



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής  
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Πληροφορική»

**Μεταπτυχιακή Διατριβή**

Τίτλος Διατριβής	<b>Αλγόριθμοι δρομολόγησης για εξοικονόμηση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων</b>
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	<b>Βασίλειος Παύλου</b>
Πατρώνυμο	<b>Γεώργιος</b>
Αριθμός Μητρώου	<b>ΜΠΠΛ/ 07033</b>
Επιβλέπων	<b>Δημήτριος Βέργαδος, Λέκτορας</b>

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΛΙΑΣ

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Χρήστος Δουλιγέρης  
Καθηγητής

Χαράλαμπος Κωνσταντόπουλος  
Λέκτορας

Δημήτριος Βέργαδος  
Λέκτορας

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ.  
Βέργαδο Δημήτριο για τη σημαντική βοήθεια και  
καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της  
παρούσας μελέτης καθώς και την αρραβωνιαστικιά  
μου Χαρούλα, για την υπομονή της και την πολύτιμη  
συμπάρασσή της σ' αυτήν την προσπάθεια.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	3
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup></b>	
<b>ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ</b> .....	4
1.1 Εισαγωγή .....	4
1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό των δικτύων αισθητήρων.....	5
1.2.1 Αντοχή σε σφάλματα .....	5
1.2.2 Επεκτασιμότητα .....	5
1.2.3 Κόστος παραγωγής .....	6
1.2.4 Περιορισμοί του υλικού .....	6
1.3 Τοπολογία δικτύων αισθητήρων .....	8
1.4 Περιβάλλον.....	10
1.5 Μέσα μετάδοσης .....	10
1.6 Κατανάλωση ενέργειας .....	11
1.7 Επικοινωνία.....	11
1.8 Επεξεργασία δεδομένων.....	11
1.9 Εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων.....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup></b>	
<b>ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ</b> .....	17
2.1 Δίκτυα αισθητήρων-σφαιρική άποψη και απαιτήσεις.....	17
2.2 Μικρό φυσικό μέγεθος.....	18
2.3 Χαμηλή κατανάλωση ισχύος .....	18
2.4 Εντατική λειτουργία .....	18
2.5 Ποικιλία στη χρήση και στον σχεδιασμό .....	18
2.6 Ευέλικτες λειτουργίες .....	18
2.7 Ασφάλεια .....	18
2.8 Στοιχεία κόμβων δικτύων αισθητήρων .....	19
2.9 Χωρητικότητα (αποθηκευτικών μέσων) .....	19
2.10 Παροχή ισχύος .....	20
2.11 Αισθητήρες .....	20
2.12 Πομποδέκτες .....	20
2.13 Κόμβος δικτύου αισθητήρων.....	21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup></b>	
<b>ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ</b> .....	22
3.1 Ενεργειακά βέλτιστη δρομολόγηση.....	22
3.2 Ενεργειακά ενήμερη δρομολόγηση.....	22
3.3 Λογική διασποράς κυκλοφορίας .....	23
3.4 Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων .....	23
3.4.1 Ζητήματα αρχιτεκτονικής συστήματος και σχεδιασμού .....	23
3.4.2 Κατηγοριοποίηση.....	24
3.4.3 Επίπεδα πρωτόκολλα.....	25
3.4.4 Ιεραρχικά πρωτόκολλα .....	26
3.4.5 Βασισμένα στη θέση πρωτόκολλα .....	26
3.4.6 Πρωτόκολλα πολλαπλών διαδρομών .....	26
3.4.7 Πρωτόκολλα ερωτήσεων.....	28
3.4.8 Πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης.....	28
3.4.9 Πρωτόκολλα με ποιότητα υπηρεσίας .....	28
3.4.10 Πρωτόκολλα συμπαγή.....	29
3.5 Ιεραρχικά πρωτόκολλα.....	29
3.5.1 LEACH.....	29
3.5.2 PEGASIS .....	40
3.5.3 Ιεραρχικό PEGASIS.....	44
3.5.4 TEEN .....	48
3.5.5 APTEEN.....	49
3.5.6 HEED .....	55
3.5.7 PEDAP.....	62

3.5.8	Αλγόριθμος αυτό-οργάνωσης.....	65
3.5.9	SHPER.....	72
3.6	Multipath πρωτόκολλα.....	77
3.6.1	LMR.....	77
3.6.2	HMRP.....	79
3.6.3	Gradient broadcast.....	87
3.6.4	CBMPR.....	92
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup></b>		
<b>ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ.....</b>		
4.1	Βήματα αλγορίθμου.....	96
4.2	Συνοπτική περιγραφή αλγορίθμου.....	98
4.3	Πλεονεκτήματα αλγορίθμου.....	99
4.4	Πολλαπλές συστάδες.....	99
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup></b>		
<b>ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>		
5.1	Αξιολόγηση της επίδοσης των αλγορίθμων.....	100
5.2	Συμπεράσματα.....	105
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>		
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>		
		109

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSN) αποτελούν σήμερα ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών, δεδομένου του εκτενούς εύρους εφαρμογών που μπορούν να υποστηρίξουν. Ωστόσο, οι κόμβοι ενός WSN υπόκεινται σε λειτουργικούς και σχεδιαστικούς περιορισμούς. Διαθέτουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα, μνήμη, υπολογιστικούς πόρους και ισχύ εκπομπής. Όλοι αυτοί οι παράγοντες δημιουργούν νέες προκλήσεις και αντικείμενα έρευνας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Ένα τέτοιο αντικείμενο έρευνας αποτελεί και η συνδεσιμότητα του συνολικού δικτύου, μια έννοια καθοριστική για τη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και ανταλλαγής πληροφοριών επί της παρατηρούμενης διεργασίας-παραμέτρου.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή παρουσιάζονται και αξιολογούνται αρχικά τα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, μια κατηγορία πρωτοκόλλων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων που εφαρμόζουν μια τεχνική ιεραρχικής δρομολόγησης προκειμένου να υλοποιηθεί η επικοινωνία στο δίκτυο. Στην συνέχεια παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών. Τα πρωτόκολλα αυτά παρουσιάζουν μια τεχνική πολλαπλής δρομολόγησης για καλύτερη αξιοπιστία του δικτύου. Τέλος παρουσιάζεται μια νέα προσέγγιση ενός ιεραρχικού πρωτοκόλλου δρομολόγησης με επιρροές από τα πρωτόκολλα πολλαπλών διαδρομών για ομοιόμορφη κατανομή και κατανάλωση ενέργειας.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, πρωτόκολλα δρομολόγησης, ιεραρχική δρομολόγηση, ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, δρομολόγηση πολλαπλών διαδρομών, πρωτόκολλα πολλαπλών διαδρομών, αλγόριθμοι δρομολόγησης, κόμβοι αισθητήρων

## ABSTRACT

Nowadays, wireless sensor networks constitute a much promising research area in the field of wireless communications, due to the large number of applications they can facilitate. Nevertheless, the nodes of a WSN have to follow certain functional and design limitations. They have limited energy storage, memory, computing resources and transmission power. All these factors create new challenges and objects for research with the aim to improve the efficiency of the network. Such an object of research is the connection of the whole network, a key to the ability to communicate among the nodes and to the exchange of information during the event.

In the present postgraduate thesis they are presented and evaluated initially the hierarchical routing protocols, a category of wireless sensor networks protocols which applies a technique of hierarchical routing so that establish the communication in the network. Then are presented and evaluated the multipath routing protocols. These protocols present a technique of multiple routing for better reliability of network. Finally is presented a new approach of hierarchical routing protocol with influences from multipath protocols for uniform distribution and consumption of energy.

**Key Words:** wireless sensor network, routing protocols, hierarchical routing, hierarchical routing protocols, multipath routing, multipath routing protocols, routing algorithms, sensor nodes

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

### 1.1 Εισαγωγή

Η πρόσφατη πρόοδος στην τεχνολογία των μικρό-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (ΜΗΜΣ), στις ασύρματες επικοινωνίες και στα ψηφιακά ηλεκτρονικά έχει δώσει την δυνατότητα για την ανάπτυξη κόμβων αισθητήρων χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και πολλών λειτουργιών, οι οποίοι είναι μικροί σε μέγεθος και επικοινωνούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση ή επιτήρηση, μεταξύ τους σε μικρές αποστάσεις. Αυτοί οι μικροσκοπικοί κόμβοι αισθητήρων, που αποτελούνται από υποσυστήματα αίσθησης, επεξεργασίας δεδομένων και επικοινωνιών, οδηγούν στην ιδέα των δικτύων αισθητήρων που βασίζονται στην συνεργατική λειτουργία ενός μεγάλου συνόλου κόμβων.

Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων, οι οποίοι αναπτύσσονται πυκνά, είτε μέσα στο φαινόμενο είτε πολύ κοντά σε αυτό. Η θέση των κόμβων αισθητήρων δεν είναι ανάγκη να προσχεδιαστεί ή να προαποφασιστεί. Αυτό επιτρέπει την τυχαία εξάπλωσή τους σε μη προσβάσιμα εδάφη ή περιβάλλοντα δύσκολων συνθηκών. Από την άλλη πλευρά, αυτό σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι των δικτύων αισθητήρων πρέπει να διαθέτουν αυτό-οργανωτικές δυνατότητες. Ένα άλλο μοναδικό χαρακτηριστικό των δικτύων αισθητήρων είναι η συνεργατική λειτουργία των κόμβων αισθητήρων.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξασφαλίζουν ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών για τις οποίες είναι κατάλληλα τα δίκτυα αισθητήρων. Μερικές από τις περιοχές εφαρμογής είναι η υγεία, ο στρατός, η κοινωνική μέριμνα και η ασφάλεια. Για παράδειγμα, μια στρατιωτική εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων είναι η χρησιμοποίησή τους στα συστήματα διοίκησης, ελέγχου, επικοινωνιών, πληροφορικής, πληροφοριών, επιτήρησης, αναγνωρίσεων και σκόπευσης (C4ISR), εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες τους όπως η ταχεία εγκατάσταση, η αυτό-οργάνωση και η αντοχή σε λάθη.

Προκειμένου να υλοποιηθούν οι παραπάνω αλλά και άλλες εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων απαιτούνται τεχνικές ad-hoc δικτύωσης (καθόσον έχουν ομοιότητες με τα δίκτυα αισθητήρων). Παρόλο που αρκετοί αλγόριθμοι και πρωτόκολλα έχουν προταθεί για τα παραδοσιακά ad-hoc ασύρματα δίκτυα, δυστυχώς δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα αισθητήρων εξαιτίας των μοναδικών χαρακτηριστικών και των απαιτήσεων των εφαρμογών των δικτύων αισθητήρων. Παρακάτω, αναφέρονται περιληπτικά οι διαφορές μεταξύ των δύο αυτών δικτύων που δικαιολογεί το παραπάνω πρόβλημα :

- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι πολλές φορές πιο μεγάλος από ότι σε ένα ad hoc δίκτυο.
- Η χωρική πυκνότητα των δικτύων αισθητήρων είναι συχνά μεγάλη.
- Οι αισθητήριοι κόμβοι είναι εύκολο να καταστραφούν.
- Η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων αλλάζει πολύ συχνά.
- Οι αισθητήριοι κόμβοι χρησιμοποιούν κυρίως επικοινωνία broadcast ενώ τα περισσότερα ad-hoc δίκτυα βασίζονται στην επικοινωνία σημείου προς σημείο.
- Οι αισθητήριοι κόμβοι διακρίνονται για τους σημαντικούς περιορισμούς που έχουν, από κατασκευής, στους τομείς της ενέργειας, της υπολογιστικής ισχύος και της μνήμης.
- Οι αισθητήριοι κόμβοι συνήθως δεν έχουν κάποιο παγκόσμιο αναγνωριστικό (ID), εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους της επικεφαλίδας που απαιτεί μια τέτοια ιδιότητα, καθώς και του μεγάλου αριθμού των κόμβων.

Επειδή ένας μεγάλος αριθμός κόμβων αισθητήρων αναπτύσσεται με πυκνή διάταξη, οι γειτονικοί κόμβοι μπορεί να βρίσκονται πολύ κοντά ο ένας στον άλλο. Έτσι η επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών διαδοχικών κόμβων (multi-hop communication) στα δίκτυα αισθητήρων αναμένεται να απαιτεί λιγότερη ενέργεια από ότι η παραδοσιακή επικοινωνία μεταξύ γειτονικών κόμβων (single-hop communication). Η επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών διαδοχικών κόμβων (multi-hop)

μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά κάποια από τα προβλήματα διάδοσης του σήματος σε μακρινές αποστάσεις.

Ένας από τα πιο σημαντικούς περιορισμούς στα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων είναι η απαίτηση για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Οι αισθητήριοι κόμβοι έχουν περιορισμένες και συνήθως αναντικατάστατες πηγές ενέργειας. Έτσι ενώ τα παραδοσιακά δίκτυα στοχεύουν να παρέχουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας, τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων έχουν ως πρωταρχικό στόχο την διατήρηση της ενέργειας. Επίσης θα πρέπει να έχουν ένα μηχανισμό που θα δίνει στον χρήστη του δικτύου την επιλογή να παρατείνει την ζωή του δικτύου με αντάλλαγμα την μικρότερη διαμεταγωγή ή την μεγαλύτερη καθυστέρηση στην μετάδοση.

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSN) αποτελούν, τα τελευταία χρόνια, μία περιοχή με μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα. Οι ιδιαιτερότητες αυτών των δικτύων καθιστούν τη μελέτη τους ξεχωριστή από τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων (όπως Ad-Hoc ή IEEE 802.11). Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από μικρού μεγέθους κόμβους που έχουν περιορισμένη αυτονομία και υπολογιστικές δυνατότητες. Συνήθως, αφού τοποθετηθούν για να παρακολουθήσουν ένα δεδομένο φαινόμενο, λειτουργούν αυτόνομα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους. Η χρήση πρωτοκόλλων επικοινωνίας και συνεργασίας για την επεξεργασία δεδομένων, με μικρή κατανάλωση ενέργειας, είναι απαραίτητη για την διατήρηση του δικτύου στη ζωή όσο το δυνατόν περισσότερο.

## **1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό των δικτύων αισθητήρων**

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου αισθητήρων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Παρακάτω αναφέρονται μερικοί από αυτούς. Η μελέτη αυτών των παραγόντων (που πρέπει ή δεν πρέπει να διαθέτουν τα δίκτυα αισθητήρων και οι αισθητήριοι κόμβοι) είναι πρωταρχικής σημασίας γιατί παρέχουν τις κατευθύνσεις γύρω από τις οποίες πρέπει να σχεδιαστεί ένα πρωτόκολλο ή αλγόριθμος για δίκτυα αισθητήρων.

### **1.2.1 Αντοχή σε σφάλματα**

Κάποιοι αισθητήριοι κόμβοι είναι δυνατόν να αποτύχουν ή να μπλοκαριστούν εξαιτίας της έλλειψης ενέργειας ή μιας φυσικής ζημιάς, ή εξαιτίας περιβαλλοντολογικών παρεμβολών. Η αποτυχία ή καταστροφή (παροδική ή μόνιμη) μερικών αισθητήριων κόμβων δεν θα πρέπει να επηρεάζει τον συνολικό σκοπό του δικτύου των αισθητήρων. Αυτό το θέμα αναφέρεται ως αξιοπιστία ή αντοχή σε σφάλματα. Η αντοχή σε σφάλματα είναι η δυνατότητα του δικτύου αισθητήρων να διατηρεί τη λειτουργικότητά του χωρίς διακοπές που να οφείλονται στις αποτυχίες των κόμβων του.

Οι αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να εμπεριέχουν τα επίπεδα αντοχής σε λάθη που απαιτούνται από τα δίκτυα αισθητήρων. Αν το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να αναπτυχθεί ένα δίκτυο αισθητήρων δημιουργεί μικρές παρεμβολές τότε τα πρωτόκολλα μπορούν ανάλογα να είναι πιο ελαστικά. Για παράδειγμα, αν ένα δίκτυο αισθητήρων βρίσκεται εγκατεστημένο σε μια οικία προκειμένου να παρακολουθεί τα επίπεδα υγρασίας και θερμοκρασίας, η αντοχή σε σφάλματα μπορεί να είναι χαμηλή αφού τέτοιου είδους αισθητήριοι κόμβοι δεν καταστρέφονται και δεν παρεμβάλλονται εύκολα από το περιβάλλον. Αντιθέτως σε ένα πεδίο μάχης το δίκτυο αισθητήρων που θα εγκατασταθεί πρέπει να έχει μεγάλη αντοχή σε σφάλματα διότι είναι πολύ εύκολο να καταστραφούν αρκετοί κόμβοι του από εχθρικές επιχειρήσεις. Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η αντοχή σε σφάλματα εξαρτάται και από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το δίκτυο. Συνεπώς αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό του δικτύου αισθητήρων αλλά και των ίδιων των κόμβων.

### **1.2.2 Επεκτασιμότητα**

Ο αριθμός των αισθητήριων κόμβων που έχουν αναπτυχθεί για την μελέτη ενός φαινομένου μπορεί να είναι της τάξης των εκατοντάδων ή χιλιάδων. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αριθμός



αυτός μπορεί να φτάσει και την ακραία τιμή των εκατομμυρίων. Ό,τι πρωτόκολλο σχεδιαστεί θα πρέπει να μπορεί να χειριστεί αυτόν τον αριθμό των κόμβων. Πρέπει επίσης να χρησιμοποιήσουν την υψηλή πυκνότητα με την οποία εγκαθίστανται οι αισθητήριοι κόμβοι. Η πυκνότητα μπορεί να διαφέρει από μερικούς μέχρι εκατοντάδες κόμβους σε μια περιοχή η οποία μπορεί να είναι μικρότερη σε διάμετρο από 10m.

Επιπλέον, ο αριθμός των κόμβων σε μια περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει την πυκνότητα των κόμβων. Η πυκνότητα αυτή εξαρτάται από την εφαρμογή για την οποία εγκαταστάθηκαν οι αισθητήριοι κόμβοι. Για την παρακολούθηση μηχανημάτων, η πυκνότητα των αισθητήριων κόμβων είναι περίπου 300 για μια περιοχή 5m<sup>2</sup>, και η πυκνότητα για παρακολούθηση οχημάτων είναι περίπου 10 κόμβοι ανά περιοχή. Γενικά η πυκνότητα μπορεί να φτάνει μέχρι και 20 αισθητήριους κόμβους ανά m<sup>3</sup>. Ένα σπίτι μπορεί να περιέχει περίπου δύο 12αδες οικιακών συσκευών που να περιέχουν αισθητήριους κόμβους, αλλά αυτός ο αριθμός θα μεγαλώσει αν οι αισθητήριοι κόμβοι εμφυτεύονται στην επίπλωση και σε άλλα μικροαντικείμενα. Για εφαρμογές παρακολούθησης οικιών, ο αριθμός των κόμβων κυμαίνεται από 25 ως 100 ανά περιοχή. Η πυκνότητα μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή όταν ένα άτομο κάθεται σε ένα στάδιο μαζί με άλλους και ο κάθε ένας από αυτούς φέρει αισθητήρες στα ρούχα του, τα παπούτσια του και τα άλλα προσωπικά αντικείμενα που θα κουβαλάει μαζί του (ρολόι, γυαλιά, δαχτυλίδια, μπρελόκ κτλ.)

