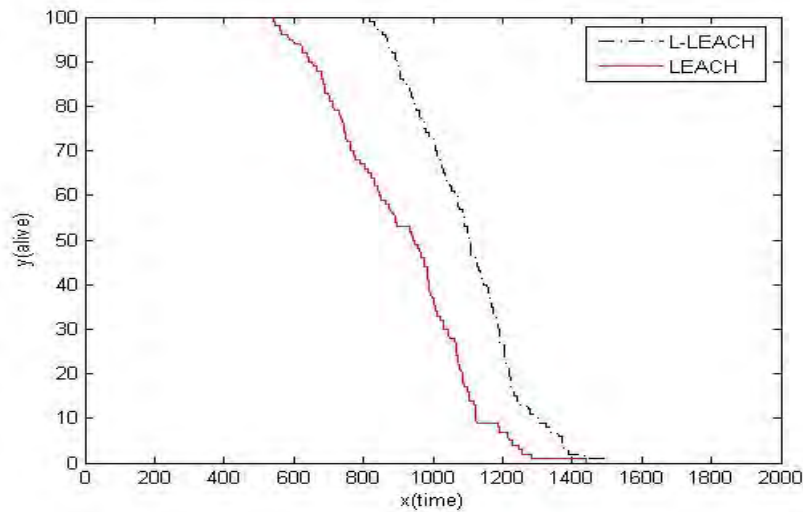
Στο θέμα της προσκόλλησης του κόμβου i σε ένα cluster-head, λαμβάνεται υπόψιν η απόσταση μεταξύ κόμβου i και base-station και συγκρίνονται οι αποστάσεις του κόμβου από base-station και cluster-head. Εάν είναι πλησιέστερα του base-station, τότε θα στείλει κατευθείαν σε αυτόν τα δεδομένα, αλλιώς προσκολλάται στον cluster-head j με την ελάχιστη τιμή κόστους $C(i,j)$, που υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$C(i,j) = \frac{d_{ij}}{d_{max}} * \frac{E_{cur}(i)}{E_{cur}(j)} * \frac{D(j)}{D_{ave}} \quad (8)$$

όπου d_{ij} η απόσταση μεταξύ κόμβου i και cluster-head j , d_{max} η μέγιστη απόσταση cluster-head από τον i , $E_{cur}(i)$ και $E_{cur}(j)$ η ενέργεια του κόμβου i και του cluster-head j αντίστοιχα, $D(j)$ η απόσταση του cluster-head j από τον base-station και D_{ave} η μέση απόσταση cluster-head και base-station.

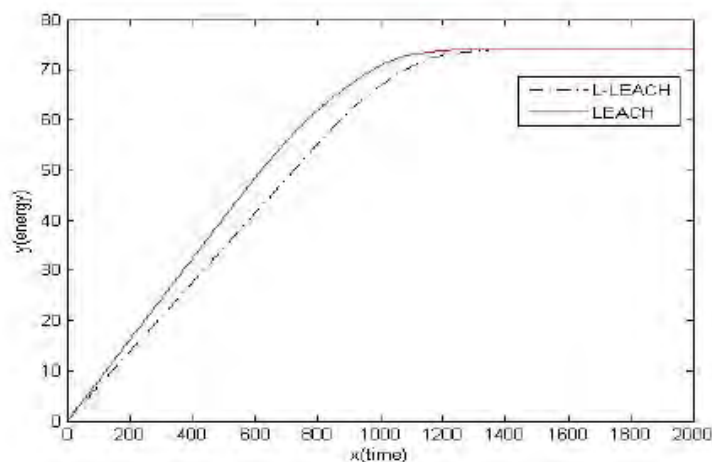
Με αυτές τις τροποποιήσεις, τα πειράματα έχουν δείξει ότι ο αλγόριθμος μπορεί να εξισορροπήσει την κατανάλωση ενέργειας, μεγιστοποιώντας την μετάδοση δεδομένων, με περαιτέρω επέκταση της διάρκειας λειτουργίας του κόμβου και του δικτύου. Το μοντέλο συστήματος που εφαρμόζεται έχει το ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. 100 κόμβοι είναι τυχαία διασκορπισμένοι σε μία περιοχή με διαστάσεις 100mx100m. Όταν τοποθετηθούν οι απλοί κόμβοι, τότε τοποθετείται και ο σταθμός βάσης στο (50,50) και οι θέσεις τους παραμένουν σταθερές, επιτρέποντας μόνο να αλλάζει ο ρόλος του clusterhead.
2. Η αρχική κατανομή ενέργειας στους κόμβους είναι επίσης τυχαία και κυμαίνεται από 0.5 – 1 Joule. Μόνο ο σταθμός βάσης έχει θεωρητικά απεριόριστη ενέργεια.
3. Οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν τόσο μεταξύ τους, όσο και με τον σταθμό βάσης απευθείας.



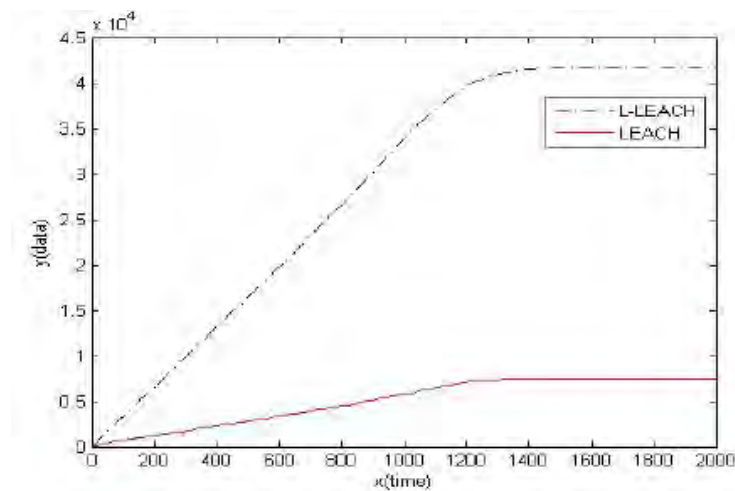
Εικόνα 20 : Αριθμός ζωντανών κόμβων ανά γύρο (κόκκινο για τον από LEACH και διακεκομμένη γραμμή για τον L-LEACH) [11]

Στην εικόνα 20 απεικονίζεται η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου ως συνάρτηση του συνολικού χρόνου εκτέλεσης των εργασιών του δικτύου, μέχρι να πεθάνει και ο τελευταίος κόμβος. Ο πρώτος θάνατος κόμβος (FND) στον LEACH επιτυγχάνεται στον 542 γύρο, ενώ στον I-LEACH στον 819 γύρο, συνεπώς παρατείνεται ο πρώτος θάνατος κόμβου κατά 51%. Χρησιμοποιώντας την μετρική HND, στον LEACH οι μισοί κόμβοι πεθαίνουν στον 943 γύρο, ενώ στον L-LEACH στον 1103, που σημαίνει επιμήκυνση του χρόνου HND θανάτου κατά 16%. Όλοι οι κόμβοι πεθαίνουν μετά από 1439 γύρους στον LEACH και μετά από 1497 στον I-LEACH αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά πιστοποιούν ότι η λειτουργία του L-LEACH μπορεί να πετύχει επιμήκυνση της συνολικής διάρκειας ζωής του δικτύου και έχει καλύτερη σύγκλιση.



Εικόνα 21: Συνολική κατανάλωση ενέργειας στο χρόνο (κόκκινο για τον από LEACH και διακεκομμένη γραμμή για τον L-LEACH) [11]

Η εικόνα 21 απεικονίζει την ενεργειακή κατανάλωση από τη χρήση του LEACH και L-LEACH αντίστοιχα, από όπου φαίνεται ότι στον L-LEACH καταναλώνεται συνολικά λιγότερη ενέργεια καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Η αιτία για κάτι τέτοιο οφείλεται στα εξής: ο L-LEACH επιλέγει τους cluster-heads βάση της εναπομείνουσας ενέργειάς τους, των συντεταγμένων των κόμβων και των σχετικών τους αποστάσεων. Βάση των σχέσεων (7) και (8) οι κόμβοι καταναλώνουν ενέργεια σχεδόν με ομοιόμορφο τρόπο, αποτρέποντας τον πρόωρο θάνατο κόμβων, κάτι που έχει σημαντική συνέπεια στην αύξηση του πλήθους δεδομένων (πακέτων) που μπορούν να φτάσουν στον σταθμό βάσης. Η τελευταία διαπίστωση που αφορά το πλήθος δεδομένων (data volume) φαίνεται στην εικόνα 22:



Εικόνα 22: Συνολική αποστολή δεδομένων στο χρόνο (κόκκινο για τον από LEACH και διακεκομμένη γραμμή για τον L-LEACH) [11]

όπου ο άξονας y απεικονίζει το σύνολο του μεγέθους δεδομένων που φτάνουν στον σταθμό βάσης. Η καμπύλη του L-LEACH έχει ανοδική πορεία σχεδόν καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, κάτι που δείχνει ότι το δίκτυο προσαρμόζεται σε ενεργειακά βέλτιστες επιλογές cluster head.

3.4.3 W-LEACH

Ο W-LEACH [12], είναι μία ακόμη παραλλαγή του LEACH, που σαν στόχο έχει να επεκτείνει την συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου. Ο W-LEACH μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε δίκτυα όπου οι αισθητήρες είναι μη ομοιόμορφα καταναμημένοι στο επίπεδο. Το βασικό γνώρισμα του αλγορίθμου αυτού είναι ότι αναθέτει «βάρη» (weights) σε κάθε αισθητήρα, καθιστώντας τον λιγότερο ή περισσότερο «σημαντικό» στην διαδικασία της συλλογής και αποστολής δεδομένων. Λόγω της εισαγωγής της έννοιας του βάρους (weight), το όνομα του W-LEACH προέκυψε ανάλογα. Τα βάρη αυτά προσαρμόζονται ανάλογα με την πυκνότητα των συνδέσεων κάθε κόμβου (π.χ. πόσους κόμβους-γείτονες αντιστοιχούν στον κάθε κόμβο) και την εναπομείνουσα ενέργειά του. Στη συνέχεια τα βάρη χρησιμοποιούνται για να: 1) Αποφασιστεί ποιοι κόμβοι είναι καλοί υποψήφιοι για cluster heads και οι οποίοι θα στέλνουν τα συνολικά (aggregated) δεδομένα στο σταθμό βάσης, 2) Αποφασιστεί ο βέλτιστος αριθμός των cluster head (και άρα των clusters) που προκύπτουν. Τα πειραματικά δεδομένα πιστοποιούν ότι ο W-LEACH αυξάνει την διάρκεια ζωής του δικτύου συγκρινόμενος με τον LEACH.