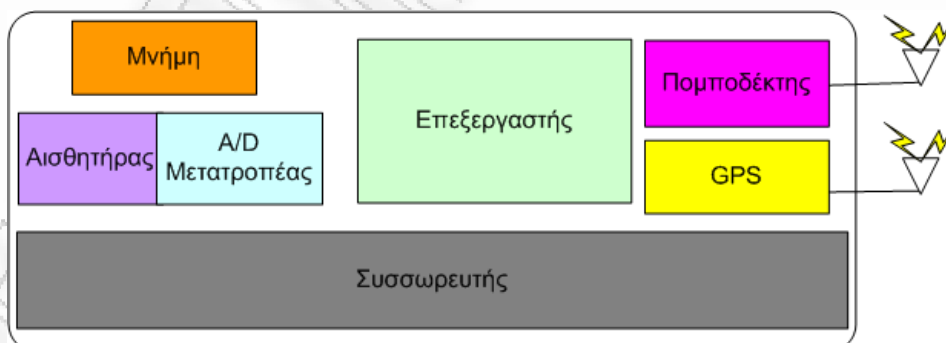
### 1.2.3 Κόστος παραγωγής

Αφού τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων, το κόστος ενός μόνο αισθητήριου κόμβου είναι πολύ σημαντικό για ένα τέτοιο δίκτυο. Αν το κόστος του δικτύου είναι πιο ακριβό από το να εγκατασταθούν οι παραδοσιακοί αισθητήρες, τότε τα δίκτυα αισθητήρων δεν θα συμφέρουν οικονομικά. Αποτέλεσμα του παραπάνω είναι ότι το κόστος του κάθε αισθητήριου κόμβου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

### 1.2.4 Περιορισμοί του υλικού

Ένας αισθητήριος κόμβος όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 αποτελείται κατά βάση από τέσσερα τμήματα :

- μονάδα αισθήσεως
- μονάδα επεξεργασίας
- πομποδέκτη
- μονάδα ενέργειας.



Εικόνα 1: Τμήματα ενός αισθητήριου κόμβου

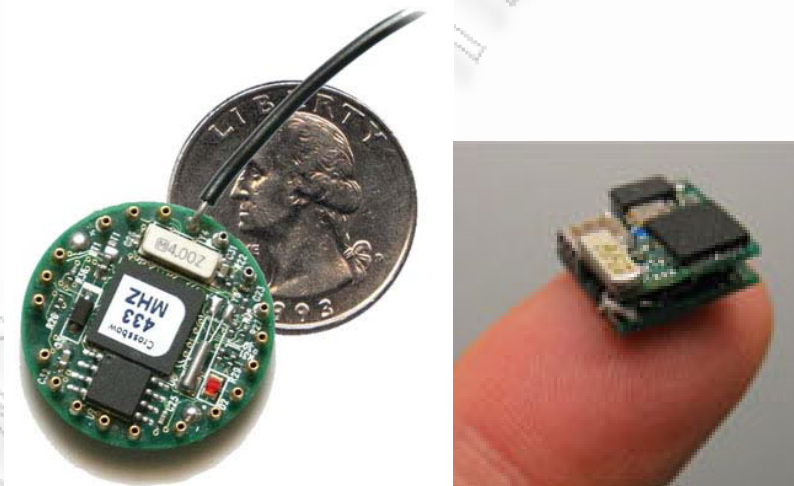
Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται μπορεί να διαθέτει επιπλέον τμήματα όπως σύστημα εντοπισμού θέσης, μονάδα παραγωγής ενέργειας και μονάδα κίνησης. Η μονάδα αισθήσεως συνήθως αποτελείται από δύο υπομονάδες: τους αισθητήρες και τους αναλογικό-ψηφιακούς μετατροπείς. Τα αναλογικά σήματα που παράγονται από τα αισθητήρια όργανα και βασίζονται στα παρατηρούμενα φαινόμενα μετατρέπονται σε ψηφιακά σήματα από τους αναλογικό-ψηφιακούς μετατροπείς και κατόπιν μεταφέρονται στην μονάδα επεξεργασίας. Αυτή η μονάδα, που γενικά σχετίζεται με μια μικρή μονάδα αποθήκευσης, διαχειρίζεται τις

διαδικασίες που κάνουν τον αισθητήριο κόμβο να συνεργάζεται με άλλους κόμβους για να φέρει σε πέρας τους προσδιορισμένους στόχους. Η μονάδα του πομποδέκτη συνδέει τον αισθητήριο κόμβο στο δίκτυο. Ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα του αισθητήριου κόμβου είναι η μονάδα ενέργειας. Οι μονάδες ενέργειας είναι δυνατόν να υποστηρίζονται από μια μονάδα εξαγωγής και παραγωγής ενέργειας (scavenging energy) από το περιβάλλον όπως οι ηλιακές κυψέλες (εικόνα 2). Υπάρχουν όμως και άλλες υπομονάδες, των οποίων η χρήση εξαρτάται από την εφαρμογή για την οποία χρησιμοποιούνται οι αισθητήριο κόμβοι.



Εικόνα 2: Ηλιακός αισθητήριος κόμβος [1i]

Οι περισσότερες από τις τεχνικές δρομολόγησης και οι εφαρμογές παρακολούθησης των δικτύων αισθητήρων απαιτούν την γνώση της θέσης με μεγάλη συνήθως ακρίβεια. Έτσι είναι σύνηθες για ένα αισθητήριο κόμβο να έχει προσαρτημένη και μια μονάδα εύρεσης θέσης. Μια μονάδα κίνησης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί όταν απαιτείται να κινηθούν οι αισθητήριο κόμβοι προκειμένου να παρακολουθήσουν καλύτερα το παρατηρούμενο φαινόμενο.



Εικόνα 3: Αισθητήριοι κόμβοι [2i]

Όλες αυτές οι υπομονάδες πρέπει να μπορούν να χωρέσουν σε ένα χώρο μεγέθους σπιρτόκουτου ή και μικρότερου (εικόνα 3). Το απαιτούμενο μέγεθος μπορεί να απαιτείται να είναι μικρότερο από ένα κυβικό εκατοστό και να είναι αρκετά ελαφρύ για να παραμένει αιωρούμενο στον αέρα. Εκτός από το μέγεθος, υπάρχουν ακόμα πιο αυστηροί περιορισμοί για τους αισθητήριους κόμβους όπως:

- Πρέπει να καταναλώνουν εξαιρετικά χαμηλή ενέργεια.
- Πρέπει να λειτουργούν ακόμα και σε πολύ πυκνή χωρική τοποθέτηση.
- Πρέπει να έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής και να είναι αναλώσιμοι.

- Πρέπει να είναι αυτόνομοι και να λειτουργούν χωρίς παρακολούθηση.
- Πρέπει να προσαρμόζονται στο περιβάλλον που θα λειτουργούν.

Αφού οι αισθητήριοι κόμβοι είναι συνήθως μη προσβάσιμοι, η διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων εξαρτάται άμεσα από την διάρκεια ζωής των πηγών ενέργειας των κόμβων. Η ενέργεια είναι ένας σπάνιος πόρος του συστήματος εξαιτίας των περιορισμών του μεγέθους. Για παράδειγμα η ολική αποθηκευμένη ενέργεια σε μια «έξυπνη σκόνη» (smart-dust) είναι της τάξης του 1J. Για το σύστημα του ολοκληρωμένου ασύρματου δικτύου αισθητήρων (Wireless Integrated Network Sensors WINS)[1], η ολική ενέργεια που πρέπει να παρέχεται πρέπει να είναι μικρότερη των 30μΑ προκειμένου να έχει μεγάλη διάρκεια λειτουργίας. Οι κόμβοι στο παραπάνω σύστημα παίρνουν ενέργεια από μια τυπική μπαταρία Λιθίου (Li) τύπου νομίσματος (2.5cm διάμετρος και 1cm πάχος). Είναι δυνατόν να επεκτείνουμε την διάρκεια ζωής των δικτύων αισθητήρων χρησιμοποιώντας τεχνικές εξαγωγής και παραγωγής ενέργειας από το περιβάλλον. Παράδειγμα τέτοιας τεχνικής είναι οι ηλιακές κυψέλες.

Η μονάδα του πομποδέκτη των αισθητήριων κόμβων μπορεί να είναι μια παθητική ή ενεργητική οπτική συσκευή όπως στην περίπτωση της έξυπνης σκόνης (smart-dust) ή μια συσκευή ασυρμάτου (Radio Frequency RF). Οι ασύρματες επικοινωνίες μέσω ραδιοσυχνοτήτων απαιτούν διαμόρφωση, συχνότητα, φιλτράρισμα, απο-διαμόρφωση και κυκλώματα πολυπλεξίας τα οποία τις κάνουν περισσότερο πολύπλοκες και ακριβές. Επίσης οι απώλειες του μεταδιδόμενου σήματος μεταξύ δύο αισθητήριων κόμβων μπορεί να είναι υψηλές μέχρι την τέταρτη δύναμη της απόστασης μεταξύ τους, διότι οι αισθητήριοι κόμβοι και οι κεραίες τους είναι πολύ κοντά στο έδαφος. Παρόλα αυτά οι ραδιοσυχνότητες φαίνεται να προτιμούνται στα περισσότερα σχήματα μελέτης των δικτύων αισθητήρων, διότι τα πακέτα που μεταφέρονται στα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων είναι χαμηλών ρυθμών μετάδοσης (συνήθως μικρότερα του 1Hz), και ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας είναι μεγάλος λόγω των μικρών αποστάσεων στην επικοινωνία. Αυτά τα χαρακτηριστικά κάνουν δυνατή τη χρήση ραδιο-ηλεκτρονικών κομματιών με χαμηλές απαιτήσεις σε κύκλους λειτουργίας (low duty cycles). Ο σχεδιασμός και η παραγωγή κυκλωμάτων που από την μία να είναι χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και από την άλλη να έχουν μικρό κύκλο λειτουργίας (λίγα Hz) είναι τεχνικώς δύσκολο, καθώς οι τρέχουσες εμπορικές ασύρματες τεχνολογίες όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στο Bluetooth δεν είναι αρκετά επαρκείς για τα δίκτυα αισθητήρων διότι το άνοιγμα και το κλείσιμο τους καταναλώνει πολύ ενέργεια.

Αν και όλο και υψηλότερες υπολογιστικές δυνατότητες είναι διαθέσιμες σε όλο και μικρότερους επεξεργαστές, οι μονάδες επεξεργασίας και μνήμης που απαιτούνται για τα μεγέθη των δικτύων αισθητήρων είναι ακόμα ανεπαρκείς ή ανύπαρκτοι.

Οι περισσότερες εφαρμογές για ένα κόμβο απαιτούν γνώση της θέσης (location-based applications). Αφού οι αισθητήριοι κόμβοι εγκαθίστανται γενικά με τυχαία διάταξη και λειτουργούν χωρίς παρακολούθηση, υπάρχει η ανάγκη να συνεργάζονται με ένα σύστημα εντοπισμού θέσης. Τα συστήματα εντοπισμού θέσης απαιτούνται επίσης και από μερικά πρωτόκολλα δρομολόγησης (location based protocols), προκειμένου να λειτουργήσουν. Είναι σύνηθες να θεωρείται ότι κάθε αισθητήριος κόμβος πρέπει να έχει και ένα σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) το οποίο να έχει τουλάχιστον 5m ακρίβεια.

### 1.3 Τοπολογία δικτύων αισθητήρων

Ένας μεγάλος αριθμός μη προσβάσιμων και χωρίς παρακολούθηση αισθητήριων κόμβων, οι οποίοι εύκολα μπορούν να χαλάσουν, κάνει την διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου μια μεγάλη πρόκληση. Η πυκνότητα μπορεί να φθάνει και τους 20 κόμβους/m<sup>3</sup>, κάτι που δυσκολεύει ακόμα περισσότερο την διαχείριση της τοπολογίας. Μπορούμε να εξετάσουμε την διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου αισθητήρων σε 3 φάσεις:

#### Φάση πριν την εγκατάσταση και φάση εγκατάστασης

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν είτε να διασπαρθούν μαζικά είτε να τοποθετηθούν ένας-ένας στο χώρο. Μπορούν να εγκατασταθούν με τους εξής τρόπους :

- Να πεταχτούν από ένα αεροπλάνο

- Να βρίσκονται σε ένα βλήμα πυροβολικού (ή πύραυλο) το οποίο εκρήγνυται και τους διασπείρει στην περιοχή.
- Να ριφθούν με ένα καταπέλτη π.χ. από το κατάστρωμα ενός πλοίου.
- Να τοποθετηθούν ένας – ένας από ένα άνθρωπο ή ένα ρομπότ.

Αν και ο μεγάλος αριθμός των αισθητήρων καθώς και η χωρίς παρακολούθηση εγκατάστασή τους συνήθως περιλαμβάνει την τοποθέτησή τους σύμφωνα με ένα προσεχτικά μελετημένο σχέδιο, η αρχική εγκατάσταση πρέπει να πληροί κάποια κριτήρια:

- Μείωση του κόστους εγκατάστασης.
- Εξαφάνιση της ανάγκης για οποιαδήποτε οργάνωση ή σχεδιασμό εκ των προτέρων.
- Αύξηση της ευελιξίας τοποθέτησης.
- Προώθηση της αυτό-οργάνωσης και της αντοχής σε σφάλματα.

#### Φάση μετά την εγκατάσταση.

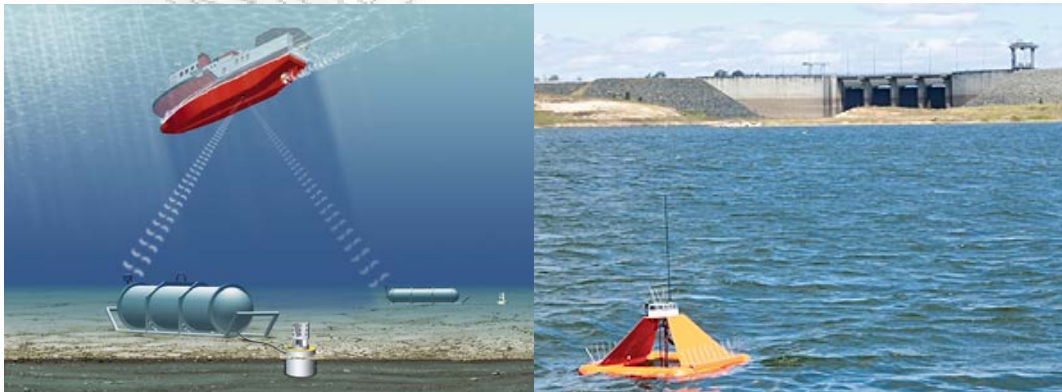
Μετά την εξάπλωση, οι αλλαγές στην τοπολογία οφείλονται σε αλλαγές στους αισθητήριους κόμβους όπως :

- Θέση
- Δυνατότητα επικοινωνίας
- Διαθέσιμη ενέργειας
- Δυσλειτουργία.
- Λεπτομέρειες στο σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν.

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να εγκατασταθούν και στατικά. Οι αποτυχίες είναι ένα σύνηθες φαινόμενο λόγω έλλειψης ενέργειας ή καταστροφής. Είναι επίσης πιθανό να έχουμε δίκτυα αισθητήρων των οποίων οι κόμβοι συνεχώς κινούνται. Εκτός από τα προβλήματα τα οποία είναι φυσικό να αντιμετωπίζουν εξαιτίας των χαρακτηριστικών τους είναι δυνατόν ακόμα να έχουμε και δολιοφθορές. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι οι τοπολογίες των δικτύων αισθητήρων να υπόκεινται σε συχνές αλλαγές.

#### Φάση εγκατάστασης επιπλέον κόμβων

Επιπλέον κόμβοι είναι δυνατόν να εγκατασταθούν οποιαδήποτε χρονική στιγμή για να αντικαταστήσουν τους κόμβους που παρουσιάζουν δυσλειτουργίες ή λόγω αλλαγών στον αρχικό σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν. Η πρόσθεση νέων κόμβων στο δίκτυο δημιουργεί την ανάγκη για επαναδιοργάνωση. Προκειμένου να αντιμετωπίσουμε τις συχνές αλλαγές στην τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το οποίο αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων με μεγάλους περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας χρειαζόμαστε ειδικά σχεδιασμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

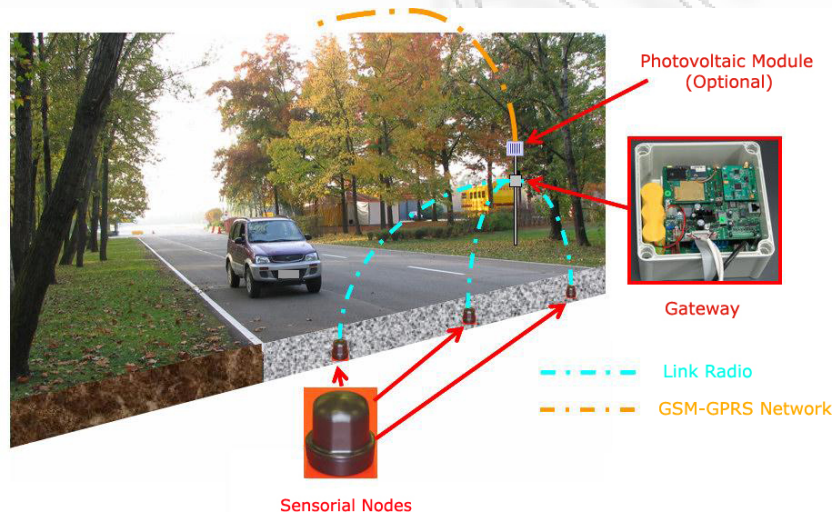


**Εικόνα 4: Αισθητήριοι κόμβοι σε υδάτινο περιβάλλον [31]**

## 1.4 Περιβάλλον

Οι αισθητήριοι κόμβοι εγκαθίστανται πυκνά είτε πολύ κοντά είτε κατευθείαν μέσα στο παρατηρούμενο φαινόμενο (εικόνα 4). Έτσι συνήθως εργάζονται χωρίς παρακολούθηση σε απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές. Είναι δυνατόν να εργάζονται :

- Στο εσωτερικό ενός μεγάλου μηχανήματος.
- Στα βάθη του ωκεανού.
- Μέσα σε ένα κυκλώνα.
- Στην επιφάνεια ενός ωκεανού στην διάρκεια μια καταιγίδας.
- Σε μια περιοχή μολυσμένη από ραδιενέργεια ή χημικές ουσίες.
- Στο πεδίο της μάχης πίσω από τις γραμμές του εχθρού.
- Σε ένα σπίτι ή σε ένα μεγάλο κτίριο.
- Σε μια μεγάλη αποθήκη.
- Εμφυτευμένοι σε ζώα.
- Ενσωματωμένοι σε ταχέως κινούμενα οχήματα.
- Στα νερά ενός ποταμού.