Έστω ένα Α.Δ.Α. με n κόμβους. Σε κάθε γύρο, ο W-LEACH αναθέτει βάρος w_i σε καθένα από τους n κόμβους s_i με $1 \leq i \leq n$. Τα βάρη w_i βασίζονται σε δύο παράγοντες, την εναπομείνουσα ενέργεια e_i και την πυκνότητα d_i . Η εναπομείνουσα ενέργεια e_i είναι η ενέργεια που έχει ο κάθε κόμβος μετά από έναν γύρο t . Η πυκνότητα d_i αντιπροσωπεύει την αναλογία των alive κόμβων εντός της εμβέλειας ενός κόμβου i προς των alive συνολικά κόμβων του δικτύου, δηλαδή $d_i = s_i / n$ σε χρόνο t . Οι τιμές d_i ενημερώνονται σε κάθε γύρο ανάλογα με το αν οι κόμβοι εντός της εμβέλειας πεθαίνουν. Η εναπομείνουσα ενέργεια e_i κάθε κόμβου s_i επηρεάζει την τιμή του βάρους w_i . Κόμβοι με υψηλή e_i είναι καλοί υποψήφιοι για να επιλεγούν ως cluster heads, δεδομένου ότι για την χρονική στιγμή που θα είναι cluster heads ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειάς τους αυξάνεται. Βάση των όσων αναφέραμε, τα w_i και d_i ορίζονται ως δεδομένου των παρακάτω συνθηκών:

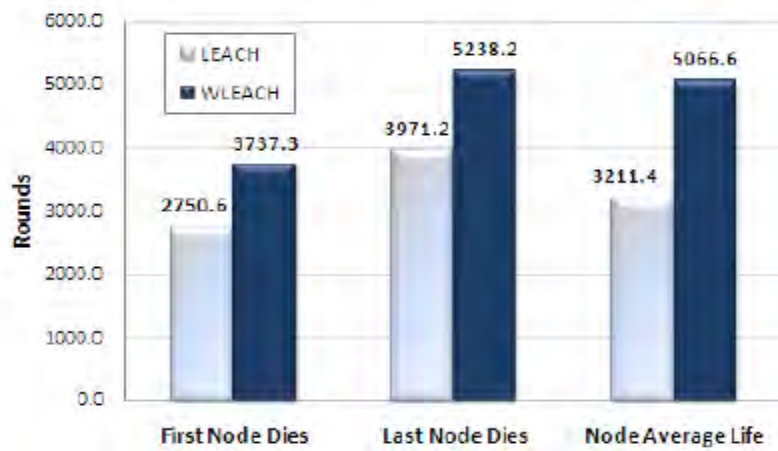
1. Όσο μεγαλύτερη η τιμή e_i , τόσο μεγαλύτερη η τιμή w_i
2. Όσο μεγαλύτερη η τιμή d_i , τόσο μεγαλύτερη η τιμή w_i
3. Εάν κανένας κόμβος δεν βρίσκεται στην εμβέλεια ενός s_i , τότε $d_i=1$.
4. Εάν όλοι οι κόμβοι του δικτύου βρίσκονται εντός της εμβέλειας ενός s_i , τότε $d_i=n$.

Ο ορισμός του βάρους w_i προκύπτει ως:

$$w_i = \begin{cases} e_i * d_i, & d_i > d_{threshold} \\ d_i, & otherwise \end{cases} \quad (9)$$

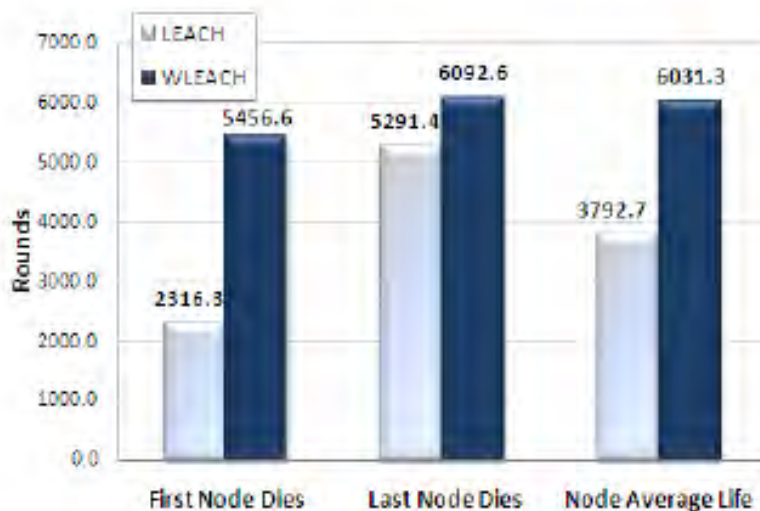
όπου i ο κόμβος, και $d_{threshold}$ ένα κατώφλι πυκνότητας για τον ορισμό των συνόλων των αισθητήρων σε περιοχές μικρής πυκνότητας. Αρχικά όλοι οι κόμβοι έχουν το ίδιο ποσό ενέργειας. Αρχικά και για κάθε γύρο, υπολογίζονται οι τιμές d_i . Κατόπιν υπολογίζονται οι τιμές w_i βάση της σχέσης (9). Ένα ποσοστό $p\%$ των κόμβων με υψηλές τιμές σε w_i επιλέγονται για cluster heads, ώστε κανένας cluster head να μην ανήκει στην εμβέλεια άλλου. Μετά την επιλογή των cluster-heads, οι υπόλοιποι κόμβοι προσκολλώνται στον πλησιέστερο σε αυτούς cluster-head. Εν αντιθέσει με τον LEACH, όπου όλοι οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα τους στον cluster-head, ο W-LEACH επιλέγει ένα ποσοστό $x\%$ των αισθητήρων σε κάθε cluster να στείλει δεδομένα στον cluster-head. Η επιλογή γίνεται πάλι με το βάρος w_i . Αυτή τη φορά επιλέγονται οι κόμβοι με το ελάχιστο βάρος.

Πειράματα κοινά με τον LEACH και τον W-LEACH έχουν δείξει ότι ο δεύτερος αλγόριθμος ξεπερνάει σε επιδόσεις τον LEACH όσον αφορά τον χρόνο θανάτου του πρώτου κόμβου, του τελευταίου κόμβου, τον μέσο όρο διάρκειας των αισθητήρων, της εναπομένουσας ενέργειας του δικτύου καθώς και τον αριθμό ζωντανών κόμβων στο δίκτυο. Επίσης μπορεί να ανταπεξέρχεται σε δίκτυα **με μη ομοιόμορφα κατανεμημένους κόμβους** καθώς αυξάνει την διάρκεια ζωής του δικτύου, κατά συνέπεια λειτουργεί με υψηλή ενέργεια στους κατοπινούς γύρους. Τέλος, τείνει να μειώνει την κατανάλωση ενέργειας σε κόμβους σε περιοχές χαμηλής πυκνότητας σε μη ομοιόμορφα κατανεμημένα WSN, καθότι μπορεί να είναι οι μοναδικοί αντιπρόσωποι της περιοχής τους.



Εικόνα 23: Θάνατος πρώτου κόμβου, τελευταίου κόμβου και μέση διάρκεια ζωής κόμβου για δίκτυο στο οποίο οι κόμβοι κατανέμονται στο επίπεδο ομοιόμορφα[12]

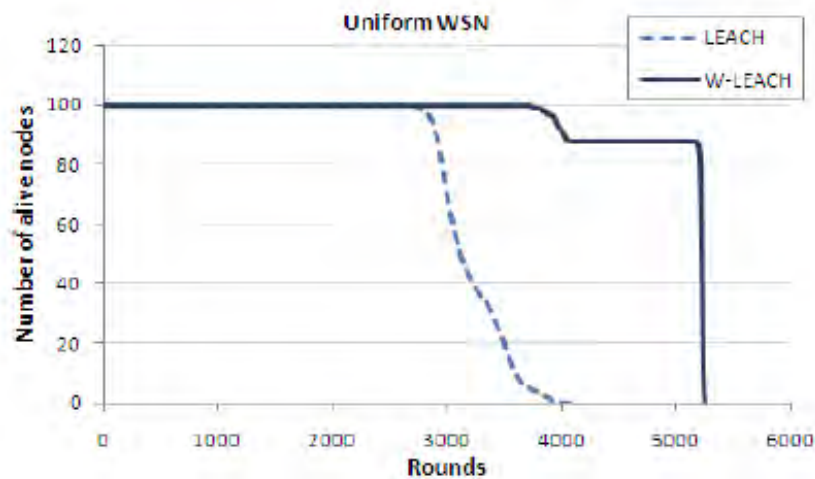
Στην εικόνα 23 συγκρίνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου βάση του κριτηρίου First Node Dies, Last Node Dies και Average Node Life. Ο W-LEACH, κατορθώνει να καθυστερήσει τη χρονική στιγμή του θανάτου τόσο για την 1^ο όσο και για τον τελευταίο κόμβο κατά περίπου 25%, και αυξάνει την μέση διάρκεια ζωής του δικτύου κατά περίπου 40% συγκρινόμενος με τις αντίστοιχες τιμές του LEACH για την περίπτωση ομοιόμορφου Α.Δ.Α.



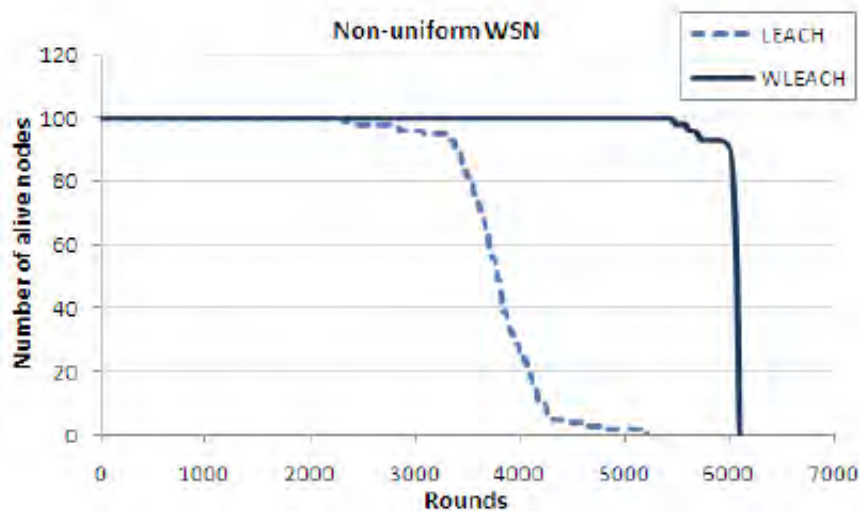
Εικόνα 24: Θάνατος πρώτου κόμβου, τελευταίου κόμβου και μέση διάρκεια ζωής κόμβου για δίκτυο στο οποίο οι κόμβοι κατανέμονται στο επίπεδο μη - ομοιόμορφα[12]

Αντίστοιχες συγκρίσεις παρουσιάζονται στην εικόνα 26, με την ανωτερότητα του W-LEACH έναντι του LEACH στην περίπτωση της μη ομοιόμορφης κατανομής κόμβων για FND, LND και average node life. Το κέρδος στην περίπτωση αυτή είναι ακόμη μεγαλύτερο διότι ο W-LEACH περίπου διπλασιάζει την ζωή του 1^{ου} κόμβου βάση όπως προκύπτει από τον LEACH.

Επίσης αυξάνει την διάρκεια ζωής του δικτύου (βάση του κριτηρίου LND) κατά 15% και την κατά μέσο όρο ζωή όλων των κόμβων κατά 40%.



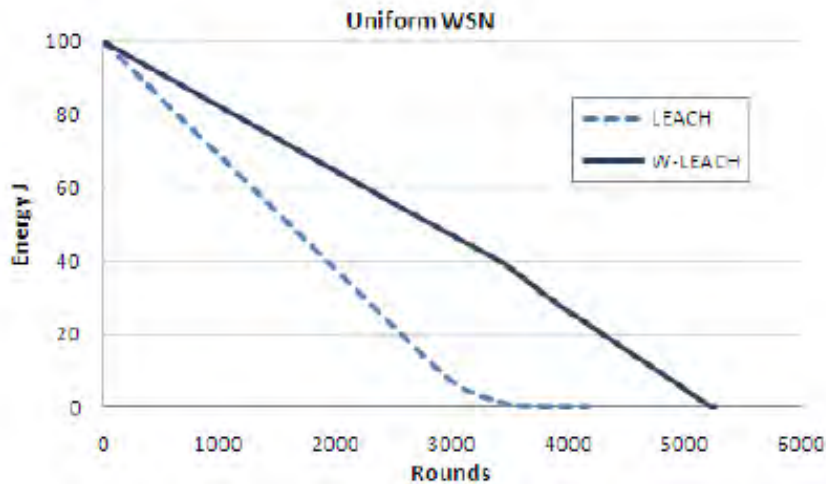
Εικόνα 25: Αριθμός ζωντανών κόμβων σε ομοιόμορφο WSN [12]



Εικόνα 26: Αριθμός ζωντανών κόμβων σε μη ομοιόμορφο WSN [12]

Στις εικόνες 25 και 26 απεικονίζεται γραφικά ο αριθμός των ζωντανών κόμβων σε κάθε γύρο εκτέλεσης των LEACH/W-LEACH για την περίπτωση ομοιόμορφου δικτύου και μη ομοιόμορφου δικτύου. Όπως ήταν αναμενόμενο και στις δύο περιπτώσεις ο W-LEACH αποδίδει καλύτερα επιμηκύνοντας την ζωή των κόμβων, διότι κάνει καλύτερη επιλογή cluster heads και κατανομής κατανάλωσης ενέργειας. Στην περίπτωση του ομοιόμορφου δικτύου, ο

τελευταίος κόμβος βάση του W-LEACH πεθαίνει μετά από περίπου 5200 γύρους, ενώ για τον LEACH περίπου μετά από 4000, δηλαδή αύξηση 30%. Ο W-LEACH είναι περισσότερο αποδοτικός για μη ομοιόμορφο δίκτυο, διότι διατηρώντας κόμβους ζωντανούς σε περιοχές χαμηλής πυκνότητας, μειώνει το μέγεθος των δεδομένων που μπορεί να χαθεί όταν όλοι οι κόμβοι στις περιοχές αυτές πεθάνουν.



Εικόνα 27: Εναπομείνουσα Ενέργεια σε ομοιόμορφο δίκτυο για LEACH/W-LEACH [12]

Τέλος, η εικόνα 27 απεικονίζει την συνολική εναπομείνουσα ενέργεια στην περίπτωση του ομοιόμορφου δικτύου ανά γύρο εκτέλεσης του LEACH/W-LEACH. Οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν ξεκάθαρα ότι η συνολική ενέργεια καταναλώνεται με μικρότερο ρυθμό στον W-LEACH. Ο λόγος οφείλεται στην λειτουργία του W-LEACH και τα δομικά του στοιχεία (βάρη).

4. Προτεινόμενος Αλγόριθμος Ενεργειακά Βέλτιστης ομαδοποίησης κόμβων

4.1 Εισαγωγή

Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στις επικοινωνίες των κόμβων και η αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου είναι οι πρωταρχικοί σχεδιαστικοί στόχοι για ένα Α.Δ.Α. Η αποδοτική ομαδοποίηση των κόμβων και η ενεργειακά βέλτιστη εκλογή cluster heads αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη λύση για ομοιόμορφη ισορρόπηση ενεργειακής κατανάλωσης και επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Ένας από τους επικρατέστερους αλγορίθμους ομαδοποίησης κόμβων για βέλτιστη ενεργειακή κατανάλωση θεωρείται ο LEACH, όπως αναλύσαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, διότι κατορθώνει με στοχαστικό τρόπο να εκλέγει cluster heads και με τον τρόπο αυτό εξισορροπείται η κατανάλωση ενέργειας ανάμεσα στους κόμβους. Ωστόσο ο στοχαστικός τρόπος επιλογής cluster heads απομείνει μειονέκτημα για τον LEACH. Οι περισσότεροι ενεργειακά αποδοτικοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης αποτελούν επέκταση του LEACH, προσπαθώντας να εμπλουτίσουν τα δομικά συστατικά του με στόχο την αύξηση της διάρκειας ζωής.

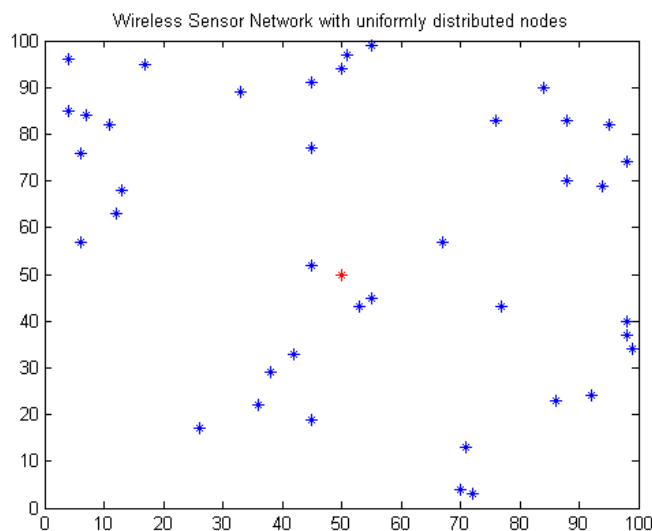
Σε αντίθεση με αυτούς τους αλγορίθμους, στην εργασία αυτή, προτείνουμε έναν ενεργειακά αποδοτικό αλγόριθμο ομαδοποίησης κόμβων σε Α.Δ.Α. , ο οποίος δεν θεωρείται ως μία ακόμη επέκταση του LEACH. Έχει δηλαδή τα δικά του δομικά συστατικά, εξισορροπεί ομοιόμορφα την κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους και τους οργανώνει με κατάλληλο τρόπο ώστε να αυξάνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής:

1. Επιλέγει cluster heads βάση ενός ορισμένου κριτηρίου «κόστους» και ποσοτικοποιεί την καταλληλότητά τους για cluster heads βάση «βαρών» (weights).
2. Εναλλάσσει τον ρόλο του cluster head (cluster head rotation) με ντετερμινιστικό τρόπο, βάση των επιπέδων εναπομείνουσας ενέργειας σε κάθε υποψήφιο κόμβο και των αποστάσεων μεταξύ τους.

4.2 Μοντέλο Συστήματος

Το μοντέλο του συστήματος που εφαρμόζουμε έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- N κόμβοι κατανέμονται ομοιόμορφα σε ένα τετράγωνο διαστάσεων $M \times M$, όπως φαίνεται στην εικόνα 28.
- Δύο κόμβοι i και j θεωρούνται γείτονες εάν ο ένας ανήκει εντός της εμβέλειας εκπομπής (transmission range) του άλλου. Δηλαδή $j \in N(i)$, όπου $N(i)$ είναι το σύνολο των γειτόνων του i , όταν η ισχύς στον δέκτη j είναι μεγαλύτερη από ένα threshold, δηλαδή όταν $P_{rx} > P_{thres}$.
- Η τοπολογία είναι στατική, δηλαδή δεν υπάρχει μετακίνηση κόμβων και ο base-station είναι επίσης στατικός τοποθετημένος στο έδαφος στο σημείο (50,50).
- Οι κόμβοι-αισθητήρες είναι ομοιόμορφοι ως προς τα χαρακτηριστικά του υλικού και τους ενεργειακούς περιορισμούς τους.
- Το κανάλι μετάδοσης είναι συμμετρικό, δηλαδή εάν ένας κόμβος u μπορεί να στείλει σε έναν κόμβο v , τότε και ο v μπορεί να στείλει στον u . Συνεπώς $u \in N(v)$ και $v \in N(u)$.
- Όλοι οι κόμβοι μπορούν να προσεγγίσουν τον base-station στέλνοντας απευθείας 1-hop πακέτα μήκους k bits.
- Κάθε κόμβος έχει μοναδικό αριθμό που τον χαρακτηρίζει (ID).