Εικόνα 5: Αισθητήριοι κόμβοι ενσωματωμένοι στο οδόστρωμα [4i]

Η παραπάνω λίστα εφαρμογών μας δίνει μια ιδέα για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργούν οι αισθητήριοι κόμβοι. Λειτουργούν σε συνθήκες υψηλής πίεσης στα βάθη ενός ωκεανού, στο σκληρό περιβάλλον ενός πεδίου μάχης, σε συνθήκες υψηλών ή χαμηλών θερμοκρασιών όπως η μύτη ενός αεροσκάφους ή σε συνθήκες υψηλού περιβαλλοντολογικού θορύβου.

## 1.5 Μέσα Μετάδοσης

Σε ένα δίκτυο αισθητήρων, οι επικοινωνούντες κόμβοι συνδέονται ασύρματα. Αυτές οι ζεύξεις μπορούν να υλοποιηθούν από ραδιοσυχνότητες, υπέρυθρα ή οπτικά μέσα. Προκειμένου να έχουμε λειτουργία σε παγκόσμιο επίπεδο πρέπει να διαλέξουμε ένα μέσο το οποίο θα είναι διαθέσιμο παντού στον κόσμο.

Μια επιλογή για ασύρματες ζεύξεις είναι η χρήση της Βιομηχανικής, Επιστημονικής και Ιατρικής Μπάντας (Industrial Scientific Medical ISM Band), η οποία προσφέρεται χωρίς άδεια χρήσης στις περισσότερες χώρες. Κάποιες από αυτές τις συχνότητες χρησιμοποιούνται ήδη για επικοινωνία σε ασύρματα τηλέφωνα ή τοπικά ασύρματα δίκτυα (WLANs). Για τα δίκτυα αισθητήρων απαιτείται ένας μικρού μεγέθους, χαμηλού κόστους και πολύ χαμηλής ενέργειας

πομποδέκτης. Σύμφωνα με το, υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί στο υλικό, και το ανταλλαγή ανάμεσα στην αποτελεσματικότητα της κεραίας και την εξοικονόμηση ενέργειας περιορίζουν την επιλογή μιας συχνότητας για αυτούς τους πομποδέκτες στις πολύ υψηλές συχνότητες. Επίσης προτείνεται η χρήση των 433MHz στην Ευρώπη και των 915MHz στην Β. Αμερική.

Το κύριο πλεονέκτημα χρήσης των συχνοτήτων ISM είναι η δωρεάν χρήση, το τεράστιο φάσμα και η παγκόσμια διαθεσιμότητα. Δεν περιορίζονται από κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο και έτσι δίνουν μεγαλύτερη ελευθερία στην υλοποίηση τεχνικών που θα εξοικονομούν ενέργεια στα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων. Από την άλλη μεριά υπάρχουν διάφοροι κανόνες και περιορισμοί, όπως της ενέργειας και των παρεμβολών από ήδη υπάρχουσες εφαρμογές.

Ένας άλλος πιθανός τρόπος επικοινωνίας είναι μέσω υπερύθρων. Η επικοινωνία μέσω υπερύθρων μπορεί να γίνει χωρίς άδεια χρήσης και είναι ανθεκτική στις παρεμβολές από ηλεκτρικές συσκευές. Οι πομποδέκτες υπερύθρων είναι φθηνότεροι και ευκολότεροι να κατασκευαστούν. Πολλές από τις σημερινές συσκευές όπως τηλέφωνα υπολογιστές κατασκευάζονται έχοντας ενσωματωμένο ένα πομποδέκτη υπερύθρων. Το μόνο μειονέκτημα τους είναι η απαίτηση για οπτική επαφή μεταξύ των επικοινωνούντων συσκευών. Το τελευταίο κάνει αποτρεπτική την επιλογή για χρήση υπερύθρων σαν μέσο μετάδοσης σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων.

Οι συνήθεις απαιτήσεις των εφαρμογών για τις οποίες χρησιμοποιούνται τα δίκτυα αισθητήρων δημιουργούν μεγάλη πρόκληση στην επιλογή ενός μέσου μετάδοσης. Για παράδειγμα σε εφαρμογές που μπορούν να είναι υποθαλάσσιες μπορεί να απαιτείται η χρήση του νερού ως μέσου μετάδοσης. Επιπλέον λόγω του ότι η κεραία ενός αισθητήρα μπορεί να μην έχει το απαιτούμενο ύψος ή ισχύ εκπομπής εκτός από την επιλογή του μέσου, μεγάλο ρόλο παίζει η χρήση ισχυρής κωδικοποίησης και η επιλογή συχνότητας προκειμένου να γίνει στο έπακρο εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών του καναλιού.

## 1.6 Κατανάλωση ενέργειας

Ο ασύρματος αισθητήριος κόμβος, αφού είναι μια μικρο-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 αισθητήριου κόμβου εξαρτάται από αυτήν. Σε ένα δίκτυο αισθητήρων ο κάθε κόμβος παίζει το ρόλο του αποστολέα αλλά και του δρομολογητή. 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: αίσθηση, επικοινωνία και επεξεργασία δεδομένων.

## 1.7 Επικοινωνία

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 κατά την λήψη. Βεβαίως, εκτός από αυτό, σοβαρό ρόλο παίζει και το άνοιγμα και κλείσιμο του κυκλώματος του πομποδέκτη.

## 1.8 Επεξεργασία δεδομένων

Η καταναλισκόμενη ενέργεια είναι μικρότερη κατά την φάση της επεξεργασίας των δεδομένων σε σχέση με την επικοινωνία. Συνεπώς θα πρέπει ο κόμβος να έχει ενσωματωμένο κύκλωμα επεξεργασίας προκειμένου να επεξεργάζεται τα δεδομένα με απώτερο σκοπό να στέλνει το δυνατόν λιγότερα πακέτα κατά την φάση της επικοινωνίας. Η ενέργεια που καταναλώνει ένας επεξεργαστής εξαρτάται από την τάση και την συχνότητα λειτουργίας. Συνεπώς αν μειώσουμε τους δύο αυτούς παράγοντες θα έχουμε και μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Βέβαια θα πρέπει να συμβιβαστούμε διότι και η ικανότητα επεξεργασίας θα μειωθεί. Μια άλλη εναλλακτική είναι να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι ο επεξεργαστής εργάζεται λίγες φορές στο μέγιστο της απόδοσής του και έτσι μπορούμε να έχουμε ένα δυναμικό τρόπο αυξομείωσης του ρεύματος και

της συχνότητας λειτουργίας του. Υπάρχουν τρόποι προκειμένου η δυναμική λειτουργία του επεξεργαστή να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις απαιτήσεις και να μειωθεί η απαιτούμενη ενέργεια.

## 1.9 Εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων

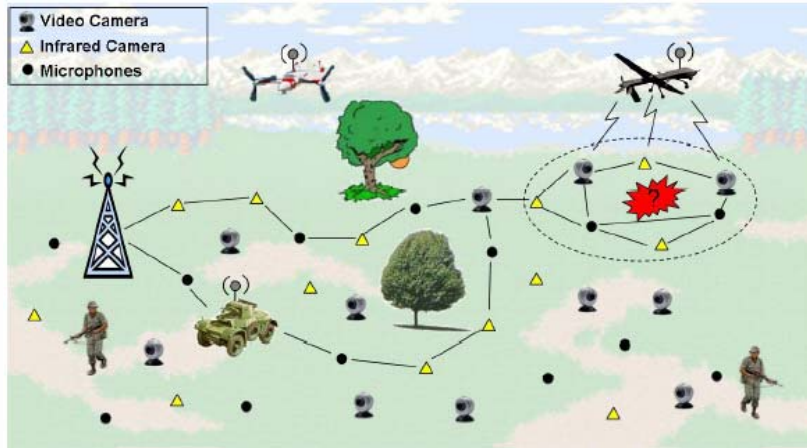
Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αποτελούνται από πολλούς διαφορετικούς τύπους αισθητήρων όπως σεισμικών, μαγνητικών χαμηλού ρυθμού δειγματοληψίας, θερμικών, οπτικών, υπερύθρων, ακουστικών και ραντάρ, οι οποίοι είναι ικανοί να παρακολουθούν μια ευρεία ποικιλομορφία περιβαλλοντολογικών συνθηκών και φαινομένων που περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Κίνηση οχημάτων
- Συνθήκες φωτός.
- Πίεση.
- Διάρθρωση εδάφους.
- Επίπεδα θορύβου.
- Την παρουσία ή απουσία προκαθορισμένων ειδών αντικειμένων.
- Επίπεδα μηχανικής πίεσης σε προσκολλημένα αντικείμενα και
- Τα τρέχοντα χαρακτηριστικά όπως ταχύτητα, κατεύθυνση και μέγεθος ενός αντικειμένου.

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή ανίχνευση, ανίχνευση συμβάντων, ανίχνευση ταυτοτήτων γεγονότων, ανίχνευση θέσης και τοπικό έλεγχο μηχανισμών κίνησης. Η ιδέα της μικρό-ανίχνευσης και της ασύρματης σύνδεσης αυτών των κόμβων υπόσχεται πολλές νέες περιοχές εφαρμογών. Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε στρατιωτικές, υγείας, περιβάλλοντος, οικιακές και εμπορικές. Είναι δυνατόν να επεκτείνουμε την ομαδοποίηση με περισσότερες κατηγορίες όπως εξερεύνηση του διαστήματος, χημική επεξεργασία, αντιμετώπιση καταστροφών κ.α.

### Στρατιωτικές Εφαρμογές

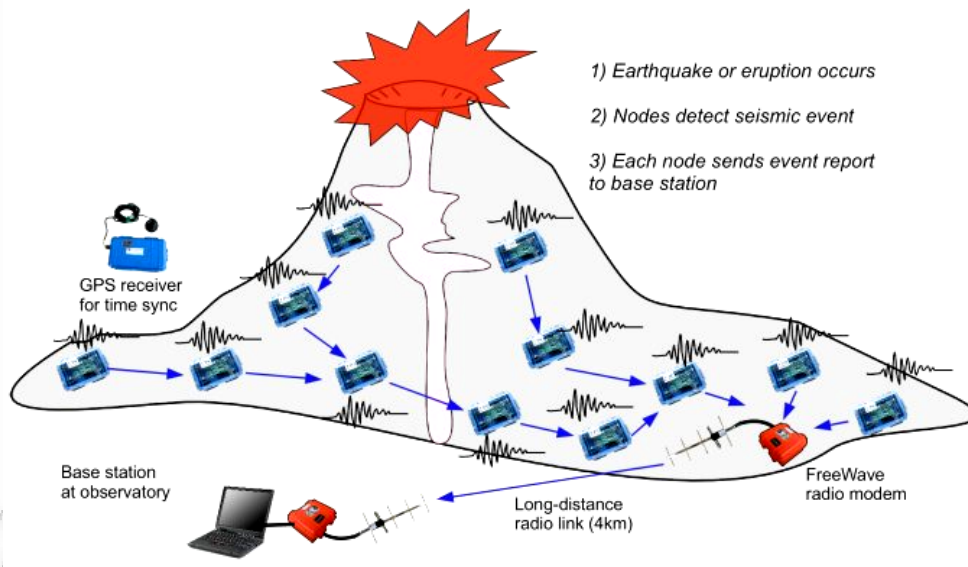
Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να είναι ένα ενσωματωμένο κομμάτι των στρατιωτικών συστημάτων διαταγών, ελέγχου, επικοινωνιών, υπολογισμού, ευφυΐας, παρακολούθησης, αναγνώρισεων και στόχευσης. Τα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων, όπως η ταχεία εγκατάσταση, η αυτό-οργάνωση και η αντοχή σε λάθη, τους κατατάσσουν σε ένα πολύ υποσχόμενο αισθητήριο μέσο για τα παραπάνω συστήματα. Καθώς τα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται στην πυκνή χωρική εγκατάσταση, η καταστροφή μερικών κόμβων από εχθρικές δυνάμεις δεν επηρεάζει μια στρατιωτική επιχείρηση σε τέτοιο βαθμό όσο η καταστροφή των παραδοσιακών αισθητήρων, κάνοντας την χρήση των δικτύων αισθητήρων ιδανική για τα πεδία των μαχών. Κάποιες από τις στρατιωτικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι η παρακολούθηση των φιλικών δυνάμεων, του εξοπλισμού και των πυρομαχικών τους, η παρακολούθηση του πεδίου της μάχης, η αναγνώριση των εχθρικών δυνάμεων και του εδάφους, η στόχευση, η αποτίμηση των ζημιών της μάχης, καθώς και η ανίχνευση και αναγνώριση μιας ΡαδιοΒιολογικής/Χημικής και Πυρηνικής (PBXΠ) απειλής.



Εικόνα 6: Στρατιωτικές εφαρμογές [5i]

Οι ηγέτες και οι διοικητές μπορούν χρησιμοποιώντας τα δίκτυα αισθητήρων να παρακολουθούν την κατάσταση των τμημάτων τους καθώς και του εξοπλισμού και των πυρομαχικών τους. Κάθε στρατιώτης, όχημα, εξοπλισμός και κρίσιμο οπλικό σύστημα μπορεί να εξοπλιστεί με αισθητήρες που θα αναφέρουν την κατάστασή του. Αυτές οι αναφορές συγκεντρώνονται σε κεντρικούς κόμβους και προωθούνται προς τους διοικητές των τμημάτων. Τα δεδομένα μπορούν επίσης να προωθηθούν και σε μεγαλύτερα ιεραρχικά κλιμάκια αθροισμένα με δεδομένα από άλλες μονάδες του ίδιου επιπέδου.

Κρίσιμα εδάφη, δρομολόγια προσέγγισης, μονοπάτια και στενωποί μπορούν γρήγορα να καλυφθούν με δίκτυα αισθητήρων και να παρακολουθούνται στενά για εχθρικές δραστηριότητες. Καθώς οι επιχειρήσεις θα εξελίσσονται και θα ετοιμάζονται νέα επιχειρησιακά σχέδια, μπορούν κάθε φορά να εγκαθίστανται νέα δίκτυα αισθητήρων που θα καλύπτουν τις νέες ανάγκες.



Εικόνα 7: Περιβαλλοντολογικές Εφαρμογές [6i]

### Περιβαλλοντολογικές Εφαρμογές

Μερικές περιβαλλοντολογικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνουν την παρακολούθηση των κινήσεων των πουλιών, μικρών ζώων και εντόμων, την παρακολούθηση των περιβαλλοντολογικών συνθηκών που επηρεάζουν την χλωρίδα και την πανίδα, την άρδευση, την εντολή σειράς ενεργειών για παρακολούθηση μεγάλης κλίμακας της γης και την εξερεύνηση του πλανήτη, την χημική και βιολογική ανίχνευση, την ακριβή γεωργία, την βιολογική και περιβαλλοντολογική παρακολούθηση της θάλασσας, του εδάφους και του αέρα, την παρακολούθηση για φωτιές στα δάση, την μετεωρολογική και γεωφυσική έρευνα, την



ανίχνευση πλημμύρων, την ανίχνευση σύνθετων ζωντανών οργανισμών του περιβάλλοντος, καθώς και την μελέτη μολύνσεων.

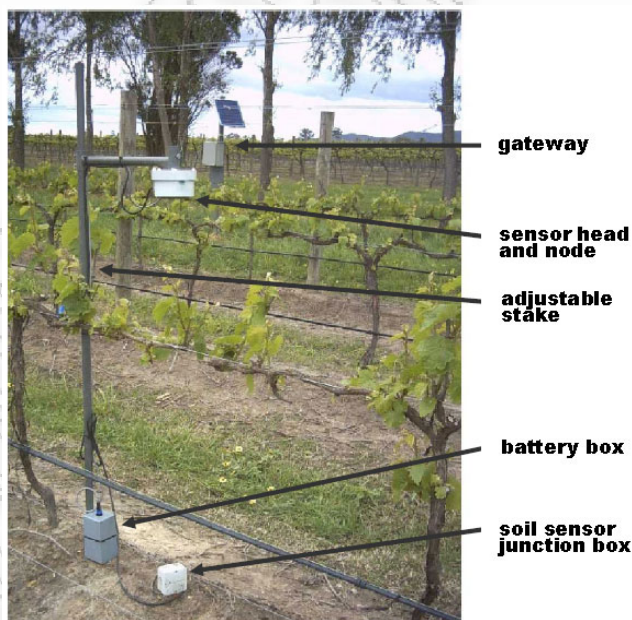
#### Ανίχνευση δασικών πυρκαγιών

Καθώς οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να εγκατασταθούν στρατηγικά, τυχαία και πυκνά σε ένα δάσος, μπορούν να αναμεταδώσουν την ακριβή προέλευση της φωτιάς στους άμεσα ενδιαφερόμενους προτού η πυρκαγιά εξαπλωθεί ανεξέλεγκτα. Εκατομμύρια αισθητήριων κόμβων μπορούν εγκατασταθούν και να δημιουργήσουν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα χρησιμοποιώντας ασύρματες συχνότητες και οπτικά συστήματα. Επίσης μπορούν να εξοπλιστούν με αποτελεσματικές μεθόδους εκμετάλλευσης της ενέργειας όπως ηλιακές κυμέλες προκειμένου να λειτουργούν απρόσκοπτα χωρίς παρακολούθηση για μήνες ή και χρόνια. Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να συνεργάζονται ο ένας με τον άλλο προκειμένου να εκτελούν κατανομημένη ανίχνευση και να υπερπηδούν εμπόδια όπως βράχια και δέντρα, που παρεμποδίζουν το πεδίο ανίχνευσης.