Εικόνα 28: WSN με ομοιόμορφα κατανεμημένους κόμβους (μπλε) και Base-station (κόκκινο) στη θέση (50,50)

Σχετικά με τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης του transmitter/receiver, όπως και στον LEACH και στις παραλλαγές τους, βασιστήκαμε στο *first order radio model*. Για την αποστολή k bits σε απόσταση d , η ενέργεια που καταναλώνεται από τον transmitter είναι:

$$E_{Tx}(k, d) = e_{elect} \times k + e_{amp} \times k \times d_{ij}^l \quad (10)$$

όπου d_{ij} η απόσταση μεταξύ κόμβων i και j , και l είναι ο συντελεστής (εκθέτης) απώλειας ισχύς σήματος. Το μοντέλο αυτό, ανάλογα με την τιμή το εκθέτη l , μπορεί να χωριστεί σε *free space model*, εάν $l = 2$ και σε *multi-path fading model*, εάν $l = 4$. Η τιμή του εκθέτη ουσιαστικά προσομοιώνει την κατάσταση του ασύρματου περιβάλλοντος, η οποία έχει άμεση επίδραση στην ενέργεια που καταναλώνεται για την αποστολή ενός πακέτου σε δεδομένη απόσταση. Αντίστοιχα, η ενέργεια για την λήψη πακέτου μήκους k bits από έναν οποιονδήποτε κόμβο j είναι:

$$E_{Rx}(k) = e_{elect} \times k \quad (11)$$

Ο όρος e_{elect} συμβολίζει την διάχυση ενέργειας για την λειτουργία του κυκλώματος πομπού/δέκτη, και ο όρος e_{amp} συμβολίζει την ενέργεια που απαιτείται για τον ενισχυτή του πομπού (transmitter amplifier) ώστε να επιτύχει αποδεκτό λόγο E_b/N_o . Ο όρος e_{amp} συμβολίζει αντίστοιχα την ενέργεια διάχυσης για τη λειτουργία του λήπτη ή του αποστολέα και την ενέργεια για τον ενισχυτή μετάδοσης για να έχουμε ένα καλό λόγο E_b/N_o . Οι εξισώσεις (10) και (11) μαρτυρούν ότι η λήψη μηνυμάτων δεν είναι ενεργειακά φθηνή διαδικασία, οπότε ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο επικοινωνίας δεν θα πρέπει μόνο να μειώνει τις αποστάσεις πομπού/δέκτη, αλλά και τον αριθμό των αποστολή/λήψεων μεταξύ τους.

Στα πειράματα που ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο υποθέτουμε free-space model για την επικοινωνία μεταξύ απλών κόμβων και clusterhead, και multi-path model για την επικοινωνία μεταξύ clusterheads και σταθμού βάσης (Base Station). Από την εξίσωση (10) διαπιστώνουμε ότι ουσιαστικά η απόσταση d_{ij}^l παίζει αποφασιστικό ρόλο στον καθορισμό της απαιτούμενης ενέργειας για αποστολή πακέτου. Ορίζουμε την συνάρτηση κόστους $cost(i, j)$, βάση της οποίας υπολογίζεται το “κόστος” ενός κόμβου i να επικοινωνήσει με έναν κόμβο j σε δεδομένη απόσταση d_{ij}^l . Συνεπώς:

$$Cost_{(i,j)} = \begin{cases} d_{ij}^2 * \frac{E_{init}}{E_{node}}, & \text{if } d \leq d_0 \\ d_{ij}^4 * \frac{E_{init}}{E_{node}}, & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (12)$$

όπου d_0 είναι μία απόσταση αναφοράς (threshold), μικρότερη από την οποία υποθέτουμε free-space model και μεγαλύτερη από την οποία multi-path fading model. E_{node} εκφράζει το τρέχων ενεργειακό απόθεμα σε κάποιον κόμβο και άρα ο λόγος $\frac{E_{init}}{E_{node}}$ μεγαλώνει γρήγορα όταν ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας είναι μεγάλος

4.3 Προτεινόμενος Αλγόριθμος και Φάσεις του Αλγορίθμου

Στο σημείο αυτό παρουσιάζουμε τον προτεινόμενο αλγόριθμο που τον ονομάζουμε *MinimumWeighted Clustering Algorithm (MWCLA)* και ο οποίος δεν είναι μία ακόμη παραλλαγή του LEACH. Ο λειτουργικός σκοπός του είναι να οργανώσει τους κόμβους κατάλληλα σε clusters, βάση των σχετικών αποστάσεων των κόμβων, την τοποθέτησή τους εντός 2D πλέγματος και των ενεργειακών τους αποθεμάτων ώστε να επιμηκυνθεί η συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου. Ο αλγόριθμος λειτουργεί σε 3 φάσεις:

1. Φάση 1: *Σχηματοποίηση των Clusters και εκλογή του Cluster head*: Σε αυτή την φάση δημιουργούνται τα clusters και εκλέγονται οι αντίστοιχοι cluster heads.
2. Φάση 2: *Επικοινωνία και ροή μηνυμάτων μεταξύ κόμβων*: Σε αυτή τη φάση γίνεται η μετάδοση των δεδομένων μεταξύ κόμβων και cluster head εντός του cluster.
3. Φάση 3: *Εναλλαγή του ρόλου των clusters (Cluster head Rotation)*: Στην φάση αυτή ο ρόλος του cluster head μεταφέρεται σε άλλον κόμβο. Ο αριθμός των clusters και το μέγεθός τους παραμένει σταθερό και αναλλοίωτο καθόλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο και οι ερμηνείες τους:

Πίνακας 1:

Μεταβλητή	Ερμηνεία
C_i	Πλήθος των γειτόνων ενός κόμβου i
S_i	Λίστα γειτόνων του κόμβου i
W_i	Βάρος – Βαθμός συσσώρευσης κόμβου i
Cov_i	Coverage Cost του κόμβου i

4.3.1 Φάση 1: Εκλογή Cluster heads και Δημιουργία Συστάδων (clusters)

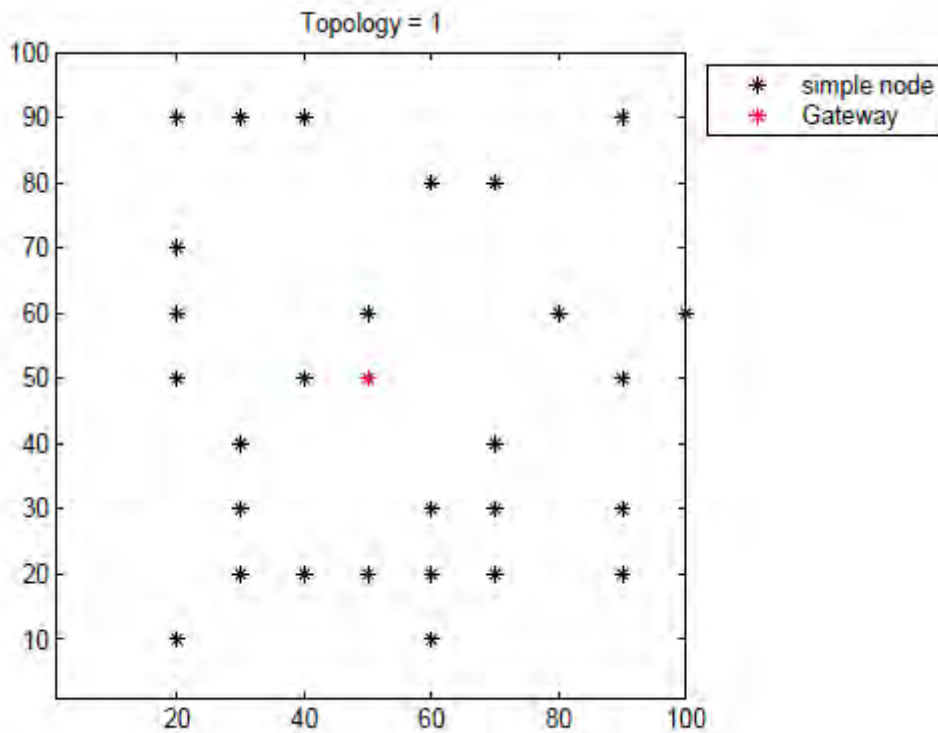
Τα ακόλουθα βήματα περιγράφουν την διαδικασία δημιουργίας clusters και την εκλογή των αντιστοίχων cluster heads:

1. Δημιουργία μίας τυχαίας τοπολογίας με N κόμβους, όπως φαίνεται και στην εικόνα 29.
2. Απόδοση σε κάθε κόμβο το ID του, για να μπορούμε να τους ξεχωρίζουμε.
3. Υπολογισμός ενός πίνακα γειτνίασης $Nei_{N \times N}$, ο οποίος κρατά την πληροφορία του πλήθους C_i των γειτόνων του κάθε κόμβου i . Στην περίπτωση που $C_i = 0$, τότε ένα νέο cluster ορίζεται με cluster head τον κόμβο i .
4. Δημιουργία των λιστών $S_i = \{i, k / k \text{ in } N(i)\}$ για κάθε κόμβο i , οι οποίες έχουν ως μέλη τους γείτονες του κάθε κόμβου.
5. Για κάθε μία από τις λίστες S_i , υπολογίζουμε το βάρος W_i , το οποίο εκφράζει τον βαθμό συσσώρευσης γύρω από έναν υποψήφιο cluster head i σε μονάδες “κόστους”, βάση της εξίσωσης (12). Είναι φυσικό ο επικρατέστερος υποψήφιος cluster head εντός του cluster μίας λίστας S_i να είναι αυτός ο οποίος απαιτεί το ελάχιστο ενεργειακά συνολικό κόστος όλων των κόμβων για να επικοινωνήσουν μαζί του. Το βάρος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_i = \sum_{k=1}^{|S_i|} cost(k \in S_i, i) \quad (13)$$

6. Υπολογισμός του coverage cost Cov_i για κάθε κόμβο i , ο οποίος εκφράζει την καταλληλότητα ενός υποψήφιου cluster head του βήματος 5 (σχέση 13), να εκλεγεί ως cluster head. Το cov metric χρησιμοποιείται για να εξαλείψει τις τυχόν επικαλύψεις μεταξύ των λιστών S_i των υποψηφίων clusters, να οριστικοποιήσει τα μεγέθη των clusters και την εκλογή του cluster head. Το coverage cost δίνεται από την σχέση:

$$Cov_i = \sum_{k=1}^{|S_i|} \sum_{j=1}^{|S_j|} cost(j, i) \quad (14)$$



Εικόνα 29: Τυχαία διάταξη WSN με 30 ενεργούς κόμβους (μαύρα σημεία) και 1 σταθμό βάσης (κόκκινο σημείο) τοποθετημένο στο (50,50).

Παράδειγμα:

Στο σημείο αυτό δίνουμε ένα αριθμητικό παράδειγμα των βημάτων της φάσης 1. Ας υποθέτουμε ότι έχουμε το ακόλουθο δίκτυο πλέγματος

(1)		(3)		
	(2)	(4)		
			(6)	(7)
(5)				

το οποίο αποτελείται από 7 κόμβους. Σε κάθε κελί φαίνονται τα IDs των κόμβων. Στην απλή αυτή διάταξη δεν υπάρχει η παρουσία του σταθμού βάσης. Οι λίστες γειτνίασης για κάθε κόμβο που προκύπτουν είναι η εξής:

$$S_1 = \{(1), (2)\}$$

$$S_2 = \{(1), (2), (3), (4)\}$$

$$S_3 = \{(2), (3), (4)\}$$

$$S_4 = \{(2), (3), (4), (6)\}$$

$$S_5 = \{\}$$

$$S_6 = \{(6), (7)\}$$

$$S_7 = \{(6), (7)\}$$

Βάση της σχέσης (13), για κάθε λίστα υπολογίζουμε το βάρος W_i των κόμβων της λίστας, υποθέτοντας ότι όλοι οι κόμβοι της λίστας είναι υποψήφιοι για cluster heads. Για χάρη ευκολίας του παραδείγματος ως συνάρτηση κόστους (cost) στην σχέση (13) αλλά και στην (14), χρησιμοποιούμε την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ δύο κόμβων με συντεταγμένες (x_1, x_2) και (y_1, y_2) , η οποία ορίζεται ως εξής:

$$dist(node1, node2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

Για παράδειγμα για την λίστα S_2 τα βάση είναι:

Υποψήφιος cluster head	Βάρος W
1	$4\sqrt{2}+1 = 5,56$
2	$2\sqrt{2}+1 = 3,82$
3	$3\sqrt{2}+1 = 5,23$
4	$2+\sqrt{2} = 4,82$

Συνεπώς, $\min W$ προκύπτει για υποψήφιο cluster head τον κόμβο 2 για την λίστα S_2 . Στη συνέχεια, βάση της σχέσης (14), υπολογίζουμε το coverage cost που δίνεται από τον ακόλουθο πίνακα:

Λίστες γειτόνων του $i=2$	Κάλυψη κόμβων	Κόστος (cov cost)
S_1	(1), (2)	0
S_2	(1), (2), (3), (4)	0
S_3	(2), (3), (4)	0
S_4	(2), (3), (4), εκτός ο (6)	Calculate cost (2) -> (6)

Στον παραπάνω πίνακα υπολογίζεται το coverage cost βάση της σχέσης (14) για κάθε υποψήφιο κόμβο μίας λίστας S . Στην ουσία η σχέση (14) εισάγει τον βαθμό κάλυψης ενός υποψηφίου cluster head και εξαλείφει περιπτώσεις επικάλυψης μεταξύ λιστών. Στην προκειμένη περίπτωση ο κόμβος 2 αφού έχει το $\min W$ για την λίστα S_2 είναι ο επικρατέστερος για την λίστα αυτή. Ο κόμβος 2 υπάρχει και στις λίστες S_1 , S_3 και S_4 . Το con cost του 2 είναι ίσο με $1+\sqrt{2}$, δηλαδή καλύπτει και την λίστα S_4 εκτός του κόμβου 6 αυτής. Βάση του πίνακα βαρών W , ο κόμβος 4 είναι ο αμέσως επόμενος επικρατέστερος για cluster head στην λίστα S_2 . Παρόλα αυτά το con cost του είναι μεγαλύτερο του κόμβου 2 και ισούται με $1+\sqrt{2}$ (για να καλύψει τον κόμβο 1) και $\sqrt{2}$ (για να καλύψει τον κόμβο 6 της λίστας S_4 , σύνολο δηλαδή $2+\sqrt{2}$). Συνεπώς ο κόμβος 2 είναι ο επικρατέστερος για την λίστα S_2 και είναι ο cluster head αυτής. Συνοψίζοντας, οι δύο κανόνες για την δημιουργία cluster και την επιλογή cluster head είναι οι εξής:

1. *Min W*
2. *Min Cov*

4.3.2 Φάση 2: Αποστολή Δεδομένων

Μετά την δημιουργία των clusters είναι δυνατή η μετάδοση δεδομένων. Υποθέτουμε τα εξής:

1. Οι κόμβοι έχουν πάντα δεδομένα να στείλουν στον base station. Στέλνουν 1 πακέτο και αμέσως μετά κλείνουν το radio transmitter για εξοικονόμηση ενέργειας.
2. Στέλνουν τα δεδομένα τους ακολουθώντας ένα TDMA σχήμα (time-slotted allocation scheme) που τους έχει κοινοποιηθεί από τον cluster head τους.
3. Ο cluster head μπορεί να συμπιέσει (compress) τα δεδομένα που λαμβάνει. Εάν λάβει σύνολο πληροφορίας $Z = Lxk$ bits, όπου L = πλήθος nodes/cluster και k = μήκος πακέτου σε bits, τότε στέλνει στον BS $c \times Z$ πληροφορία με $c < 1$.

4.3.3 Φάση 3: Εναλλαγή (Rotation) του ρόλου του Cluster head

Το στάδιο αυτό αφορά την εναλλαγή του ρόλου του cluster head, το οποίο είναι σημαντικό διότι επιτρέπει την ισοκατανομή κατανάλωσης ενέργειας εντός των μελών ενός cluster. Σε αντίθεση με την αντίστοιχη φάση του LEACH, κατά την οποία ο ρόλος του cluster head εναλλάσσεται τυχαία (στοχαστικά), ο προτεινόμενος αλγόριθμος υπολογίζοντας την βαρύτητα της θέσης ενός κόμβου j , εναπομείνουσα ενέργειά του και λαμβάνοντας υπόψη την σχετική του θέση, κάνει την εναλλαγή βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$M_j = \frac{1}{W_j} \times \frac{E_{node}}{E_{initial}} \times \frac{1}{cost(j, BS)} \quad (15)$$

όπου $cost(j, BS)$ είναι το ενεργειακό κόστος για την επικοινωνία του j με τον BS και W_j το βάρος του βάσει της σχέσης (13). Η εναλλαγή του cluster head λαμβάνει χώρα μετά από κάθε γύρο (round). Ο κόμβος με την μέγιστη τιμή M και εάν ισχύει $M > M_{average}$, επιλέγεται ως cluster head για τον επόμενο γύρο στο cluster του.

5. Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα

Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο για τα πειραματικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων του προτεινόμενου αλγορίθμου. Τα κριτήρια για τη σύγκριση του αλγορίθμου μας με τον LEACH αφορούν τα ακόλουθα:

1. First Node Death (FND): Καταγραφή της στιγμής θανάτου του 1^{ου} κόμβου λόγω έλλειψης αποθεμάτων ενέργειας.
2. Half Node Dead (HND): Καταγραφή της στιγμής θανάτου του 50% των κόμβων της τοπολογίας.
3. Last Node Death (LND): Καταγραφή της στιγμής θανάτου του τελευταίου κόμβου (πλήν του κόμβου gateway), λόγω έλλειψης αποθεμάτων ενέργειας.

Σε όλες τις προσομοιώσεις εκτιμάται η συνολική διάρκεια ζωής μίας δεδομένης τοπολογίας (εικόνα 29) η οποία παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η διάρκεια ζωής μετράτε σε γύρους, όπου σε ο κάθε γύρος αποτελείται από τις 3 φάσεις που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 4. Στον πίνακα 2 φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν.

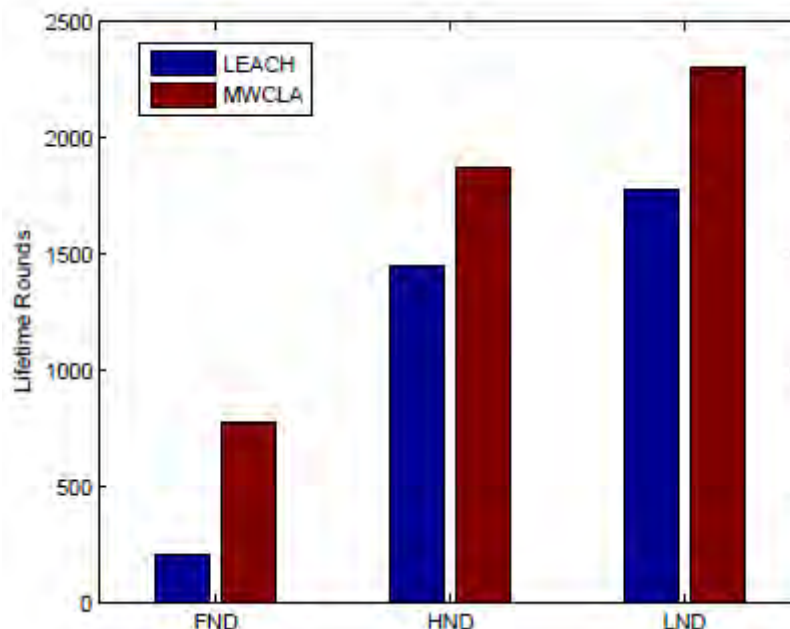
Πίνακας 2: Τιμές Παραμέτρων Προσομοίωσης

Parameter	Value	Comments
M	$100m \times 100m$	Area size
E_{init}	1 Joule	Initial energy load
N	30,100	Number of nodes
k	1000 bits	Packet Length
e_{amp}	$100pJ/bit/m^2$	Radio amplifier energy
e_{elect}	50nJ/bit	Radio electronics energy
p	0.05	Optimal cluster head probability

Η τοπολογία στην οποία βασίζονται όλες οι προσομοιώσεις φαίνεται στην εικόνα 29 και περιέχει 30 κόμβους τοποθετημένους εντός πλέγματος 2-διαστάσεων. Κάθε κόμβος έχει συντεταγμένες (x,y), οι οποίες προκύπτουν από ομοιόμορφη κατανομή.

1^η σειρά πειραμάτων:

Η εικόνα 30 παρουσιάζει αποτελέσματα προσομοιώσεων που αφορούν συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου (network lifetime in rounds) για τις παραμέτρους FND, HND και LND. Όπως παρατηρούμε σε όλες τις περιπτώσεις ο προτεινόμενος αλγόριθμος οδηγεί σε επιμήκυνση της διάρκειας ζωής σε σύγκριση με τον LEACH. Συγκεκριμένα, η διάρκεια ζωής προσεγγίζει τους 2300 γύρους για LND, τους 1870 για HND και τους 780 για FND στον προτεινόμενο αλγόριθμο. Οι αντίστοιχες τιμές για τον LEACH για τις μετρικές αυτές είναι 1780 για LND, 1452 για HND και 780 για FND. Στον πίνακα 3 φαίνονται συγκεντρωμένα τα ποσοστά βελτίωσης για FND, HND, LND. Τα αποτελέσματα που απεικονίζουμε είναι ο μέρος όρος 10 εκτελέσεων του αλγορίθμου.