#### Ανίχνευση σύνθετων βιολογικών οργανισμών του περιβάλλοντος

Μια τέτοια ανίχνευση απαιτεί εξεζητημένες προσεγγίσεις για τον συνδυασμό των πληροφοριών χρόνου και χώρου. Η εξέλιξη των τεχνολογιών στον τομέα της ασύρματης ανίχνευσης και της αυτόματης συλλογής δεδομένων έχουν δώσει μεγαλύτερη φασματική, χωρική και χρονική ανάλυση με γεωμετρικά μειούμενο το κόστος ανά μονάδα περιοχής. Μαζί με αυτές τις εξελίξεις, οι αισθητήριοι κόμβοι έχουν επίσης την δυνατότητα να συνδέονται με το διαδίκτυο, το οποίο επιτρέπει σε απομακρυσμένους χρήστες να ελέγχουν, να παρακολουθούν και να παρατηρούν την βιοσυνθετικότητα του περιβάλλοντος.

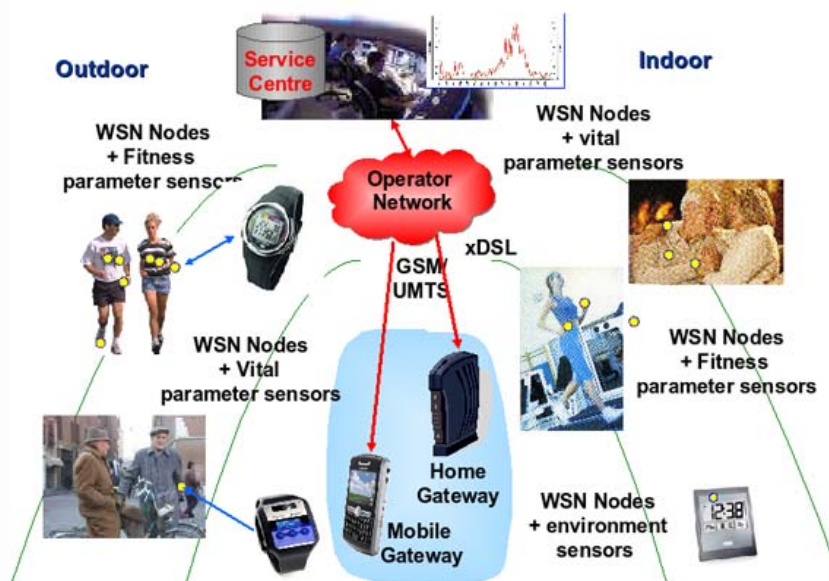
Αν και οι δορυφορικοί και αεροπορικοί αισθητήρες είναι χρήσιμοι στην παρακολούθηση μεγάλης κλίμακας βιοδιαφορών, π.χ. χωρική πολυπλοκότητα των επικρατούντων ειδών φυτών, δεν έχουν δυνατότητα για διαχωρισμό των μικρών βιοδιαφορών οι οποίες είναι και οι περισσότερες σε ένα οικοσύστημα. Σαν αποτέλεσμα, είναι αναγκαία η εγκατάσταση ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων στο έδαφος για την παρακολούθηση της βιοσυνθετικότητας.



Εικόνα 8: Εφαρμογές Γεωργίας [7]

#### Γεωργία Ακρίβειας (Precision Agriculture)

Κάποια από τα πλεονεκτήματα των δικτύων αισθητήρων είναι η ικανότητα της παρακολούθησης ακριβών επιπέδων του πόσιμου νερού, του επιπέδου διάβρωσης του εδάφους και του επιπέδου μόλυνσης του αέρα σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 9: Εφαρμογές Υγείας [8]

### Εφαρμογές Υγείας

Κάποιες από τις εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι : Παροχή μέσω αλληλεπίδρασης για άτομα με ειδικές ανάγκες, παρακολούθηση ασθενών, διάγνωση, διαχείριση φαρμάκων σε νοσοκομεία, παρακολούθηση των κινήσεων και των εσωτερικών διεργασιών των εντόμων και άλλων μικρών ζώων, τηλεπαρακολούθηση των φυσιολογικών δεδομένων ενός ανθρώπου καθώς και εντοπισμός και παρακολούθηση των γιατρών και ασθενών σε ένα νοσοκομείο.

Τα φυσιολογικά δεδομένα που συγκεντρώνονται από ένα δίκτυο αισθητήρων μπορούν να αποθηκευθούν για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ιατρική εξερεύνηση. Το εγκατεστημένο δίκτυο αισθητήρων μπορεί επίσης να παρακολουθεί και να ανιχνεύει την συμπεριφορά ηλικιωμένων ατόμων, π.χ. μια πτώση. Αυτοί οι μικροί κόμβοι αισθητήρων επιτρέπουν στο άτομο μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων και επιτρέπουν στους γιατρούς να αναγνωρίσουν προκαθορισμένα συμπτώματα έγκαιρα. Επίσης παρέχουν μια καλύτερη ποιότητα ζωής για τα άτομα σε σύγκριση με τα κέντρα παροχής θεραπείας. Ένα «έξυπνο σπίτι υγείας» έχει σχεδιαστεί στο Faculty της φαρμακευτικής στην Grenoble της Γαλλίας προκειμένου να εκτιμηθεί η δυνατότητα ύπαρξης ενός τέτοιου συστήματος.

### Οικιακές Εφαρμογές

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, έξυπνοι αισθητήριοι κόμβοι και μηχανισμοί κίνησης μπορούν να εμφυτευτούν σε συσκευές, όπως ηλεκτρικές σκούπες, φούρνοι μικροκυμάτων, ψυγεία και βίντεο. Αυτοί οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να αλληλεπιδρούν ο ένας με τον άλλον καθώς και με ένα εξωτερικό δίκτυο μέσω του Διαδικτύου ή ενός δορυφόρου. Επιτρέπουν στους τελικούς χρήστες να διαχειρίζονται τις οικιακές συσκευές τους από όπου βρίσκονται είτε τοπικά είτε απομακρυσμένα.

Ο σχεδιασμός ενός έξυπνου περιβάλλοντος μπορεί να έχει δύο διαφορετικές προοπτικές δηλ. ανθρωποκεντρική και τεχνοκεντρική. Για την ανθρωπο-κεντρική προσέγγιση, ένα έξυπνο περιβάλλον πρέπει να προσαρμοστεί στις ανάγκες των τελικών χρηστών σε ότι αφορά στις δυνατότητες εισόδου και εξόδου. Για την τεχνοκεντρική προσέγγιση, νέες τεχνολογίες υλικού, δικτυακές λύσεις και ενδιάμεσες συσκευές πρέπει να αναπτυχθούν. Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν ένα έξυπνο περιβάλλον. Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να εμφυτευτούν στην επίπλωση και σε οικιακές συσκευές και μπορούν να επικοινωνούν ο ένας με τον άλλον καθώς και με τον εξυπηρετητή του δωματίου. Ο εξυπηρετητής δωματίου μπορεί επίσης να επικοινωνεί με εξυπηρετητές από άλλα δωμάτια για να μαθαίνει για τις υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν π.χ. εκτύπωση, σάρωση και αποστολή και λήψη φαξ. Αυτοί οι εξυπηρετητές δωματίων μπορούν να ενσωματωθούν με

υπάρχουσες εμφυτευμένες συσκευές ώστε να γίνουν αυτό-οργανωτικοί, αυτό-ρυθμιζόμενοι, και προσαρμοζόμενοι σε θεωρητικά μοντέλα. Ένα άλλο παράδειγμα έξυπνου περιβάλλοντος είναι η «εργαστηριακή κατοικία» στο Ινστιτούτο τεχνολογίας της Georgia. Οι υπολογισμοί και η αίσθηση σε αυτό το περιβάλλον πρέπει να είναι αξιόπιστοι, συνεχείς και διαφανείς.

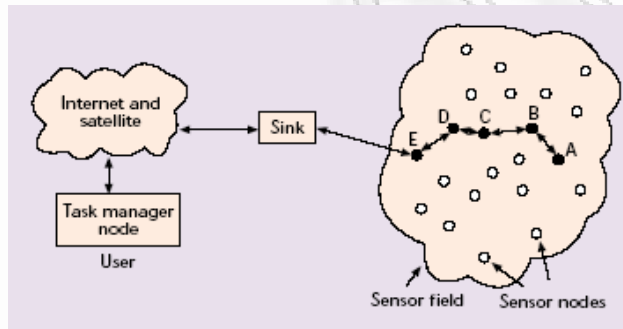
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

### ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

#### 2.1 Δίκτυα αισθητήρων – σφαιρική άποψη και απαιτήσεις

Έχουμε αναγνωρίσει έναν αριθμό χαρακτηριστικών των δικτύων αισθητήρων τα οποία έχουν επιδράσει κατευθείαν στις αρχιτεκτονικές και σχεδιαστικές αποφάσεις. Αυτά τα χαρακτηριστικά προέρχονται φυσικά από απαιτήσεις και ανάγκες της τεχνολογίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος, χαμηλή κατανάλωση ισχύος, ευρωστία, ευκαμψία, ελαστικότητα σε λάθη και σφάλματα, αυτονομία λειτουργίας και συχνά ασφάλεια και μυστικότητα.

Τα δίκτυα αισθητήρων έχουν έξι στοιχεία: επεξεργαστή, πομποδέκτη, αποθηκευτικό χώρο, αισθητήρες και συσσωρευτή. Υπάρχει ένας αριθμός με σχετικά τεχνολογικά στοιχεία τα οποία πρέπει να εξεταστούν, π.χ. μια τεράστια ποικιλία από πανίσχυρες τεχνολογίες χαμηλής ισχύος, χαμηλής τιμής επεξεργαστές και χαμηλής τιμής μνήμης που είναι προσιτές, Επίσης, η μνήμη και ο επεξεργαστής γίνονται όλο και περισσότερο ισχυρά σύμφωνα με τον νόμο του Moore, και το ασύρματο εύρος ζώνης έχει μεγαλώσει περισσότερο του 25% στα τελευταία 5 χρόνια. Η χωρητικότητα των μπαταριών έχει αυξηθεί με ρυθμό χαμηλό και ίσο του 3% τον χρόνο. Το κόστος ειδικά σχεδιασμένων εφαρμογών έχει αυξηθεί αστραπιαία.



Εικόνα 10: Διασπορά ασύρματων κόμβων σε ένα πεδίο παρακολούθησης [1]

Οι ασύρματοι κόμβοι διασπείρονται σε ένα πεδίο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10. Κάθε ένας από αυτούς συλλέγει δεδομένα, τα επεξεργάζεται και τα στέλνει πίσω σε ένα κεντρικό σημείο και από εκεί καταλήγουν στους ενδιαφερόμενους χρήστες.

Η στοίβα πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται από το κεντρικό σημείο αλλά και από όλους τους κόμβους φαίνεται στην Εικόνα 11.

Όπως φαίνεται αποτελείται από τα εξής επίπεδα: φυσικό, ζεύξης δεδομένων, δικτύου, μεταφοράς και εφαρμογής, καθώς και από τα κάτωθι επίπεδα διαχείρισης (management planes) ενέργειας, κινήσεως και στόχου.



Εικόνα 11: Η στοίβα πρωτοκόλλου των δικτύων αισθητήρων [1]

Τα τρία τελευταία επίπεδα διαχείρισης βοηθούν τους αισθητήριους κόμβους να συνεργαστούν καλύτερα ο ένας με τον άλλο προκειμένου να φέρουν σε πέρας τον σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν καταναλώνοντας όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια. Τα υπόλοιπα επίπεδα λειτουργούν ανάλογα με αυτά του προτύπου OSI.

## 2.2 Μικρό φυσικό μέγεθος

Η μείωση του φυσικού μεγέθους πάντα ήταν το κλειδί σχεδιασμού. Γι' αυτό το λόγο, ο στόχος είναι η παροχή ισχυρού επεξεργαστή μνήμης, του πομποδέκτη και άλλων συστατικών διατηρώντας δικαιολογημένα μικρό μέγεθος περιγράφοντας συγκεκριμένες εφαρμογές.

## 2.3 Χαμηλή κατανάλωση ισχύος

Η ικανότητα, ο χρόνος ζωής και η παρουσία των αισθητήρων, όλα πηγάζουν από την ενέργεια. Οι αισθητήρες μπορούν να είναι ενεργοί για μια μεγάλη περίοδο χρόνου χωρίς επαναφόρτιση της μπαταρίας, λόγω του ότι η συντήρηση είναι δαπανηρή.

## 2.4 Εντατική λειτουργία

Προκειμένου να είναι επιτυχής όλη η παρουσία των κόμβων αισθητήρων, οι αισθητήρες πληροφοριών πρέπει να δεσμεύονται, να επεξεργάζονται, να συμπιέζονται και μετά να στέλνονται στο δίκτυο στιγμιαία, με *ripelined* επεξεργασία, σε αντίθεση με τις συνήθεις διαδικασίες. Εδώ υπάρχουν δύο σχετικές προσεγγίσεις:

- α. Διάρθρωση του επεξεργαστή σε πολλές μονάδες όπου κάθε μία είναι προσδιορισμένη να είναι υπεύθυνη για συγκεκριμένο σκοπό.
- β. Αλλαγή στην εκτέλεση διεργασιών του κόμβου.

## 2.5 Ποικιλία στη χρήση και στον σχεδιασμό

Αφού θέλουμε τον κάθε κόμβο να είναι μικρού μεγέθους, χαμηλό στην κατανάλωση ισχύος και να έχει περιορισμένες φυσικές ομοιότητες, οι κόμβοι αισθητήρων τείνουν να είναι ειδικής εφαρμογής. Παρόλα αυτά οι διαφορετικοί αισθητήρες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις, π.χ. οι κάμερες και τα απλά θερμομέτρα είναι τα δύο ακραία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας και της πολυπλοκότητας. Γι' αυτό, ο σχεδιασμός πρέπει να απλοποιεί τις συναλλαγές μεταξύ της επαναχρησιμότητας, του κόστους και της ικανότητας.

## 2.6 Ευέλικτες λειτουργίες

Αφού οι αισθητήρες τείνουν να αναπτυχθούν πάνω σε ένα μεγάλο και μερικές φορές εχθρικό περιβάλλον (δάση, στρατιωτικές εφαρμογές, ανθρώπινο σώμα) αναμένουμε τους αισθητήρες να είναι ανεκτικοί στα λάθη και σφάλματα. Γι' αυτό, οι αισθητήριοι κόμβοι χρειάζονται δυνατότητες αυτοελέγχου, αυτοεξακρίβωσης και αυτοεπισκευής.

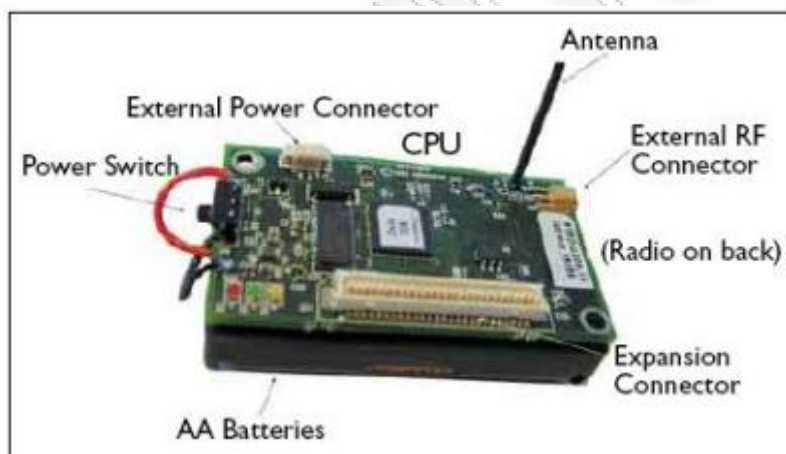
## 2.7 Ασφάλεια

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να είναι ικανά να κρατούν κρυφή, από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες, την πληροφορία που συλλέγουν. Έτσι, για να μπορέσει να διατηρηθεί η μυστικότητα, το δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει μηχανισμούς κρυπτογράφησης και αυθεντικότητας.

Η χρήση τέτοιων τεχνικών επιδρούν αρνητικά τόσο στην κατανάλωση ισχύος όσο και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου ενώ, η ενσωμάτωση επιπλέον bits στα μεταφερόμενα πακέτα, τα οποία περιέχουν τις πληροφορίες αυθεντικότητας, μειώνουν τον αριθμό των πραγματικών δειγμάτων που μπορούν να μεταφερθούν από ένα κόμβο.

## 2.8 Στοιχεία κόμβων δικτύων αισθητήρων

Ένας κόμβος-αισθητήρας αποτελείται από τέσσερα βασικά συστατικά: μία μονάδα αίσθησης (sensing unit), μία μονάδα επεξεργασίας (processing unit), μία μονάδα εκπομπής-λήψης (transceiver unit) και μία μονάδα ισχύος (power unit). Επίσης, οι κόμβοι μπορεί να έχουν πρόσθετα συστατικά μέρη ανάλογα με την εφαρμογή, όπως σύστημα εντοπισμού (location finding system), γεννήτρια ισχύος (power generator) και μονάδα κίνησης (mobilizer). Οι μονάδες αίσθησης αποτελούνται συνήθως από δύο υπομονάδες: αισθητήρες και μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADCs). Τα αναλογικά σήματα που παράγονται από τους αισθητήρες, με βάση το παρατηρούμενο φαινόμενο, μετατρέπονται σε ψηφιακά μέσω του ADC και στη συνέχεια διοχετεύονται στη μονάδα επεξεργασίας. Η μονάδα επεξεργασίας, που στη γενική περίπτωση συνδέεται με μία μικρή μονάδα αποθήκευσης, διαχειρίζεται τις διαδικασίες που επιτρέπουν στον κόμβο να συνεργάζεται με τους άλλους κόμβους ώστε να διεκπεραιωθεί το έργο που τους έχει ανατεθεί. Η μονάδα εκπομπής-λήψης συνδέει τον κόμβο στο δίκτυο. Από τα πιο σημαντικά συστατικά μέρη ενός κόμβου-αισθητήρα είναι η μονάδα ισχύος. Οι μονάδες ισχύος είναι δυνατόν να υποστηρίζονται από μονάδες συλλογής ισχύος, όπως είναι οι ηλιακές κυψέλες, υπάρχουν όμως κι άλλες μονάδες που σχετίζονται με την εφαρμογή. Οι περισσότερες από τις τεχνικές δρομολόγησης και τα περισσότερα από τα έργα που ανατίθενται στους κόμβους απαιτούν γνώση της τοποθεσίας με υψηλή ακρίβεια. Έτσι, είναι σύνθετος ένας κόμβος να διαθέτει σύστημα εντοπισμού. Κάποιες φορές είναι χρήσιμη μία μονάδα κίνησης για τη μετακίνηση των αισθητήρων, όταν κάτι τέτοιο απαιτείται από το έργο που έχει ανατεθεί στους κόμβους.