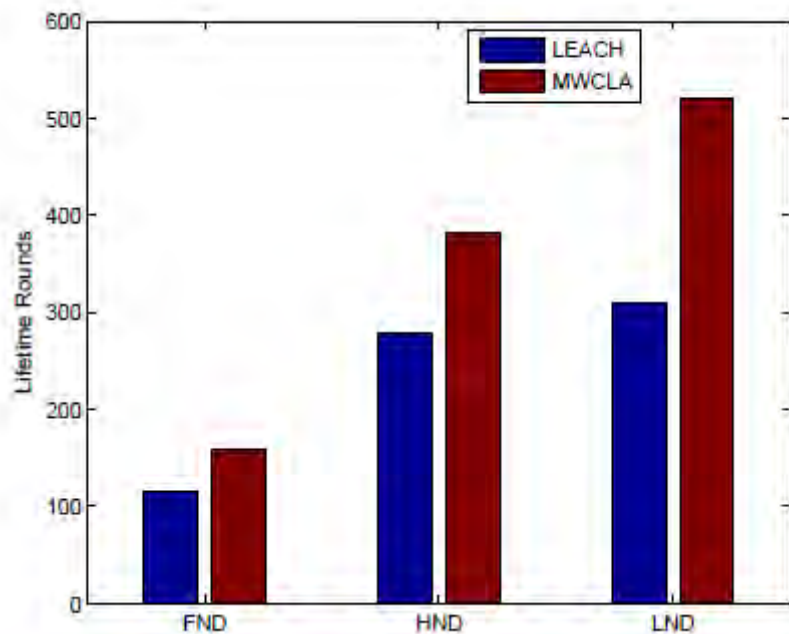
Εικόνα 30: Διάρκεια ζωής (Lifetime Rounds) για τα κριτήρια FND,HND και LND για τοπολογία 30 κόμβων με έναν σταθμό βάσης τοποθετημένο στο (50,50)

Πίνακας 3: Ποσοστά βελτίωσης Lifetime – 1^η σειρά πειραμάτων

Metrics	LEACH	MWCLA	% Lifetime extension
FND	290	780	60%
HND	1452	1870	21%
LND	1780	2300	22%

2^η σειρά πειραμάτων:

Στην 2^η σειρά πειραμάτων απεικονίζουμε την διάρκεια ζωής του δικτύου της τοπολογίας (εικόνα 29), αλλά στην περίπτωση αυτή ο σταθμός βάσης τίθεται εκτός του πλέγματος με συντεταγμένες (50,-100). Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει επιμήκυνση διάρκειας ζωής σε όλες τις περιπτώσεις. Ο βασικός λόγος είναι ότι στο κριτήριο απόφασης επιλογής cluster head (φάση 1) και εναλλαγής ρόλου cluster head (φάση 3), λαμβάνεται υπόψη το κριτήριο των σχετικών αποστάσεων μεταξύ κόμβων και κόμβων – σταθμού βάσης, κάτι που δεν γίνεται στον LEACH. Συγκεκριμένα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιτυγχάνει για LND 510 γύρους έναντι 315 του LEACH, 382 για HND έναντι 278 του LEACH και 159 για FND έναντι 116 του LEACH. Τα ποσοστά αύξησης που επιτυγχάνονται φαίνονται στον πίνακα 4. Τα αποτελέσματα που απεικονίζουμε είναι ο μέρος όρος 10 εκτελέσεων του αλγορίθμου.



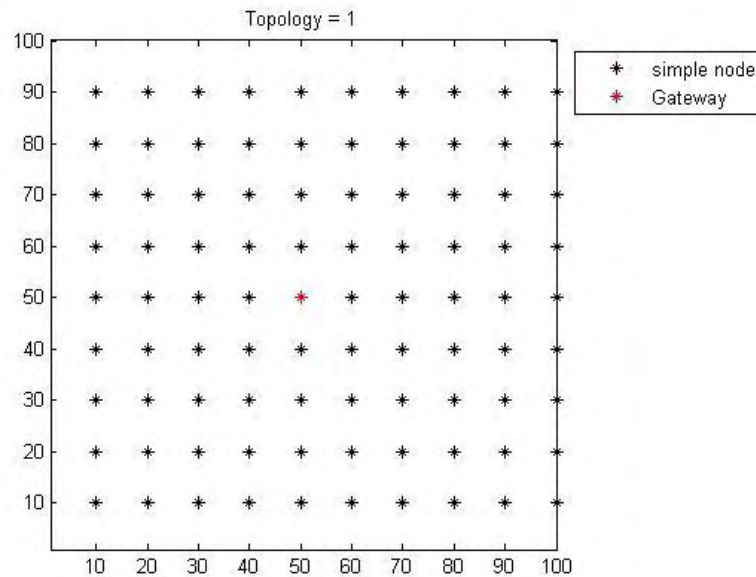
Εικόνα 31: Διάρκεια ζωής (Lifetime Rounds) για τα κριτήρια FND,HND και LND για τοπολογία 30 κόμβων με έναν σταθμό βάσης τοποθετημένο στο (50,-100)

Πίνακας 4: Ποσοστά βελτίωσης Lifetime – 2^η σειρά πειραμάτων

Metrics	LEACH	MWCLA	% Lifetime extension
FND	116	159	28%
HND	278	382	27%
LND	315	510	38%

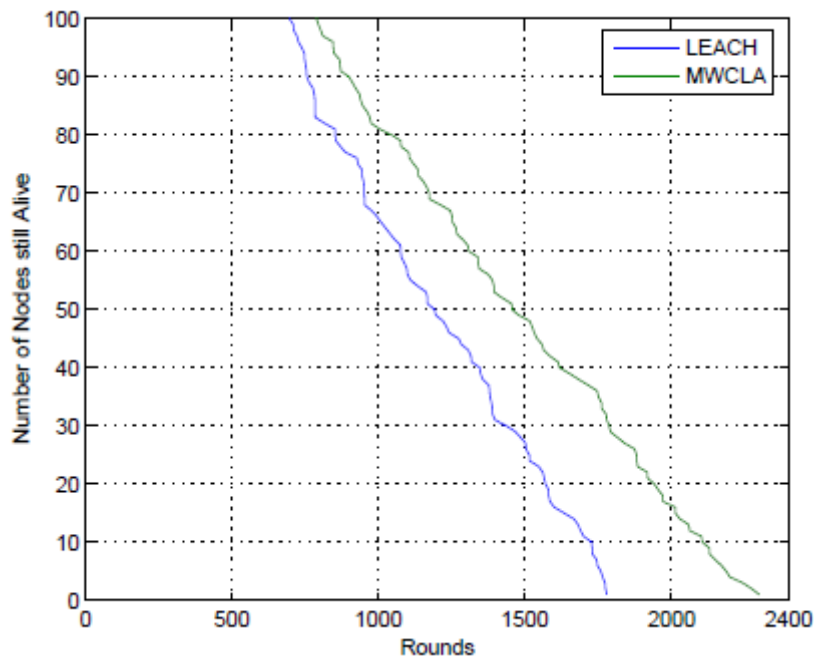
3^η σειρά πειραμάτων:

Για την 3^η σειρά των πειραμάτων χρησιμοποιούμε μία grid τοπολογία με 100 κόμβους σύνολο (99 απλούς κόμβους και ένας σταθμός βάσης), όπως φαίνεται στην εικόνα 32



Εικόνα 32: Τοπολογία πλέγματος με 100 κόμβους (99 απλούς και 1 σταθμό βάσης). Οι απλοί κόμβοι με μαύρο χρώμα και ο σταθμός βάσης με κόκκινο χρώμα

Στην εικόνα 33 απεικονίζουμε τον αριθμό των ζωντανών κόμβων, αυτών δηλαδή που έχουν θετικά ενεργειακά αποθέματα, έναντι του lifetime rounds. Με την εικόνα αυτή ουσιαστικά δείχνουμε τον ρυθμό εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων όλων των κόμβων και μπορούμε να καταγράψουμε την στιγμή που πεθαίνει όλο το δίκτυο, δηλαδή και ο τελευταίος απλός κόμβος. Καταρχάς, από την απόσταση των δύο καμπυλών διαπιστώνουμε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος οδηγεί σε επιμήκυνση της διάρκειας ζωής σε σύγκριση με τον LEACH. Συγκεκριμένα, βάση της μετρικής LND, ο τελευταίος κόμβος βάσης του προτεινόμενου αλγόριθμου πεθαίνει μετά από 2360 γύρους, ενώ στον LEACH μετά από 1680. Αυτή η διαφορά είναι της τάξης του 28%. Τα αποτελέσματα που απεικονίζουμε είναι ο μέρος όρος 10 εκτελέσεων του αλγορίθμου.



Εικόνα 33: Ποσοστό κόμβων με θετικά ενεργειακά αποθέματα (ζωντανοί κόμβοι) vs rounds για δίκτυο με 30 κόμβους και σταθμό βάσης στην θέση (50,50).

Πίνακας 5: Ποσοστά βελτίωσης Lifetime – 3^η σειρά πειραμάτων

Algorithm	Metric – LND	% Lifetime Improvement
LEACH	1680	28%
MWCLA	2360	

Γενικά, οι διαφορές στην διάρκεια ζωής μεταξύ του δικού μας αλγόριθμου και του LEACH οφείλονται στο ότι ο LEACH επιλέγει τους cluster heads με τυχαίο τρόπο, ενώ εμείς με ντετερμινιστικό βάση της ενέργειας και της θέσης του κάθε κόμβου εντός τοπολογίας (άρα και της απόστασης). Επιπλέον, λαμβάνουμε υπόψη μας την ενέργεια και τις σχετικές αποστάσεις των κόμβων σε όρους «κόστους» και τους εισάγουμε στην σχέση, βάση της οποίας γίνεται η εναλλαγή του ρόλου των cluster heads. Βάση της σχέσης αυτής κατανέμεται περισσότερο ομοιόμορφα η κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των κόμβων ενός cluster.

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, προτείναμε έναν ενεργειακά βέλτιστο αλγόριθμο ομαδοποίησης κόμβων σε συστάδες (clustering algorithm) και τον συγκρίναμε με τον γνωστό clustering αλγόριθμο LEACH. Βασιστήκαμε σε τυχαία και συνδεδεμένη τοπολογία 30 και 100 κόμβων αντίστοιχα, η οποία παρέμενε στατική (δεν υπήρξε μετακίνηση των κόμβων) καθόλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων. Η λειτουργία του αλγορίθμου βασίζεται σε τρεις διακριτές φάσεις (φάση 1: ορισμός clusters, επιλογή cluster heads, φάση 2: αποστολή δεδομένων και φάση 3: αλλαγή του ρόλου του cluster head), πετυχαίνει επιμήκυνση της συνολικής διάρκειας του δικτύου μέσω της ομοιόμορφης κατανομής του τρόπου κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους. Η οργάνωση των κόμβων σε clusters και η εναλλαγή του ρόλου του cluster head γίνεται με ντετερμινιστικό τρόπο και όχι με τυχαίο, λαμβάνοντας υπόψη τα αποθέματα ενέργειας των κόμβων, την τοπολογία και τις σχετικές αποστάσεις τόσο μεταξύ των cluster heads όσο και με τον σταθμό βάσης. Οι προσομοιώσεις που έγιναν μαρτυρούν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος πετυχαίνει επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου κατά μέσο όρο 20% - 30% συγκρινόμενος με τον LEACH για FND, HND, LND και για διαφορετικού μεγέθους δίκτυα (30 και 100 κόμβοι αντίστοιχα). Συνοψίζοντας πετύχαμε:

- Προτείναμε ένα νέο πρωτόκολλο ομαδοποίησης κόμβων (clustering) που μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε τυχαίες συνδεδεμένες τοπολογίες δικτύων αισθητήρων και μπορεί να εγγυηθεί αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου (network lifetime).
- Τόσο η δημιουργία των clusters, όσο και η επιλογή και εναλλαγή (rotation) του ρόλου του cluster head, βασίζεται σε μετρικές που λαμβάνουν υπόψη τους τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων, τις σχετικές τους αποστάσεις και την απόσταση του cluster head με τον BS.
- Η απόφαση για το ποιος κόμβος θα γίνει cluster head γίνεται ατομικά, χωρίς την ανάμειξη του BS, που όταν βρίσκεται μακριά από το πλέγμα του δικτύου, κάθε μήνυμα ελέγχου (control message) κοστίζει ενεργειακά.
- Σε σύγκριση με τον γνωστό LEACH, πετύχαμε αύξηση στην διάρκεια ζωής του δικτύου που κυμαίνεται από 20% - 30% στις περισσότερες περιπτώσεις, αλλά και περισσότερο, ανάλογα με την τοπολογία.

- Οι παραπάνω αυξήσεις διατηρήθηκαν αναλογικά για όλα τα network lifetime metrics που χρησιμοποιήσαμε και αφορούν FND, HND, LND και είναι δείκτες ενεργειακής απόδοσης του δικτύου ανάλογα με το σενάριο χρήσης (application scenario).

Βιβλιογραφία

- [1] Bokare, Madhav, and Mrs Anagha Ralegaonkar. "Wireless Sensor Network: A Promising Approach for Distributed Sensing Tasks." *Excel Journal of Engineering Technology and Management Science* 1 (2012): 1-9.
- [2] Heinzelman, Wendi Rabiner, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks." *System sciences, 2000. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on*. IEEE, 2000.
- [3] Zhang, Qian, et al. "A wireless solution for greenhouse monitoring and control system based on ZigBee technology." *Journal of Zhejiang University Science A* 8.10 (2007): 1584-1587.
- [4] Zagade, S. U., and R. S. Kawitkar. "Wireless Sensor Network for Greenhouse." *International Journal of Science and Technology* 2.3 (2012).
- [5] Lee, W.S., et al. "Sensing technologies for precision specialty crop production." *Computers and Electronics in Agriculture* 74.1 (2010): 2-33.
- [6] Akyildiz, Ian F., et al. "Wireless sensor networks: a survey." *Computer networks* 38.4 (2002): 393-422.
- [7] Jiménez, Víctor P. Gil, and Ana García Armada. "Field measurements and guidelines for the application of wireless sensor networks to the environment and security." *Sensors* 9.12 (2009): 10309-10325.
- [8] Singh, Sukhjot, and Neha Sharma. "Research paper on drip irrigation management using wireless sensors." *International Journal of Computer Networks and Wireless Communications* 2.4 (2012): 461-464.
- [9] Kaur, Ravneet, Deepika Sharma, and Navdeep Kaur. "Comparative Analysis Of Leach And Its Descendant Protocols In Wireless Sensor Network." *IJP2PNTT-Volume3Issue1-2013* (2013).
- [10] Chen, Jie. "Improvement of LEACH routing algorithm based on use of balanced energy in wireless sensor networks." *Advanced Intelligent Computing*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 71-76.
- [11] Liao, Qian, and Hao Zhu. "An energy balanced clustering algorithm based on LEACH protocol." *Applied Mechanics and Materials* 341 (2013): 1138-1143.
- [12] Abdulsalam, Hanady M., and Layla K. Kamel. "W-LEACH: Weighted Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy aggregation algorithm for data streams in wireless sensor networks." *Data Mining Workshops (ICDMW), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE, 2010.

- [13] Das, Samir R., Elizabeth M. Belding-Royer, and Charles E. Perkins. "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing." (2003).
- [14] Johnson, David B. "Routing in ad hoc networks of mobile hosts." *Mobile Computing Systems and Applications, 1994. WMCSA 1994. First Workshop on*. IEEE, 1994.
- [15] Pister, K., and Lance Doherty. "TSMP: Time synchronized mesh protocol." *IASTED Distributed Sensor Networks* (2008): 391-398.
- [16] Akyildiz, Ian F., et al. "Wireless sensor networks: a survey." *Computer networks* 38.4 (2002): 393-422.
- [17] Wightman, Pedro M., and Miguel A. Labrador. "A3: A topology construction algorithm for wireless sensor networks." *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*. IEEE, 2008.
- [18] Yuanyuan, Zeng, Xiaohua Jia, and He Yanxiang. "Energy efficient distributed connected dominating sets construction in wireless sensor networks." *Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing*. ACM, 2006.
- [19] Wu, Jie, et al. "Extended dominating set and its applications in ad hoc networks using cooperative communication." *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on* 17.8 (2006): 851-864.
- [20] Younis, Ossama, and Sonia Fahmy. "HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks." *Mobile Computing, IEEE Transactions on* 3.4 (2004): 366-379.
- [21] Chazelle, Bernard, Ronitt Rubinfeld, and Luca Trevisan. "Approximating the minimum spanning tree weight in sublinear time." *SIAM Journal on computing* 34.6 (2005): 1370-1379.
- [22] Ang, Chee-Wei, and Chen-Khong Tham. "iMST: A bandwidth-guaranteed topology control algorithm for TDMA-based ad hoc networks with sectorized antennas." *Computer networks* 52.9 (2008): 1675-1692.
- [23] Yao, Andrew Chi-Chih. "On constructing minimum spanning trees in k-dimensional spaces and related problems." *SIAM Journal on Computing* 11.4 (1982): 721-736.
- [24] Eppstein, David, Michael S. Paterson, and F. Frances Yao. "On nearest-neighbor graphs." *Discrete & Computational Geometry* 17.3 (1997): 263-282.
- [25] Li, Li, et al. "Analysis of a cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks." *Proceedings of the twentieth annual ACM symposium on Principles of distributed computing*. ACM, 2001.

- [26] Narayanaswamy, Swetha, et al. "The COMPOW protocol for power control in ad hoc networks: Theory, architecture, algorithm, implementation, and experimentation." *Urbana* 51 (2001): 61801.
- [27] Pachnanda, Glory, and Rajan Chaudhary. "Comparative Study of A3, EECDS, CDS Rule K and KNEIGH Tree Protocols in a Grid Manner."
- [28] Wightman, R., Pedro Mario, and Miguel A. Labrador. "Reducing the communication range or turning nodes off? An initial evaluation of topology control strategies for wireless sensor networks." *Ingeniería y Desarrollo* 28 (2010): 66-88.
- [29] Pachnanda, Glory, Kuldeep Singh, and Lalita Gangwar. "Comparative analysis of A3, EECDS and Kneigh Tree Protocols in Wireless Sensor Networks." *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering* (2013): 987-991.
- [30] Toussaint, Godfried T. "The relative neighbourhood graph of a finite planar set." *Pattern recognition* 12.4 (1980): 261-268.
- [31] Kuhn, Fabian, et al. "Geometric ad-hoc routing: Of theory and practice." *Proceedings of the twenty-second annual symposium on Principles of distributed computing*. ACM, 2003.
- [32] Chen, Jiehui, Mariam B. Salim, and Mitsuji Matsumoto. "A Single Mobile Target Tracking in Voronoi-based Clustered Wireless Sensor Network." *JIPS7.1* (2011): 17-28.
- [33] http://www.cs.jhu.edu/~scheideler/courses/600.348_F04/lecture_13.pdf
- [34] Kour, Harneet, and Ajay K. Sharma. "Hybrid energy efficient distributed protocol for heterogeneous wireless sensor network." *International Journal of Computer Applications* 4.6 (2010): 1-5.
- [35] Niewiadomska-Szynkiewicz, Ewa, Piotr Kwaśniewski, and Izabela Windyga. "Comparative study of wireless sensor networks energy-efficient topologies and power save protocols." *Journal of Telecommunications and information technology* (2009): 68-75.
- [36] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/22/Nearest_neighbor_graph.svg/145px-Nearest_neighbor_graph.svg.png
- [37] Zheng, Z., Yan, L.S., Pan, W., Luo, B., Liu, J.T., Li, X.Y.: Routing Protocol Based on Cluster-Head-Chaining Incorporating LEACH and PEGASIS. *Chinese Journal of Sensor and Actuators* 23, 1173–1178 (2010)
- [38] M. Labrador and P. Wightman "Topology maintenance dynamic techniques," in *Topology Control in Wireless Sensor Networks*, Florida, Springer, 2009, ch 12, sec.2, pp. 141-152