Εικόνα 12: Συσκευή Κόμβου Αισθητήρα [9]

## 2.9 Χωρητικότητα (αποθηκευτικών μέσων)

Όλη η δομή των αισθητήρων δικτύου, καθώς και οι απαιτήσεις για χωρητικότητα σε κάθε κόμβο, πρέπει να είναι πολύ διαφορετική. Υπάρχουν τουλάχιστον δύο εναλλακτικές λύσεις για αποθήκευση πληροφοριών σε τοπικό κόμβο. Αντιθέτως, στην περίπτωση που ο κόμβος είναι μεγαλύτερος από την φύση του, κάποιος μπορεί να αποθηκεύσει την πληροφορία σε micro discs. Η πρώτη επιλογή είναι να χρησιμοποιηθούν μνήμες τύπου flash. Οι flash μνήμες είναι πολύ ελκυστικές σε σχέση με το κόστος και την χωρητικότητα αποθήκευσης την οποία παρέχουν. Παρόλα αυτά, έχει αυστηρούς, συγκριτικά, περιορισμούς σε σχέση με το πόσες φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση πληροφοριών στις ίδιες φυσικές τοποθεσίες. Η δεύτερη επιλογή είναι να χρησιμοποιήσει nano ηλεκτρονικά βασισμένα σε MRAM. Αναμενόταν ότι το MRAM θα είχε σύντομα σημαντικές εφαρμογές σε αριθμό περιοχών. Είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι οι non-volatile ημιαγωγοί και η χωρητικότητα αποθήκευσης δίσκου δημιουργήθηκαν σε βαθμό υψηλότερο από ότι στο νόμο του Moore. Η διαίρεση για μείωση ισχύος και η ανάπτυξη δομών μνήμης θα βοηθούσε το μήκος των λέξεων της πληροφορίας, να παράγεται από τους αισθητήρες.

## 2.10 Παροχή ισχύος

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η ενέργεια θα είναι ένας από τους κύριους τεχνολογικούς περιορισμούς για τους αισθητήριους κόμβους του δικτύου. Υπάρχουν δύο τουλάχιστον διαφορετικές μέθοδοι σύμφωνα με τις οποίες το πρόβλημα της παροχής ενέργειας μπορεί να επιλυθεί.

Η πρώτη είναι να εξοπλιστεί κάθε κόμβος με μία (επαναφορτιζόμενη) πηγή ενέργειας. Συνήθως, η κυρίαρχη επιλογή είναι να χρησιμοποιηθούν κυψέλες μπαταρίας υψηλής πυκνότητας. Η άλλη εναλλακτική για αυτή την επιλογή είναι να χρησιμοποιηθούν ολοκληρωμένες κυψέλες. Αυτές παρέχουν υψηλή πυκνότητα και καθαρή πηγή ενέργειας. Παρόλα αυτά, συνήθως αυτά δεν διατίθεται σε μεγέθη που να ταιριάζουν για κόμβους δικτύων αισθητήρων.

Η δεύτερη εναλλακτική μέθοδος είναι η συγκέντρωση από το περιβάλλον διαθέσιμη ενέργεια, όπως ηλιακή, ηλεκτρομαγνητική, μηχανική.

## 2.11 Αισθητήρες

Ο σκοπός των αισθητήριων κόμβων ενός δικτύου δεν είναι ούτε ο υπολογισμός ούτε η επικοινωνία, παρά, η αίσθηση. Το κύριο συστατικό των κόμβων αισθητήρων δικτύου είναι η τρέχουσα περιορισμένη τεχνολογία. Επίσης, οι ημιαγωγοί παρέχονται στο πραγματικό φυσικό κόσμο, ενώ οι υπολογιστικές και επικοινωνιακές μονάδες έχουν να κάνουν με κάποια ελεγχόμενα περιβάλλοντα. Οι μορφομετατροπείς (transducers) είναι τα απαιτούμενα συστατικά σε κόμβους αισθητήρων και χρησιμοποιούνται να μετατρέψουν την μία μορφή ενέργειας σε άλλη. Σε αντίθεση, οι αισθητήρες μπορούν να έχουν 4 άλλα συστατικά: analog, A/D, ψηφιακά και μικροελεγκτή. Η πιο καλή επιλογή σχεδιασμού περιλαμβάνει μόνο τον transducer. Παρόλα αυτά, η τρέχουσα τάση είναι να τοποθετείς όλο και πιο πολύ «εξυπνάδα» μέσα στους αισθητήριους κόμβους του δικτύου. Γι' αυτό, οι δυνατότητες επεξεργασίας καθώς και υπολογισμού έχουν προστεθεί στους κόμβους αισθητήρων.

Παρατηρούμε ότι η επιλογή του τύπου και η ποιότητα αισθητήρων καθώς και η απόφαση για την τοποθέτησή τους, αποτελούν μία από τις κύριες προκλήσεις του δικτύου αισθητήρων. Το έργο αυτό είναι δύσκολο γιατί υπάρχουν πάρα πολλοί τύποι αισθητήρων με διαφορετικές ιδιότητες όπως η resolution, το κόστος, η ακρίβεια, το μέγεθος και η κατανάλωση ισχύος. Αντιθέτως, συχνά, περισσότεροι τους ενός αισθητήρα χρειάζονται να διασφαλίσουν την ακρίβεια των λειτουργιών και πληροφοριών από έναν διαφορετικό αισθητήρα που πιθανόν να συνδέεται. Άλλη πρόκληση είναι να επιλεγεί ο σωστός τύπος αισθητήρων και ο τρόπος λειτουργίας τους. Η πηγή δυσκολίας είναι η αλληλεπίδραση των αισθητήρων π.χ. θεωρείστε τον υπολογισμό της απόστασης, χρησιμοποιώντας ακουστικούς αισθητήρες. Αφού η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος, είναι απαραίτητο να παρθούν μετρήσεις και για τα δύο προκειμένου να πάρουμε την ακριβή απόσταση. Επίσης υπάρχουν κάποια άλλα έργα σχεδιασμού που συνδέονται με τους αισθητήρες και συμπεριλαμβάνουν σφάλμα ανοχής, λάθος ελέγχου, λειτουργίες επαναφοράς και χρόνο συγχρονισμού.

## 2.12 Πομποδέκτες

Οι πομποδέκτες ως συστατικά επικοινωνίας είναι αναμφισβήτητα σημαντικοί γιατί ο προϋπολογισμός ενέργειας που αφιερώνεται στην αποστολή και λήψη μηνυμάτων συνήθως καλύπτει όλο το μπάτζετ ενέργειας. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και επιλογής των πομποδεκτών, ένας πρέπει να συγκεντρωθεί σε τουλάχιστον τρία διαφορετικά στρώματα: φυσικό, MAC και δικτύου. Το φυσικό στρώμα χειρίζεται την επικοινωνία μεταξύ των πομπών και δικτύων, παρά το γεγονός της εγκατάστασης των φυσικών δεσμών. Τα κύρια έργα συνδέουν την αλλοίωση σήματος και κωδικοποίηση πληροφορίας, έτσι ώστε οι δέκτες να μπορούν να αποκωδικοποιήσουν τα παραληφθέντα μηνύματα παρουσία των καναλιών θορύβου και παρεμβολών. Προκειμένου να πετύχει η χρήση του εύρους ζώνης συχνοτήτων και κατά κάποιο τρόπο η μείωση του αναπτυγμένου κόστους, συχνά κάποιοι πομποδέκτες πρέπει να μοιράζονται το ίδιο συνδεδεμένο μέσο. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει η ανάγκη για coordinated access policy. Αυτό είναι ένα έργο το οποίο επιλύεται στο στρώμα MAC. Τέλος, το

στρώμα δικτύου είναι υπεύθυνο για την εύρεση μονοπατιού από το οποίο πρέπει να περάσει το μήνυμα στους κόμβους του δικτύου προκειμένου να ταξιδέψει από την πηγή στον προορισμό. Ο σχεδιασμός πομποδέκτη είναι μία μεγάλη επίτευξη των σημερινών ερευνών. Κατά κάποιο τρόπο, η αρχιτεκτονική του πομποδέκτη συγκρούεται με την δομή του δικτύου και τα πρωτόκολλα. Η κύρια ανταλλαγή είναι μεταξύ του σχετικού κόστους ενέργειας μετάδοσης και λήψης. Η βασική παρατήρηση είναι ότι η ακοή του καναλιού είναι ακριβή. Γι' αυτό, χρειάζεται να υιοθετήσουμε τρόπους χρήσης των κόμβων και του δικτύου, οι οποίοι θα καθιστούν ικανές περιόδους μακράς σιγής για τους δέκτες. Για παράδειγμα, μία επιλογή είναι να χρησιμοποιήσουμε *coordinated policy* για να αποφασιστεί ποιός κόμβος θα συνεχίσει να "κοιμάται" ενώ η συνδετικότητα στον κόμβο θα διατηρείται. Η άλλη επιλογή είναι η χρησιμοποίηση δύο πομποδεκτών. Ένας από αυτούς είναι υπεύθυνος για λήψη πληροφορίας και δαπανά πολλή ισχύ. Χρησιμοποιείται μόνο όταν ο άλλος ο πολύ χαμηλός πομποδέκτης επικαλείται αυτό. Ο πολύ χαμηλός πομποδέκτης ισχύος χρησιμοποιείται μόνο για να ερευνήσει εάν κάποιος θέλει να μεταδώσει πληροφορίες στον κόμβο.

### 2.13 Κόμβος Δικτύου αισθητήρων

Οι απόψεις της αρχιτεκτονικής παρουσιάζονται μέσα από τις τρεις οδούς: hardware, λογισμικό & middleware, ενώ ο σχεδιασμός, παρουσιάζεται από τη σύνθεση και την ανάλυση των σημείων. Έχουν υπάρξει τρεις τουλάχιστον κύριες κατευθύνσεις κατά τις οποίες οι αρχιτεκτονικές των κόμβων δικτύων αισθητήρων έχουν απευθυνθεί. Το πρώτο group προσπαθειών είναι ένας αριθμός σχεδιασμού ξεχωριστών αισθητήρων κόμβων. Η έμφαση σε αυτή την προσπάθεια, έγινε στη διασφάλιση της δημιουργίας πρωτοτύπου εργασίας και σε μερικές περιπτώσεις στην αρχή της τέχνης των ξεχωριστών συστατικών. Το δεύτερο group παρουσιάστηκε από το TinyOS group. Ήταν η πρώτη προσπάθεια που επιχείρησε να απευθύνει ανταλλαγές μεταξύ σημαντικών συστατικών του κόμβου με την ανάπτυξη νέου OS και η τελική προσπάθεια επικεντρώνεται στον αισθητήρα. Η έμφαση είναι στην εκμετάλλευση συγγενικών, μη δαπανηρών, συστατικών σχετικά με την ενέργεια, προκειμένου να μειώσει την επικοινωνία, την κατανάλωση ενέργειας, τόσο καλά, έτσι ώστε να οδηγήσει και να εκμεταλλευτεί ποιοτικές ανταλλαγές μεταξύ στοιχείων κόμβων και των καθ' αυτών αισθητήρων. Είναι δύσκολο να προβλέψουμε τεχνολογικές εξελίξεις αλλά μπορείς εύκολα να αναγνωρίσεις μερικές συγκρουόμενες έρευνες, για παράδειγμα είναι φαινόμενο ότι χρειάζονται ισορροπημένες αρχιτεκτονικές για την ολική κατανάλωση ενέργειας. Άλλη σύγκρουση είναι η οργάνωση αισθητήρων και η ανάπτυξη της επιφάνειας, του κενού μεταξύ συστατικών. Τέλος εξαιτίας της μυστικότητας, της ασφάλειας και των αναγκών αυθεντικότητας, τεχνικές όπως η μοναδική ID για το CPU και τα άλλα συστατικά θα μπορούσαν να είναι υψηλής σημασίας.

Στο software η κύρια έμφαση θα είναι στο πραγματικό χρόνο λειτουργίας συστήματος (RTOS). Υπάρχει η ανάγκη για ακραία επιθετική και χαμηλής ισχύος διοίκηση, εξαιτίας των αναγκών ενέργειας. Επίσης υπάρχει η ανάγκη για περιεκτική πηγή λογαριασμού, εξαιτίας των απαιτήσεων για μυστικότητα και ασφάλεια που υποστηρίζουν επίσης την ευκινησία λειτουργιών (π.χ. εύρεση τοποθεσιών).

Το middleware, είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη νέων εφαρμογών. Έργα όπως το φιλτράρισμα πληροφορίας των αισθητήρων, συμπίεση, επεξεργασία πληροφορίας αισθητήρα, η έρευνα πληροφορίας του αισθητήρα και η ασφάλεια έκθεσης καθώς και αναζήτησης θα είναι πανταχού παρών.



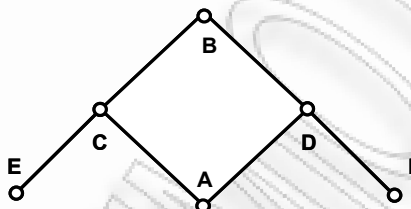
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°

### ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

#### 3.1 Ενεργειακά βέλτιστη δρομολόγηση

Οι παραδοσιακοί ad-hoc αλγόριθμοι δρομολόγησης εστιάζουν στην αποφυγή συμφόρησης ή στην διατήρηση της συνδετικότητας όταν αντιμετωπίζουν κινητικότητα [2]. Δεν λαμβάνουν υπόψη τους την περιορισμένη ενέργεια των συσκευών του δικτύου. Το παράδειγμα της εικόνας 13 δείχνει πως η περιορισμένη ενέργεια τροποποιεί το θέμα δρομολόγησης. Οι κόμβοι A και E αρχικά στέλνουν 50 πακέτα στον B. Μετά από λίγο ο F στέλνει 100 πακέτα στον B. Από άποψη ισορροπίας φορτίου τα προτεινόμενα δρομολόγια είναι τα ADB, ECB και FDB αντίστοιχα.

Εντούτοις, όταν οι κόμβοι είναι ενεργειακά περιορισμένοι όπως ότι μπορούν να στείλουν μόνο 100 πακέτα, αυτά τα δρομολόγια δεν είναι πλέον βέλτιστα. Πράγματι, ο D θα είχε χρησιμοποιήσει 50% της ενέργειάς του πριν μπορέσει να προωθήσει πακέτα από τον F στον B. Σε αυτήν την περίπτωση όλα τα πακέτα θα είχαν παραδοθεί με την χρησιμοποίηση των δρομολογίων ACB, ECB και FDB. Αν αντί του F, ο κόμβος C είχε γίνει ενεργός, ο A θα είχε χρησιμοποιήσει το αρχικό δρομολόγιο ADB.



Εικόνα 13: Φόρτος έναντι ενέργειας κατευθυνόμενη δρομολόγηση [3]

Αυτή η απλή μελέτη περίπτωσης δίνει έμφαση στην ακόλουθη κρίσιμη παρατήρηση: ο βέλτιστος σχεδιασμός κυκλοφορίας στα ενεργειακά περιορισμένα δίκτυα απαιτεί μελλοντική γνώση. Στο παράδειγμά μας, ένας μέγιστος αριθμός πακέτων μπορεί να φθάσει στο B μόνο εάν ευθύς εξαρχής ξέρουμε ακριβώς πότε (και ποιοι) κόμβοι θα παράγουν κυκλοφορία στο μέλλον.

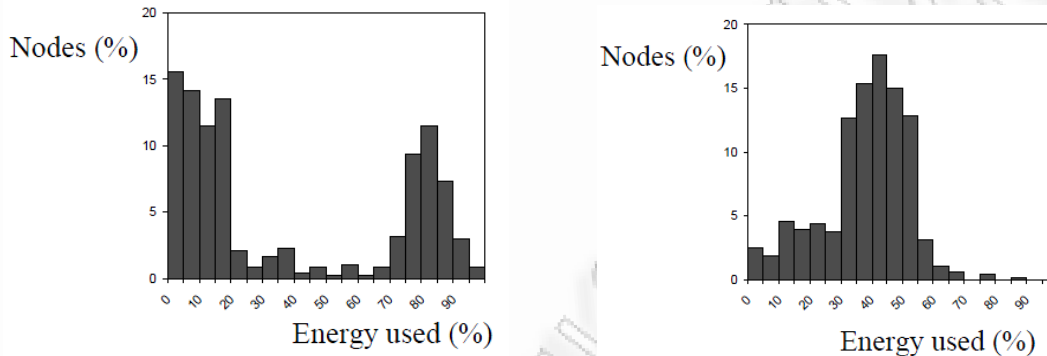
#### 3.2 Ενεργειακά ενήμερη δρομολόγηση (Energy Efficient Routing)

Ιδανικά, θα επιθυμούσαμε το δίκτυο αισθητήρων να εκτελεί τη λειτουργία του όσο είναι δυνατόν περισσότερο. Η βέλτιστη δρομολόγηση στα ενεργειακά περιορισμένα δίκτυα δεν είναι πρακτικά εφικτή (επειδή απαιτεί τη μελλοντική γνώση). Εντούτοις, μπορούμε να μαλακώσουμε τις απαιτήσεις μας προς ένα στατιστικά βέλτιστο σχέδιο, το οποίο μεγιστοποιεί τη λειτουργία του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη όλη την πιθανή μελλοντική δραστηριότητα. Ένα σχέδιο είναι ενεργειακά αποδοτικό (σε αντίθεση με το «ενεργειακά βέλτιστο») όταν είναι στατιστικά βέλτιστο και αιτιώδης (δηλ. λαμβάνει μόνο το παρελθόν και το παρόν υπόψη).

Στις πιο πρακτικές εφαρμογές επιτήρησης ή ελέγχου, δεν θέλουμε οποιαδήποτε χασμάτα κάλυψης να αναπτυχθούν. Επομένως καθορίζουμε τη διάρκεια ζωής που θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε ως τη χειρότερη περίπτωση χρόνου π.χ. έως ότου ένας κόμβος πέφτει, αντί του μέσου χρόνου σε όλα τα σενάρια. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιθανά μελλοντικά σενάρια είναι πάρα πολύ υπολογιστικά εντατικό, ακόμη και για τις προσομοιώσεις. Είναι επομένως σίγουρα ανεφάρμοστο ως οδηγία να βασιστούν τα πρακτικά σχέδια επάνω. Η εξέταση μόνο ενός μελλοντικού σεναρίου οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 13.

### 3.3 Λογική διασποράς κυκλοφορίας (Traffic Spreading Rationale)

Για να παράγει μια πρακτική οδηγία, αρχίζουμε από την ακόλουθη παρατήρηση: οι πορείες ελάχιστων βημάτων(κόμβων) σε έναν χρήστη για διαφορετικά ρεύματα τείνουν να έχουν έναν μεγάλο αριθμό βημάτων(κόμβων) από κοινού [4]. Οι κόμβοι σε εκείνες τις πορείες πεθαίνουν πιο σύντομα και επομένως περιορίζουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Το σχήμα 14 του [3] παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό ιστόγραμμα κατανάλωσης ενέργειας σε μια ορισμένη συγκεκριμένη στιγμή. Μερικοί κόμβοι έχουν χρησιμοποιηθεί μετά βίας, ενώ άλλοι έχουν στραγγίξει σχεδόν τελείως την ενέργειά τους.



Εικόνα 14: Ανεπιθύμητο ενεργειακό ιστόγραμμα [3] Εικόνα 15: Επιθυμητό ενεργειακό διάγραμμα [3]

Δεδομένου ότι οι κόμβοι που τους τελειώνει η ενέργεια είναι πιο ευαίσθητοι να σβήσουν πιο σύντομα, έχουν γίνει κρισιμότεροι. Εάν υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι είναι εξίσου σημαντικοί, κανένας κόμβος δεν πρέπει να είναι κρισιμότερος από οποιοσδήποτε άλλον. Σε κάθε στιγμή κάθε κόμβος πρέπει επομένως να έχει χρησιμοποιήσει το σχεδόν ίδιο ποσό ενέργειας, το οποίο πρέπει επίσης να ελαχιστοποιηθεί. Το ιστόγραμμα του σχήματος 15 στο [3] είναι έτσι πιο επιθυμητό από αυτό του σχήματος 14, αν και η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι η ίδια.

Η προσπάθεια για ένα συμπαγές ενεργειακό ιστόγραμμα μεταφράζεται στην οδηγία ότι η κυκλοφορία πρέπει να είναι εξαπλωμένη στο δίκτυο όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα.

### 3.4 Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων

Η δρομολόγηση στα δίκτυα αισθητήρων είναι ιδιαίτερη λόγω διάφορων χαρακτηριστικών που τα διακρίνουν από τη σύγχρονη επικοινωνία και τα ασύρματα ad hoc δίκτυα. Κατ' αρχάς, δεν είναι δυνατό να χτιστεί ένα ενιαίο σχέδιο εξέτασης για την επέκταση του καθαρού αριθμού κόμβων αισθητήρων. Επομένως, τα κλασικά βασισμένα σε IP πρωτόκολλα δεν μπορούν να εφαρμοστούν στα δίκτυα αισθητήρων. Δεύτερον, σε αντίθεση με τα τυπικά δίκτυα επικοινωνίας σχεδόν όλες οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων απαιτούν τη ροή των ανιχνεύσιμων στοιχείων από τις πολλαπλές περιοχές (πηγές) σε έναν ιδιαίτερο προορισμό. Τρίτον, η παραγόμενη κυκλοφορία δεδομένων έχει σημαντικό πλεονασμό δεδομένου ότι, οι πολλαπλοί αισθητήρες μπορούν να παράγουν τα ίδια στοιχεία κοντά σε ένα φαινόμενο. Ο πλεονασμός δεδομένων πρέπει να επεξεργαστεί από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για να βελτιώσει τη χρησιμοποίηση ενέργειας και του εύρους ζώνης. Τέταρτο, οι κόμβοι αισθητήρων περιορίζονται στενά από την άποψη της ενέργειας μετάδοσης, της εγκατεστημένης ενέργειας, της ικανότητας επεξεργασίας και αποθήκευσης και απαιτούν έτσι προσεκτική διαχείριση πόρων.

#### 3.4.1 Ζητήματα αρχιτεκτονικής συστήματος και σχεδιασμού

Ανάλογα με την εφαρμογή, οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές και οι περιορισμοί έχουν εξεταστεί για τα δίκτυα αισθητήρων. Δεδομένου ότι η απόδοση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι στενά συνδεδεμένη με το αρχιτεκτονικό πρότυπο, σε αυτό το τμήμα προσπαθούμε να συλλάβουμε τα αρχιτεκτονικά ζητήματα και να δώσουμε έμφαση στις επιπτώσεις τους.

### 3.4.1.1 Δυναμική δικτύου

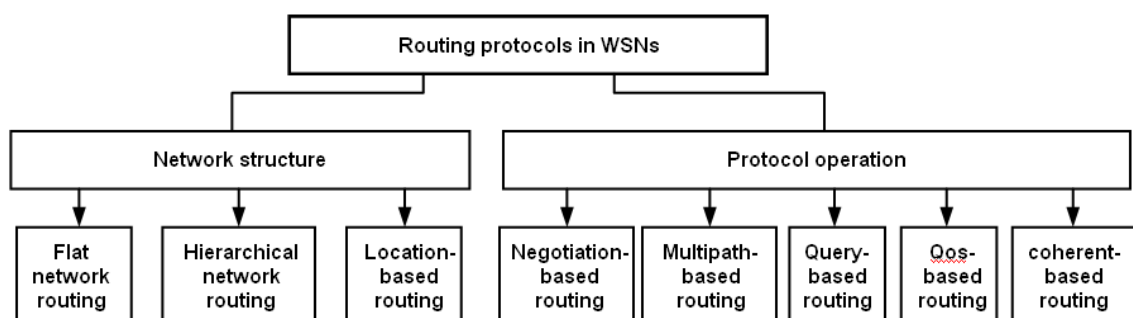
Υπάρχουν τρία κύρια συστατικά σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Αυτά είναι οι κόμβοι αισθητήρων, η δεξαμενή και τα ανιχνεύσιμα γεγονότα. Εκτός από πολύ λίγες οργανώσεις που χρησιμοποιούν τους κινητούς αισθητήρες [5], οι περισσότερες από τις δικτυακές αρχιτεκτονικές υποθέτουν ότι οι κόμβοι αισθητήρων είναι στάσιμοι. Απ' την άλλη, η υποστήριξη της κινητικότητας των δεξαμενών ή των επικεφαλής συστάδων (πύλες) κρίνεται μερικές φορές απαραίτητη [6]. Τα μηνύματα δρομολόγησης από ή προς τους κινούμενους κόμβους είναι πιο προκλητική δεδομένου ότι η σταθερότητα διαδρομών γίνεται ένας σημαντικός παράγοντας βελτιστοποίησης, εκτός από την ενέργεια, το εύρος ζώνης κ.λπ. Το ανιχνεύσιμο γεγονός μπορεί να είναι είτε δυναμικό είτε στατικό ανάλογα με την εφαρμογή [7]. Για παράδειγμα, σε μια εφαρμογή ανίχνευσης/ καταδίωξης στόχων, το γεγονός (φαινόμενο) είναι δυναμικό ενώ ο δασικός έλεγχος για την πρόωρη πρόληψη πυρκαγιάς είναι ένα παράδειγμα στατικών γεγονότων. Ο έλεγχος των στατικών γεγονότων επιτρέπει στο δίκτυο να λειτουργήσει σε έναν αντιδραστικό (παθητικό) τρόπο, παράγοντας απλά την κυκλοφορία κατά την υποβολή έκθεσης. Τα δυναμικά γεγονότα στις περισσότερες εφαρμογές απαιτούν την περιοδική υποβολή έκθεσης και παράγουν συνεπώς σημαντική κυκλοφορία που καθοδηγείται στη δεξαμενή.

### 3.4.1.2 Ανάπτυξη των κόμβων

Μια άλλη προσέγγιση είναι η τοπολογική ανάπτυξη των κόμβων. Αυτή είναι εξαρτώμενη από την εφαρμογή και έχει επιπτώσεις στην απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Η ανάπτυξη είναι είτε αιτιοκρατική (προσδιορισμένη) είτε αυτο-οργανωμένη. Στις αιτιοκρατικές καταστάσεις, οι αισθητήρες τοποθετούνται με το χέρι και τα δεδομένα καθοδηγούνται μέσω προκαθορισμένων πορειών. Εντούτοις στα αυτό-οργανωμένα συστήματα, οι κόμβοι αισθητήρων είναι διεσπαρμένοι τυχαία δημιουργώντας μια υποδομή κατά έναν ad hoc τρόπο [8–9].

## 3.4.2 Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων

Η δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες όπως αναφέρονται και στο [10]: στα πρωτόκολλα δρομολόγησης που στηρίζονται στη δομή του δικτύου και στις τεχνικές δρομολόγησης που βασίζονται στην λειτουργία του πρωτοκόλλου (εικόνα 16). Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι αρκετά ευρεία και κάτω από κάθε κατηγορία υπάρχουν εξίσου ευρείες αλλά πιο συγκεκριμένες υποκατηγορίες.



Εικόνα 16: Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων [10]

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορεί να ταξινομηθούν με βάση τη δομή του δικτύου σε επίπεδα, ιεραρχικά ή βασισμένα στη θέση.

Τα επίπεδα πρωτόκολλα είναι query-based και εξαρτώνται από την ονομασία των επιθυμητών δεδομένων, που βοηθά στην εξάλειψη πολλών περιττών μεταδόσεων. Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα στοχεύουν στη συγκέντρωση των κόμβων έτσι ώστε οι επικεφαλής συστάδων να μπορούν να κάνουν κάποια συνάθροιση και μείωση των στοιχείων προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια. Τα βασισμένα στην θέση (location based) πρωτόκολλα χρησιμοποιούν

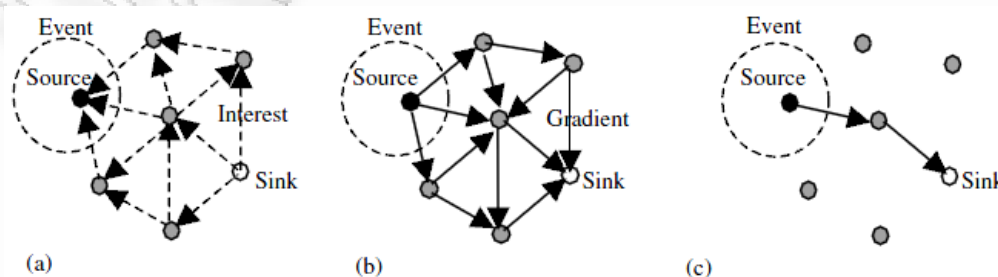
τις πληροφορίες θέσης για να αναμεταδώσουν τα στοιχεία στις επιθυμητές περιοχές παρά ολόκληρο το δίκτυο. Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τις προσεγγίσεις δρομολόγησης που είναι βασισμένες στη γενική ροή δικτύου διαμορφώνοντας και τα πρωτόκολλα που προσπαθούν για την κάλυψη μερικών απαιτήσεων QoS μαζί με τη λειτουργία δρομολόγησης.

Μια άλλη προσέγγιση για την ταξινόμηση των πρωτοκόλλων είναι ανάλογα με την λειτουργία του πρωτοκόλλου. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση τα πρωτόκολλα χωρίζονται σε πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης (negotiation-based), πολλαπλών διαδρομών (multipath-based), ερωτήσεων (query-based), ποιότητας υπηρεσίας (QoS based) και τα συμπαγή (coherent based). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα περισσότερα επίπεδα πρωτόκολλα είναι και query-based μιας και για την συλλογή των δεδομένων απαιτείται οι κόμβοι να ερωτηθούν. Τα πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης όπως το SPIN [11] χρησιμοποιούν την διαφήμιση των δεδομένων που διαθέτει ο κάθε κόμβος και ανταλλάσσουν τα δεδομένα μόνο αν κάποιος κόμβος δεν τα έχει και τα χρειάζεται. Στην περίπτωση αυτή αρχικά δεν αποστέλλονται τα δεδομένα αλλά ένα αναγνωριστικό αυτών μικρότερου μεγέθους, μειώνοντας έτσι την αποστολή των δεδομένων που είναι μεγαλύτερου όγκου. Τα multipath πρωτόκολλα χρησιμοποιούν περισσότερες του ενός διαδρομές για την αποστολή των δεδομένων με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του δικτύου, ευελιξία στην περίπτωση απώλειας κάποιου δρομολογίου και καλύτερη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας. Στα QoS based πρωτόκολλα το δίκτυο ισορροπεί μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και τις ποιότητας των δεδομένων. Τα πρωτόκολλα αυτά ικανοποιούν συγκεκριμένες παραμέτρους QoSs. Τα coherent based πρωτόκολλα θα προωθήσουν τις πληροφορίες χωρίς να πραγματοποιήσουν καμία διεργασία συμπίεσης και απώλειας των δεδομένων τοπικά.

### 3.4.3 Επίπεδα πρωτόκολλα δρομολόγησης (Flat routing protocols)

Σε πολλές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων, δεν είναι εφικτό να οριστούν αναγνωριστικά για κάθε κόμβο λόγω του μεγάλου αριθμού κόμβων που αναπτύσσονται. Τέτοια έλλειψη συνολικού προσδιορισμού μαζί με την τυχαία ανάπτυξη των κόμβων αισθητήρων γίνεται δύσκολο να επιλεγεί ένα σύνολο κόμβων για να ερωτηθούν. Επομένως, τα δεδομένα διαβιβάζονται συνήθως από κάθε κόμβο αισθητήρων μέσα στην περιοχή επέκτασης με σημαντικό πλεονασμό. Δεδομένου ότι αυτό είναι πολύ ανεπαρκές από την άποψη της κατανάλωσης ενέργειας, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που θα είναι σε θέση να επιλέξουν ένα σύνολο κόμβων αισθητήρων και να χρησιμοποιήσουν τη συνάθροιση στοιχείων κατά τη διάρκεια της αναμετάδοσης των στοιχείων έχουν ληφθεί υπόψη. Αυτή η εκτίμηση έχει οδηγήσει στην Data-centric δρομολόγηση, η οποία είναι διαφορετική από παραδοσιακή διεύθυνση-βασισμένη δρομολόγηση όπου οι διαδρομές δημιουργούνται μεταξύ των προσπελάσιμων κόμβων διαχειριζόμενη στο στρώμα δικτύου της στοίβας επικοινωνίας.

Στην data-centric δρομολόγηση η δεξαμενή στέλνει ερωτήματα σε συγκεκριμένες περιοχές και περιμένει τα δεδομένα από τους κόμβους που βρίσκονται στις συγκεκριμένες περιοχές. Δεδομένου ότι τα δεδομένα ζητούνται μέσω των ερωτήσεων, η ιδιότητα βασισμένη στην ονομασία είναι απαραίτητη για να διευκρινίσει τις ιδιότητες των στοιχείων. Ο SPIN [11] είναι ο πρώτος data-centric αλγόριθμος ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη διαπραγμάτευση δεδομένων μεταξύ των κόμβων προκειμένου να αποβληθούν τα περιττά στοιχεία και να σωθεί η ενέργεια. Αργότερα, το Directed Diffusion (εικόνα 17) έχει αναπτυχθεί και έχει γίνει μια σημαντική ανακάλυψη στην δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση. Κατόπιν, πολλά άλλα πρωτόκολλα έχουν προταθεί βασισμένα στο Directed Diffusion [12-14].



Εικόνα 17: Πρωτόκολλο Directed diffusion [12]

### 3.4.4 Ιεραρχικά πρωτόκολλα (hierarchical routing -protocols)

Παρόμοια με άλλα πρωτόκολλα επικοινωνίας η εξελιξιμότητα είναι μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες του σχεδιασμού των δικτύων αισθητήρων.

Ένα δίκτυο ενιαίας σειράς μπορεί να αναγκάσει την πύλη να υπερφορτώσει με την αύξηση της πυκνότητας των αισθητήρων. Τέτοια υπερφόρτωση μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση στην επικοινωνία και την ανεπαρκή παρακολούθηση των «γεγονότων». Επιπλέον, η αρχιτεκτονική ενιαίας σειράς δεν κλιμακώνεται για ένα μεγαλύτερο σύνολο αισθητήρων που καλύπτουν έναν ευρύτερο τομέα ενδιαφέροντος δεδομένου ότι, οι αισθητήρες δεν είναι ικανοί για επικοινωνία μεγάλης απόστασης. Για να επιτραπεί στο σύστημα να αντιμετωπίσει το πρόσθετο φορτίο και για να είναι σε θέση να καλύψει μια μεγάλη περιοχή ενδιαφέροντος χωρίς υποβάθμιση της υπηρεσίας, η ιεραρχική δικτύωση έχει ακολουθηθεί σε μερικές προσεγγίσεις δρομολόγησης.

Ο κύριος στόχος της ιεραρχικής δρομολόγησης είναι να διατηρηθεί αποτελεσματικά η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων αισθητήρων με την ανάμειξη τους στην πολυβηματική επικοινωνία μέσα σε μια ιδιαίτερη συστάδα και με την εκτέλεση της συνάθροισης και συγχώνευσης δεδομένων προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός διαβιβασθέντων μηνυμάτων στο σταθμό βάσης. Ο σχηματισμός των κόμβων βασίζεται τυπικά στην υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων και την απόστασή τους από το σταθμό βάσης. Το LEACH [15] είναι ένα από τα πρώτα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων. Η ιδέα που προτάθηκε με το LEACH ήταν έμπνευση για πολλά ιεραρχικά πρωτόκολλα αργότερα [16,17,18,19], παρόλο που κάποια πρωτόκολλα αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα [5,8]. Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα αναφέρονται εκτενέστερα παρακάτω.

### 3.4.5 Βασισμένα στη θέση πρωτόκολλα (location based protocols)

Τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα δίκτυα αισθητήρων απαιτούν πληροφορίες θέσης για τους κόμβους. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι πληροφορίες θέσης απαιτούνται προκειμένου να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ δύο ιδιαίτερων κόμβων έτσι ώστε η κατανάλωση ενέργειας να μπορεί να υπολογιστεί. Δεδομένου ότι, δεν υπάρχει κανένα σχέδιο δρομολόγησης για τα δίκτυα αισθητήρων, όπως με τις IP διευθύνσεις και αναπτύσσονται σε μια περιοχή, οι πληροφορίες θέσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δρομολόγηση των δεδομένων κατά έναν ενεργειακά ικανό τρόπο. Για παράδειγμα, εάν η περιοχή που ανιχνεύεται είναι γνωστή, χρησιμοποιώντας τη θέση των αισθητήρων, η ερώτηση μπορεί να διασκορπιστεί μόνο σε εκείνη την συγκεκριμένη περιοχή που θα μειώσει τον αριθμό μετάδοσης σημαντικά. Μερικά από τα πρωτόκολλα που συζητούνται εδώ σχεδιάζονται πρώτιστα για τα κινητά ad hoc δίκτυα και εξετάζουν την κινητικότητα των κόμβων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού [20-22]. Εντούτοις, ισχύουν επίσης και στα δίκτυα αισθητήρων όπου υπάρχει μικρή ή καθόλου κινητικότητα.