Appendix

Στο σημείο αυτό παραθέτουμε στιγμιότυπα κώδικα σε MATLAB που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις.

```
% LEACH execution
clear;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PARAMETERS %%%%%%%%%%

%Field Dimensions - x and y maximum (in meters)
xm=100;
ym=100;

%x and y Coordinates of the Sink
sink.x=0.5*xm;
sink.y=0.5*ym;

%Number of Nodes in the field
n=100;

%Optimal Election Probability of a node
%to become cluster head
p=0.1;

%Energy Model (all values in Joules)
%Initial Energy
Eo=0.5;
%Eelec=Etx=Erx
ETX=50*0.000000001;
ERX=50*0.000000001;
%Transmit Amplifier types
Efs=10*0.000000000001;
Emp=0.0013*0.000000000001;
%Data Aggregation Energy
EDA=5*0.000000001;

%Values for Heterogeneity
%Percentage of nodes than are advanced
m=0.1;
%\alpha
a=1;

%maximum number of rounds
rmax=9999;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% END OF PARAMETERS %%%%%%%%%%

%Computation of do
do=sqrt(Efs/Emp);

%Creation of the random Sensor Network
figure(1);

for i=1:1:n
    S(i).xd=rand(1,1)*xm;
```



```

XR(i)=S(i).xd;
S(i).yd=rand(1,1)*ym;
YR(i)=S(i).yd;
S(i).G=0;
%initially there are no cluster heads only nodes
S(i).type='N';

temp_rnd0=i;
%Random Election of Normal Nodes
if (temp_rnd0>=m*n+1)
    S(i).E=Eo;
    S(i).ENERGY=0;
    plot(S(i).xd,S(i).yd,'o');
    hold on;
end
%Random Election of Advanced Nodes
if (temp_rnd0<m*n+1)
    S(i).E=Eo*(1+a)
    S(i).ENERGY=1;
    plot(S(i).xd,S(i).yd,'+');
    hold on;
end
end

S(n+1).xd=sink.x;
S(n+1).yd=sink.y;
plot(S(n+1).xd,S(n+1).yd,'x');

%First Iteration
figure(1);

%counter for CHs
countCHs=0;
%counter for CHs per round
rcountCHs=0;
cluster=1;

countCHs;
rcountCHs=rcountCHs+countCHs;
flag_first_dead=0;

for r=0:1:rmax
    r

    %Operation for epoch
    if(mod(r, round(1/p) )==0)
        for i=1:1:n
            S(i).G=0;
            S(i).cl=0;
        end
    end

hold off;

%Number of dead nodes
dead=0;

```

```

%Number of dead Advanced Nodes
dead_a=0;
%Number of dead Normal Nodes
dead_n=0;

%counter for bit transmitted to Bases Station and to Cluster Heads
packets_TO_BS=0;
packets_TO_CH=0;
%counter for bit transmitted to Bases Station and to Cluster Heads
%per round
PACKETS_TO_CH(r+1)=0;
PACKETS_TO_BS(r+1)=0;

figure(1);

for i=1:1:n
    %checking if there is a dead node
    if (S(i).E<=0)
        plot(S(i).xd,S(i).yd,'red .');
        dead=dead+1;
        if(S(i).ENERGY==1)
            dead_a=dead_a+1;
        end
        if(S(i).ENERGY==0)
            dead_n=dead_n+1;
        end
        hold on;
    end
    if S(i).E>0
        S(i).type='N';
        if (S(i).ENERGY==0)
            plot(S(i).xd,S(i).yd,'o');
        end
        if (S(i).ENERGY==1)
            plot(S(i).xd,S(i).yd,'+');
        end
        hold on;
    end
end
plot(S(n+1).xd,S(n+1).yd,'x');

STATISTICS(r+1).DEAD=dead;
DEAD(r+1)=dead;
DEAD_N(r+1)=dead_n;
DEAD_A(r+1)=dead_a;

%When the first node dies
if (dead==1)
    if(flag_first_dead==0)
        first_dead=r
        flag_first_dead=1;
    end
end

countCHs=0;
cluster=1;

```

```

for i=1:1:n
    if(S(i).E>0)
        temp_rand=rand;
        if ( (S(i).G)<=0)

%Election of Cluster Heads
if(temp_rand<= (p/(1-p*mod(r,round(1/p)))))
    countCHs=countCHs+1;
    packets_TO_BS=packets_TO_BS+1;
    PACKETS_TO_BS(r+1)=packets_TO_BS;

    S(i).type='C';
    S(i).G=round(1/p)-1;
    C(cluster).xd=S(i).xd;
    C(cluster).yd=S(i).yd;
    plot(S(i).xd,S(i).yd,'k*');

    distance=sqrt( (S(i).xd-(S(n+1).xd) )^2 + (S(i).yd-
(S(n+1).yd) )^2 );
    C(cluster).distance=distance;
    C(cluster).id=i;
    X(cluster)=S(i).xd;
    Y(cluster)=S(i).yd;
    cluster=cluster+1;

    %Calculation of Energy dissipated
    distance;
    if (distance>do)
        S(i).E=S(i).E- ( (ETX+EDA)*(4000) + Emp*4000*(
distance*distance*distance*distance ));
    end
    if (distance<=do)
        S(i).E=S(i).E- ( (ETX+EDA)*(4000) + Efs*4000*( distance
* distance ));
    end
end
end
end

STATISTICS(r+1).CLUSTERHEADS=cluster-1;
CLUSTERHS(r+1)=cluster-1;

%Election of Associated Cluster Head for Normal Nodes
for i=1:1:n
    if ( S(i).type=='N' && S(i).E>0 )
        if(cluster-1>=1)
            min_dis=sqrt( (S(i).xd-S(n+1).xd)^2 + (S(i).yd-S(n+1).yd)^2 );
            min_dis_cluster=1;
            for c=1:1:cluster-1
                temp=min(min_dis,sqrt( (S(i).xd-C(c).xd)^2 + (S(i).yd-
C(c).yd)^2 ) );
                if ( temp<min_dis )
                    min_dis=temp;
                    min_dis_cluster=c;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

end

%Energy dissipated by associated Cluster Head
min_dis;
if (min_dis>do)
    S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Emp*4000*( min_dis *
min_dis * min_dis * min_dis));
end
if (min_dis<=do)
    S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis *
min_dis));
end
%Energy dissipated
if(min_dis>0)
    S(C(min_dis_cluster).id).E = S(C(min_dis_cluster).id).E- ( (ERX
+ EDA)*4000 );
    PACKETS_TO_CH(r+1)=n-dead-cluster+1;
end

S(i).min_dis=min_dis;
S(i).min_dis_cluster=min_dis_cluster;

end
end
end
hold on;

countCHs;
rcountCHs=rcountCHs+countCHs;

%Code for Voronoi Cells
%Unfortunately if there is a small
%number of cells, Matlab's voronoi
%procedure has some problems

%[vx,vy]=voronoi(X,Y);
%plot(X,Y,'r*',vx,vy,'b-');
% hold on;
% voronoi(X,Y);
% axis([0 xm 0 ym]);

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% STATISTICS
%
% DEAD : a rmax x 1 array of number of dead nodes/round
% DEAD_A : a rmax x 1 array of number of dead Advanced nodes/round
% DEAD_N : a rmax x 1 array of number of dead Normal nodes/round
% CLUSTERHS : a rmax x 1 array of number of Cluster Heads/round
% PACKETS_TO_BS : a rmax x 1 array of number packets send to Base
Station/round
% PACKETS_TO_CH : a rmax x 1 array of number of packets send to
ClusterHeads/round

```

```

% first_dead: the round where the first node died
%
%

% Channel Model Calculations

% accepts input pararameters

d = [0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1];
d0 =input('Please enter close-in reference distance (km): ');
fc =input('Please enter carrier frequency (MHz):');
n =input('Please enter path loss exponent: ');
N =input('Please enter number of desired predicted samples: ');
sigma =input('Please enter standard deviation of the log-normal shadowing: ');
PowerTx =input('Please enter initial Tx power in dBm: ');

%=====
% check if the input T-R separation is equal to or exceeds the input
% close-in reference distance

if any(d<d0)
    error(['T-R separation should be equal to or exceeds close-in reference ',...
        'distance.']);
end;

%=====
% calculate path loss PL_d (dB) at T-R separation d (km)
lambda=300/fc;
PL_d0=-10*log10(lambda^2./(4*pi*d0*1000).^2); % path loss at d0 (dB)
PL_d0
pause;
PL_d=[];
for i=1:length(d)
    X_sigma=sigma*randn(N,1);
                %zero-mean log-normally distributed random
                % variable with standard deviation sigma (in dB)
    %PL_d=[PL_d PL_d0+10*n*log10(d(i)/d0)+X_sigma];

    X_sigma =mean(X_sigma);
    PL_d(i)=PL_d0+10*n*log10(d(i)/d0)+X_sigma;
    PowerRx(i) = PowerTx - PL_d(i);

end;
%=====
plot(d*1000, PowerRx);grid on;xlabel('Distance in meters');ylabel('Received Power Rx (in
dBm)');title('Power decay as a function of distance (meters)');

```

```

% Random Topology Creator

% FUNCTIONALITY: Produces N random topologies with 1 BS. N is variable
% Inputes:
%     1. Number of nodes (N) per topology
%     2. Number of Topologies
%     3. Base station coordinates
%Output: RANDOM TOPOLOGY(IES) Creation and Plot
%
*****

disp('-----Initial Settings:-----');
nodes = input('how many nodes to place (choose 1 - 99): ');
topo = input('how many topologies to generate: ');
basex = input('Give x-coordinate of BASE: ');
basey = input('Give y-coordinate of BASE: ');

for topologies = 1:topo

a(1:100,1:100) = 0;%initialization
a(basex,basey) = 1;%place GW at topology
xcoord(nodes) = 0; % x coordinates
ycoord(nodes) = 0; % y coordinates

%-----Building each topology-----
for i = 1:nodes

    x = round(1+rand()*9);
    y = round(1+rand()*9);

    while(a(x,y) == 1)
        x = round(1+rand()*9);
        y = round(1+rand()*9);
    end

    a(x,y) = 1;
    xcoord(i) = x;
    ycoord(i) = y;

end
a;
%-----
str1 = sprintf('Topology = %d',topologies);

```

```
pause(0.05);  
  
%-----Topology Plot-----  
  
plot(xcoord*10,ycoord*10,'k*',basex,basey,'r*');title(str1);axis([1,100,1,100]);legend('Location','NorthEastOutside','simple node', 'Gateway');  
  
end
```