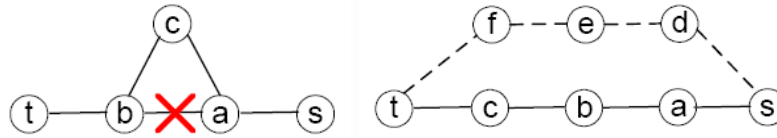
Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν άλλα βασισμένα στη θέση πρωτόκολλα που σχεδιάζονται για τα ασύρματα ad hoc δίκτυα, όπως η καρτεσιανή και η βασισμένη στην τροχιά δρομολόγηση [23]. Εντούτοις, πολλά από αυτά τα πρωτόκολλα δεν ισχύουν στα δίκτυα αισθητήρων δεδομένου ότι δεν είναι ενεργειακά ενήμερα.

### 3.4.6 Πρωτόκολλα πολλαπλών διαδρομών (multipath based protocols)

Στα ασύρματα ad hoc δίκτυα και στα δίκτυα αισθητήρων οι κόμβοι μπορούν να συνδεθούν αδύναμα ή να καταστραφούν, έτσι ώστε οι συνδέσεις να είναι ασυμμετρικές ή σπασμένες για κάποια χρονική περίοδο. Οι κόμβοι με μπαταρίες μπορούν να πεθάνουν ή να πάνε σε κατάσταση ύπνου για να εξοικονομήσουν ενέργεια. Ένα ανεκτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης ελαττωμάτων πρέπει να αναμείνει και να υπερνικήσει αυτά τα προβλήματα.

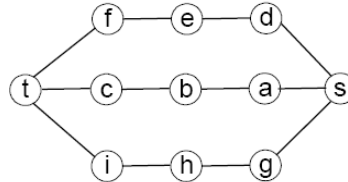
Οι μηχανισμοί δρομολόγησης ανοχής σφαλμάτων για τα ad hoc δίκτυα περιλαμβάνουν την επισκευή διαδρομών [24]. Αφού ανιχνεύσουν ένα σπάσιμο στη σύνδεση  $\alpha - \beta$ , ο κόμβος  $\alpha$  μπορεί να επισκευάσει τη διαδρομή με την εύρεση ενός άλλου κόμβου  $\gamma$  έτσι ώστε το  $\alpha - \beta$  μπορεί να αντικατασταθεί από το  $\alpha - \gamma - \beta$  όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Εάν ο κόμβος  $\alpha$  δεν μπορεί να επισκευάσει τη διαδρομή, στέλνει ένα μήνυμα λάθους στην πηγή. Εντούτοις, η

επισκευασμένη διαδρομή μπορεί να είναι sub-optimal και μετά από μόνο μερικές επισκευές, η διαδρομή μπορεί να είναι πολύ μακριά και ανεπαρκής. Δεύτερον, μπορεί να οδηγήσει σε βρόχους εκτός αν χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης πηγής (π.χ. DSR [25] [26]).



Εικόνα 18: Επισκευή διαδρομής[27]

Εικόνα 18α: Εναλλακτική δρομολόγηση[27]



Εικόνα 18β: Πλεονάζουσα δρομολόγηση[27]

Η εναλλακτική δρομολόγηση είναι ένα σχέδιο όπου η πηγή αναζητά μια πλήρης εναλλακτική διαδρομή μετά από μια αποτυχία [24]. Όπως φαίνεται στην εικόνα 18α, εάν η λειτουργούσα διαδρομή (ευθεία γραμμή) είναι σπασμένη, η πηγή λαμβάνει την ανακοίνωση της απρόσιτης διαδρομής από τους ενδιάμεσους κόμβους και καθιερώνει μια νέα διαδρομή (διακεκομμένη γραμμή). Αν και συγκρίνοντας με την επισκευή διαδρομών η νέα πορεία είναι βέλτιστη, η καθιέρωση της πορείας απαιτεί ακόμα περισσότερο χρόνο και overhead. Βασικά το AODV [28] και το DSR [25] [26] πρωτόκολλα χρησιμοποιούν αυτό το σχέδιο.

Η πλεονάζουσα δρομολόγηση καθιερώνει τις εναλλασσόμενες πορείες προτού να συμβεί η αποτυχία [24]. Στην εικόνα 18β, οι πολλαπλάσιες πορείες δημιουργούνται μεταξύ της πηγής s και του προορισμού t. Έναντι της εναλλακτικής δρομολόγησης, αυτή η προσέγγιση είναι σε θέση να μειώσει τα γενικά έξοδα μετακίνησης από την εύρεση πολλαπλάσιων πορειών συγχρόνως (αποκαλούμενος στη λογοτεχνία «πολλαπλών διαδρομών δρομολόγηση») είναι φτηνότερες από να βρεθούν μία – μία. Επίσης η καθυστέρηση μετακίνησης είναι μικρότερη δεδομένου ότι η εναλλακτική πορεία είναι διαθέσιμη προτού να συμβεί η αποτυχία. Αλλά οι πολλαπλάσιες πορείες που έχουν την ίδια ηλικία μπορούν να είναι ομοίως αναξιόπιστες συγχρόνως για ένα κινητό δίκτυο.

Η προληπτική δρομολόγηση προτεινόμενη στο [29] μπορεί να βελτιώσει την εναλλακτική δρομολόγηση με την ανακάλυψη μιας εναλλακτικής πορείας πριν από τα σπασίματα των λειτουργούντων πορειών. Όταν μια πορεία είναι πιθανό να σπαστεί, ένα μήνυμα προειδοποίησης στέλνεται στην πηγή που δείχνει την πιθανότητα μιας αποσύνδεσης. Η πηγή αρχίζει έπειτα την ανακάλυψη πορειών νωρίς, ενδεχομένως αποφεύγοντας την αποσύνδεση συνολικά. Με την εναλλακτική δρομολόγηση, όταν εμφανίζεται ένα σπάσιμο πορειών, η συνδετικότητα της ροής διακόπτεται και μια καθυστέρηση ανταλλαγής βιώνεται από τα πακέτα που είναι έτοιμα να σταλούν. Η προληπτική δρομολόγηση μεταστρέφει μια κυκλοφοριακή ροή σε μια εναλλακτική καλή πορεία πριν από ένα σπάσιμο, που ελαχιστοποιεί και τη λανθάνουσα κατάσταση και το jitter. Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται στα κυψελοειδή δίκτυα, όπως η ισχύς του σήματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προκαλέσουν την ανακάλυψη πορειών. Άλλα κριτήρια προειδοποίησης όπως η θέση ή η ταχύτητα και η συμφόρηση μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως πλεονάζουσα ώθηση [29]. Αυτό το σχέδιο μπορεί να αυξήσει τα γενικά έξοδα δρομολόγησης των εναλλακτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης δεδομένου ότι μερικές ανακαλύψεις πορειών πραγματοποιούνται αντιδραστικά.

Το Neighbourhood aware Source Routing (NSR) [30] μειώνει την προσπάθεια που απαιτείται για να καθορίσει τις λειτουργούσες διαδρομές με τη χρησιμοποίηση των εναλλακτικών διαθέσιμων συνδέσεων στη γειτονιά 2-βημάτων των κόμβων. Οι πληροφορίες γειτονιάς 2-βημάτων διατηρούνται ανταλλάσσοντας τις καταστάσεις σύνδεσης πληροφορίες μεταξύ των γειτονικών κόμβων παθητικά. Η καθυστέρηση επισκευής μπορεί να ανακουφιστεί δεδομένου ότι οι εναλλακτικές συνδέσεις είναι γνωστές προτού να εμφανιστεί η αποτυχία. Φυσικά, επιπλέον φόρτος απαιτείται για να διατηρήσει τις δυναμικές κρατικές αναπροσαρμογές συνδέσεων δύο-βημάτων.

Οι τεχνικές που αναφέρονται παραπάνω είναι παραδείγματα της πολλαπλών διαδρομών δρομολόγησης. Σε κάθε περίπτωση, όπως είναι κοινό για τα ad hoc δίκτυα, ένα συνολικό σύστημα ID υποτίθεται έτσι ώστε κάθε κόμβος έχει μια μοναδική ταυτότητα και οι διαφορετικές πορείες μπορούν να αναγνωριστούν εύκολα. Εντούτοις, αυτό μπορεί να μην συμβεί σε ένα δίκτυο αισθητήρων.

### 3.4.7 Πρωτόκολλα ερωτήσεων (query based protocols)

Σε αυτό το είδος δρομολόγησης, οι κόμβοι προορισμού διαδίδουν μέσω του δικτύου ένα αίτημα για δεδομένα από έναν κόμβο και ο κόμβος που μπορεί να απαντήσει στο αίτημα στέλνει τα δεδομένα πίσω σε αυτόν που τα ζήτησε. Όλοι οι κόμβοι έχουν πίνακες που αποτελούνται από αιτήματα για κάποια εργασία που τους έχει ζητηθεί και στέλνουν τα δεδομένα όταν τα λάβουν. Μια άλλη προσέγγιση σε αυτή την κατηγορία είναι η χρησιμοποίηση αντιπροσώπων μακράς διάρκειας ζωής για να δημιουργούν μονοπάτια που κατευθύνουν προς γεγονότα που ανιχνεύουν. Κάθε κόμβος διατηρεί μια λίστα με τους γείτονές του και έναν πίνακα με γεγονότα που ανανεώνονται κάθε φορά που περνάει ένας αντιπρόσωπος. Κάθε κόμβος που ανιχνεύει ένα γεγονός μπορεί να παράγει πιθανοτικά έναν αντιπρόσωπο ο οποίος έχει ένα αντίγραφο του πίνακα γεγονότων του και συγχρονίζεται με κάθε κόμβο που επισκέπτεται. Ένας κόμβος μεταδίδει ένα αίτημα αρχικά σε τυχαία κατεύθυνση και μόλις αυτό εντοπίσει κάποιον από τους κόμβους που διαθέτει ανάλογες πληροφορίες στον πίνακα γεγονότων του ακολουθεί τη διαδρομή με βάση τον πίνακα για να φτάσει επιθυμητό κόμβο.

### 3.4.8 Πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης (negotiation based protocols)

Τα πρωτόκολλα αυτά χρησιμοποιούν υψηλού επιπέδου περιγραφείς δεδομένων με στόχο να εξαλείψουν τις περιπτές μεταδόσεις για διαπραγμάτευση. Οι επικοινωνιακές αποφάσεις λαμβάνονται με βάση τους πόρους που έχουν. Τα πρωτόκολλα της οικογένειας SPIN [6] και τα πρωτόκολλα που αναφέρονται στο [13] είναι παραδείγματα της κατηγορίας αυτής. Το κίνητρο είναι ότι η χρήση του flooding για την διασπορά των δεδομένων στο δίκτυο θα προκαλέσει υπερβολική παραγωγή και επικάλυψη των δεδομένων και επομένως οι κόμβοι θα λάβουν διπλά και τριπλά πακέτα με τα ίδια δεδομένα. Αυτή η λειτουργία καταναλώνει πάρα πολύ ενέργεια και υπολογιστική ισχύ. Τα πρωτόκολλα SPIN είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να διασπείρουν τα δεδομένα από τον έναν κόμβο στον άλλο θεωρώντας ότι κάθε κόμβος είναι σταθμός βάσης. Συνεπώς, η κεντρική ιδέα της negotiation-based δρομολόγησης είναι να μειώσει την διπλασιασμένη πληροφορία διεξάγοντας μια σειρά από μηνύματα διαπραγμάτευσης πριν τα πραγματικά δεδομένα σταλούν.

### 3.4.9 Πρωτόκολλα με ποιότητα υπηρεσίας (QoS based protocols)

Στην κατηγορία αυτή το δίκτυο έχει να ισορροπήσει μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και ποιότητας των δεδομένων. Συγκεκριμένα το δίκτυο πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένες παραμέτρους του Quality of Service (καθυστερήση, ενέργεια, εύρος ζώνης κτλ.) όποτε παραδίδει δεδομένα στον σταθμό βάσης.

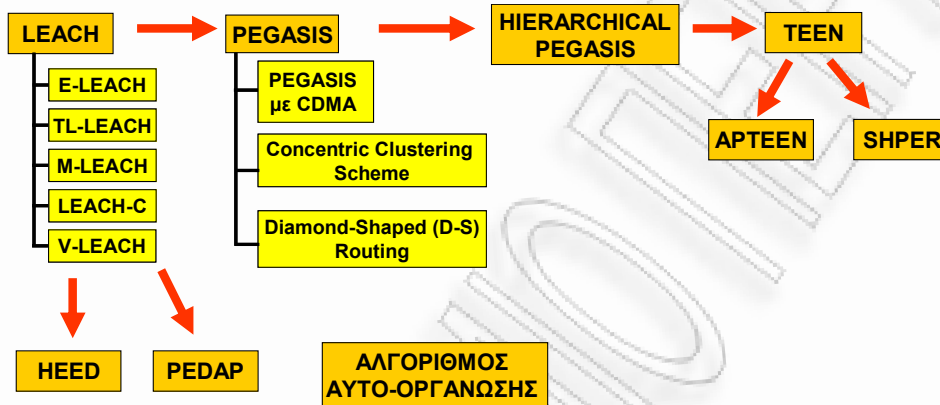
Το πρωτόκολλο SAR (Sequential Assignment Routing) [31] είναι από τα πρώτα πρωτόκολλα δρομολόγησης για WSNs που εισάγουν την έννοια του QoS στις αποφάσεις δρομολόγησης. Μια απόφαση δρομολόγησης εξαρτάται ήδη από τρεις παράγοντες: ενεργειακοί πόροι, QoS σε κάθε μονοπάτι και η προτεραιότητα κάθε πακέτου. Χρησιμοποιείται multipath προσέγγιση για να αποφευχθεί η αποτυχία ενός μόνου μονοπατιού, φτιάχνεται δηλαδή ένα δένδρο από τον κόμβο πηγή έως τους κόμβους προορισμού (τους σταθμούς βάσης). Τα μονοπάτια αυτού του δένδρου φτιάχνονται αποφεύγοντας κόμβους με χαμηλή ενέργεια ή χαμηλή εγγύηση QoS. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας κάθε κόμβος θα είναι μέρος του multipath tree. Ένα άλλο πρωτόκολλο της κατηγορίας αυτής είναι το SPEED που παρέχει εγγυήσεις ελαστικού πραγματικού χρόνου και από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση [32]. Το πρωτόκολλο απαιτεί κάθε κόμβος να διατηρεί πληροφορίες για τους γείτονες του και χρησιμοποιεί γεωγραφικό forwarding.

### 3.4.10 Συμπαγή Πρωτόκολλα (coherent based protocols)

Στα ασύρματα ad hoc δίκτυα και στα δίκτυα αισθητήρων οι κόμβοι μπορούν να συνδεθούν αδύναμα ή να καταστραφούν, έτσι ώστε οι συνδέσεις να είναι ασυμμετρικές ή σπασμένες για κάποια χρονική περίοδο. Οι κόμβοι με μπαταρίες μπορούν να πεθάνουν ή να πάνε σε κατάσταση ύπνου για να σώσουν ενέργεια. Ένα ανεκτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης ελαττωμάτων πρέπει να αναμείνει και να υπερνικήσει αυτά τα προβλήματα.

## 3.5 Ιεραρχικά πρωτόκολλα

Στην εικόνα 19 παρουσιάζονται τα πρωτόκολλα ιεραρχικής δρομολόγησης και οι επιρροές τους από τα προηγούμενα. Αναλυτικότερα τα πρωτόκολλα παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 19: Ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

### 3.5.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Το LEACH [15] είναι ένα πρωτόκολλο βασισμένο σε συστάδες που ελαχιστοποιεί την ενεργειακή κατανάλωση στα δίκτυα αισθητήρων. Τα κύρια χαρακτηριστικά του LEACH είναι:

- Τοπικός συντονισμός και έλεγχος για την οργάνωση και τη λειτουργία των συστάδων.
- Τυχαία περιστροφή «σταθμών βάσης» της συστάδας ή «επικεφαλής-συστάδας» και οι αντίστοιχες συστάδες.
- Τοπική συμπίεση για μείωση της συνολικής επικοινωνίας.

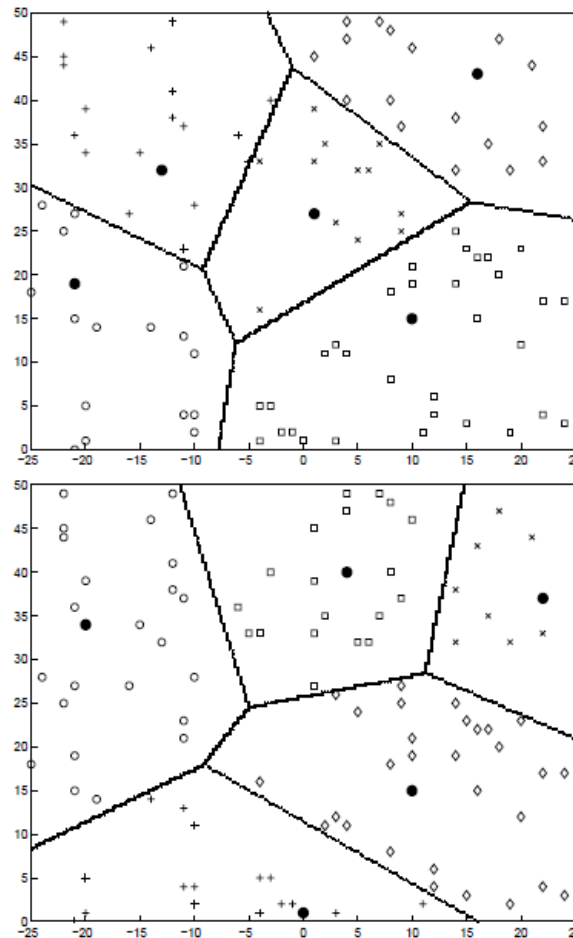
Η χρήση των συστάδων για τη διαβίβαση των δεδομένων στους σταθμούς βάσης αυξάνει τα πλεονεκτήματα των μικρών αποστάσεων μετάδοσης για τους περισσότερους κόμβους, απαιτώντας μόνο μερικούς κόμβους να διαβιβάσουν σε μακρινές αποστάσεις στους σταθμούς βάσης. Πράγματι, το LEACH ξεπερνά τους κλασσικούς αλγορίθμους συγκέντρωσης με τη χρησιμοποίηση προσαρμοστικών συστάδων και την περιστροφή των επικεφαλής συστάδων, επιτρέποντας τις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος να διανεμηθούν μεταξύ όλων των αισθητήρων. Επιπλέον, το LEACH είναι σε θέση να εκτελέσει τοπικό υπολογισμό σε κάθε συστάδα για να μειώσει το ποσό δεδομένων που πρέπει να διαβιβαστεί στο σταθμό βάσης. Αυτό επιτυγχάνει μια μεγάλη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, δεδομένου ότι ο υπολογισμός είναι πολύ φτηνότερος από την επικοινωνία.

Το LEACH είναι ένα αυτό-οργανωμένο, προσαρμοστικό πρωτόκολλο συστάδων που χρησιμοποιεί την τυχαίοποίηση για να διανείμει το ενεργειακό φορτίο ομοιόμορφα μεταξύ των αισθητήρων στο δίκτυο. Στο LEACH, οι κόμβοι οργανώνονται σε τοπικές συστάδες, με έναν κόμβο ενεργώντας ως «τοπικό σταθμός βάσης» ή «επικεφαλής συστάδας». Εάν οι επικεφαλής συστάδων επιλεγούν a priori και καθοριστούν για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος, όπως στους συμβατικούς αλγορίθμους συστάδας, είναι εύκολο να δει κανείς ότι οι άτυχοι αισθητήρες που επιλέγονται για να είναι επικεφαλής συστάδων θα πέθαιναν γρήγορα, τελειώνοντας τη χρήσιμη διάρκεια ζωής όλων των κόμβων που ανήκουν σε εκείνες τις συστάδες. Κατά συνέπεια το LEACH περιλαμβάνει την τυχαία περιστροφή της θέσης του επικεφαλής συστάδας που είναι υψηλής κατανάλωσης ενέργειας έτσι ώστε να περιστρέφεται μεταξύ των διάφορων αισθητήρων,



προκειμένου να μην στραγγιχτεί η μπαταρία ενός μόνο αισθητήρα. Επιπλέον, το LEACH εκτελεί τοπική συγκέντρωση στοιχείων για «να συμπιέσει» το ποσό δεδομένων που στέλνονται από τις συστάδες στο σταθμό βάσης, μειώνοντας περαιτέρω την ενεργειακή κατανάλωση και την ενίσχυση της διάρκειας ζωής του συστήματος.

Οι αισθητήρες εκλέγονται από μόνοι τους να είναι τοπικοί επικεφαλής συστάδας οποιαδήποτε στιγμή με μια ορισμένη πιθανότητα. Αυτοί οι επικεφαλής συστάδων εκπέμπουν την κατάσταση τους στους άλλους αισθητήρες στο δίκτυο. Κάθε κόμβος καθορίζει σε ποια συστάδα θέλει να ανήκει με την επιλογή του επικεφαλής συστάδας που απαιτεί την ελάχιστη ενέργεια επικοινωνίας. Μόλις οργανωθούν όλοι οι κόμβοι στις συστάδες, κάθε επικεφαλής συστάδας δημιουργεί ένα πρόγραμμα TDMA για τους κόμβους στη συστάδα του.



**Εικόνα 20: Δυναμικές συστάδες: (α) επικεφαλής κόμβοι συστάδων = C την χρονική στιγμή  $t_1$ . (β) επικεφαλής κόμβοι συστάδων = C την χρονική στιγμή  $t_1+d$ . Όλοι οι κόμβοι που μαρκάρονται με το ίδιο σύμβολο ανήκουν στην ίδια συστάδα, και οι επικεφαλής κόμβοι συστάδων είναι μαρκαρισμένοι με • [15]**

Αυτό επιτρέπει στα συστήματα εκπομπής κάθε μη επικεφαλής συστάδας κόμβου να κλείνουν εκτός από τη διάρκεια του χρόνου μετάδοσής τους, ελαχιστοποιώντας κατά συνέπεια την ενέργεια που καταναλώνεται στους μεμονωμένους αισθητήρες. Όταν ο επικεφαλής συστάδας έχει όλα τα δεδομένα από τους κόμβους στη συστάδα του, τα αθροίζει και διαβιβάζει έπειτα τα συμπιεσμένα δεδομένα στο σταθμό βάσης. Δεδομένου ότι ο σταθμός βάσης είναι μακριά, αυτό είναι μια υψηλής ενέργειας μετάδοση. Παρόλα αυτά, μιας και υπάρχουν μόνο λίγοι επικεφαλής συστάδας, επηρεάζει μόνο ένα μικρό αριθμό κόμβων.

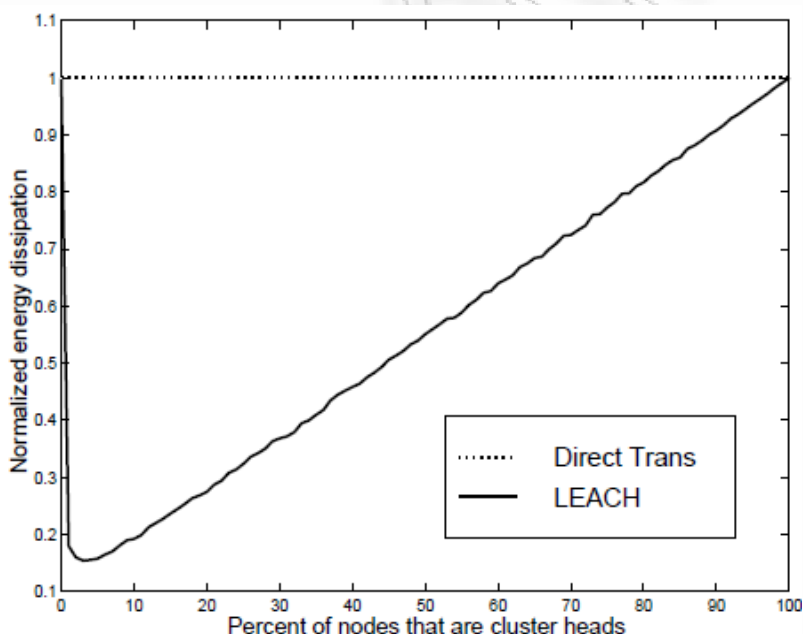
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ύπαρξη ενός επικεφαλής συστάδας στραγγίζει την μπαταρία εκείνου του κόμβου. Προκειμένου να διαδοθεί αυτή η ενεργειακή χρήση στους πολλούς κόμβους, οι επικεφαλής συστάδας κόμβοι δεν καθορίζονται. Αυτή η θέση είναι αυτο-επιλεγόμενη σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Κατά συνέπεια ένα σύνολο C κόμβων μπορεί να εκλεχτεί από μόνο του επικεφαλής συστάδας στο χρονικό  $t_1$ , αλλά στο χρόνο  $t_1+d$  ένα νέο

σύνολο CO κόμβων εκλέγεται από μόνο του ως επικεφαλής συστάδας, όπως φαίνεται στην εικόνα 17. Κάθε κόμβος λαμβάνει την απόφασή του εάν θα είναι ένας επικεφαλής συστάδας ανεξάρτητα από τους άλλους κόμβους στο δίκτυο και έτσι καμία πρόσθετη διαπραγμάτευση δεν απαιτείται για να αποφασίσει τους επικεφαλής συστάδας.

Το σύστημα μπορεί να καθορίσει, a priori, το βέλτιστο αριθμό συστάδων του συστήματος. Αυτό θα εξαρτηθεί από διάφορες παραμέτρους, όπως η τοπολογία δικτύου και οι σχετικές δαπάνες υπολογισμού εναντίον της επικοινωνίας. Προσομοίωση του πρωτοκόλλου LEACH για το τυχαίο δίκτυο παρουσιάζεται στην εικόνα 20 του [15] χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους εκπομπής του πίνακα 1 και ένα κόστος υπολογισμού 5 nJ/bit/message για να συγχωνεύσει 2000 bit μηνύματα αλλάζοντας το ποσοστό των συνολικών κόμβων που είναι επικεφαλής συστάδας.

Λειτουργία	Κατανάλωση ενέργειας
Ηλεκτρονικά εκπομπής ( $E_{Tx - elec}$ )	50 nJ/bit
Ηλεκτρονικά λήψης ( $E_{Rx - elec}$ ) ( $E_{Tx - elec} = E_{Rx - elec} = E_{elec}$ )	
Ενίσχυση εκπομπής ( $E_{amp}$ )	100 pJ/bit/m <sup>2</sup>

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά εκπομπής [15]

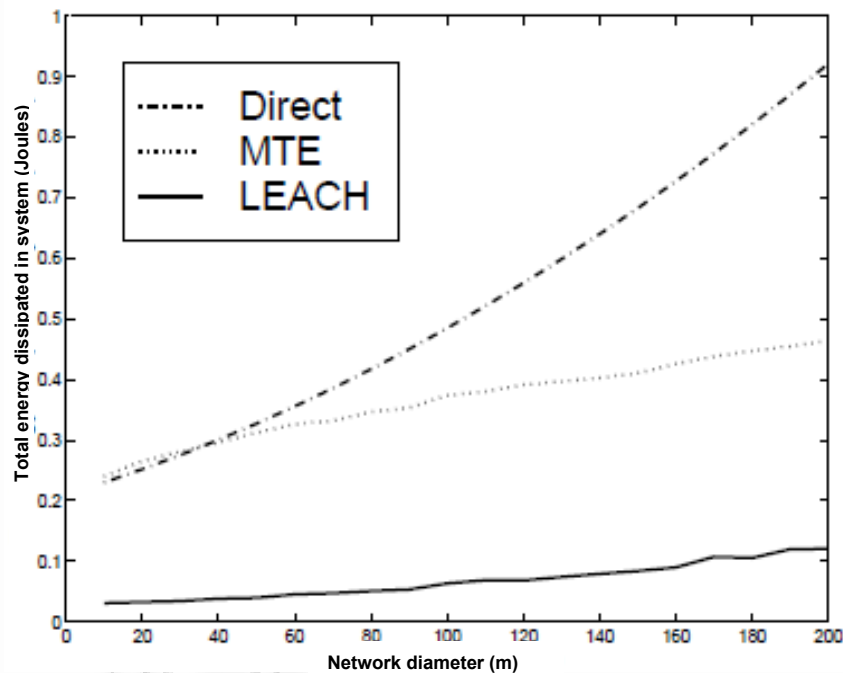


Εικόνα 21: Η ομαλοποιημένη συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος προς το ποσοστό των κόμβων που είναι επικεφαλής συστάδας..[15]

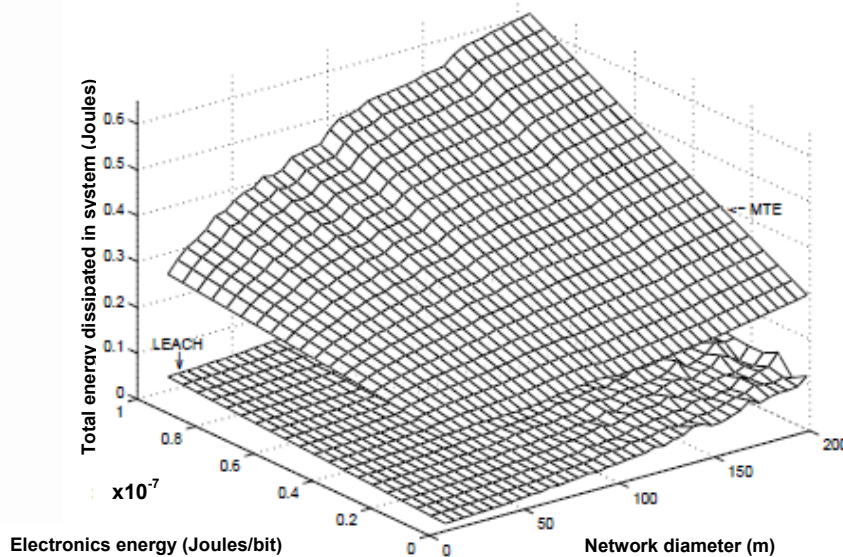
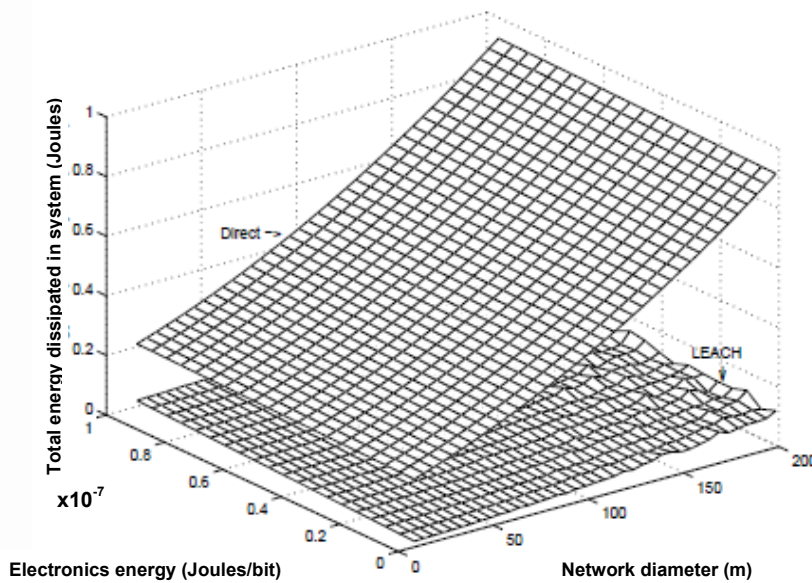
Η εικόνα 21 επιδεικνύει πώς η ενεργειακή κατανάλωση στο σύστημα ποικίλλει καθώς το ποσοστό των κόμβων που είναι επικεφαλής συστάδας αλλάζει. Σημειώστε ότι η άμεση μετάδοση είναι ισοδύναμη με 0% των κόμβων που είναι επικεφαλής συστάδας ή όλους τους κόμβους (100%) που είναι επικεφαλής συστάδας. Από αυτήν την παράσταση, διαπιστώνουμε ότι υπάρχει ένα βέλτιστο ποσοστό κόμβων  $N^*$  που πρέπει να είναι επικεφαλής συστάδας. Εάν υπάρχουν λιγότεροι από  $N^*$  επικεφαλής συστάδας, μερικοί κόμβοι στο δίκτυο πρέπει να διαβιβάσουν τα στοιχεία τους πολύ μακριά για να φθάσουν στον επικεφαλής συστάδας, αναγκάζοντας τη συνολική ενέργεια στο σύστημα να είναι μεγάλη. Εάν υπάρχουν περισσότεροι από  $N^*$  επικεφαλής συστάδας, η απόσταση που οι κόμβοι πρέπει να διαβιβάσουν για να φθάσουν στον κινητό επικεφαλής συστάδας δεν μειώνεται ουσιαστικά, υπάρχουν όμως περισσότεροι επικεφαλής συστάδας που πρέπει να διαβιβάσουν τα στοιχεία σε μεγάλες αποστάσεις στο σταθμό βάσης, και υπάρχει λιγότερη συμπίεση που εκτελείται τοπικά. Για τις παραμέτρους του συστήματος και την τοπολογία που αναφέρεται στο [15],  $N^* = 5\%$ .

Η εικόνα 22 επίσης δείχνει ότι το LEACH μπορεί να επιτύχει έναν παράγοντα 7 στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης έναντι της άμεσης επικοινωνίας με το σταθμό βάσης, κατά την χρησιμοποίηση του βέλτιστου αριθμού επικεφαλής συστάδας. Η κύρια αποταμίευση ενέργειας του πρωτοκόλλου LEACH οφείλεται στο συνδυασμό της συμπίεσης με απώλειες και της δρομολόγησης δεδομένων. Υπάρχει σαφώς μια ανταλλαγή μεταξύ της ποιότητας των συμπιεσμένων δεδομένων και του ποσού της συμπίεσης που πραγματοποιείται. Σε αυτήν την περίπτωση, κάποια δεδομένα από τα μεμονωμένα σήματα χάνονται, αλλά αυτό οδηγεί σε μια ουσιαστική μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος.

Η προσομοίωση του LEACH (με 5% των κόμβων να είναι επικεφαλής συστάδας) έγινε χρησιμοποιώντας MATLAB με το τυχαίο δίκτυο που παρουσιάστηκε στην εικόνα 20. Η εικόνα 22 του [15] επιδεικνύει πώς αυτοί οι αλγόριθμοι συγκρίνονται με τη χρησιμοποίηση  $E_{elec} = 50$  nJ/bit καθώς η διάμετρος του δικτύου αυξάνεται. Αυτή η παράσταση δείχνει ότι ο LEACH επιτυγχάνει μεταξύ 7x και 8x μείωση της ενέργειας έναντι της άμεσης επικοινωνίας και μεταξύ 4x και 8x μείωση της ενέργειας έναντι της δρομολόγησης Minimum Transmission Energy (MTE).



Εικόνα 22: Συνολική κατανάλωση ενέργειας με τη χρήση άμεσης επικοινωνίας, MTE δρομολόγησης και του LEACH για το 100 κόμβων τυχαίο δίκτυο που φαίνεται στην εικόνα 21.  $E_{elec} = 50$  nJ/bit,  $E_{amp} = 100$  pJ/bit/m<sup>2</sup> και τα μηνύματα 2000 bit [15]

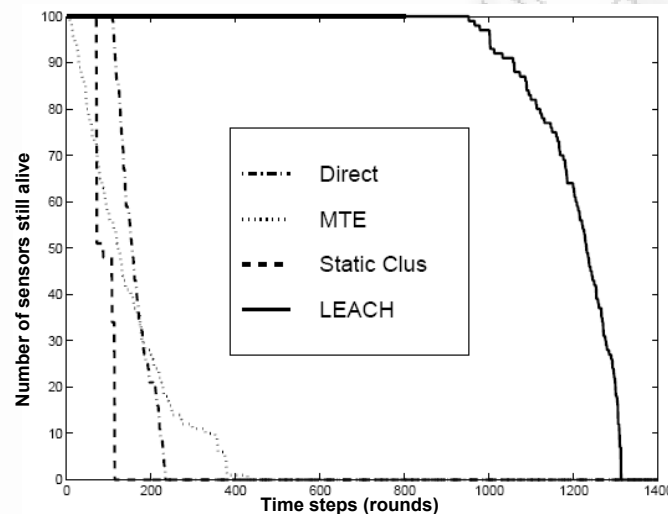


**Εικόνα 23:** Συνολική κατανάλωση ενέργειας συστήματος με τη χρήση (α) απευθείας επικοινωνίας και του LEACH και (β) MTE δρομολόγηση και LEACH για το τυχαίο δίκτυο που φαίνεται στο σχήμα 3.  $E_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$  και τα μηνύματα είναι των 2000 bits [15]

Η εικόνα 23 του [15] παρουσιάζει το ποσό ενέργειας που χάνεται χρησιμοποιώντας το LEACH σε σχέση με τη χρησιμοποίηση της άμεσης επικοινωνίας και το LEACH με την MTE δρομολόγηση καθώς η διάμετρος δικτύου αυξάνεται και η ενέργεια των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ποικίλλει. Αυτό το σχήμα παρουσιάζει την μεγάλη αποταμίευση ενέργειας που πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον LEACH.

Εκτός από τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, το LEACH διανέμει επιτυχώς την χρήση ενέργειας μεταξύ των κόμβων στο δίκτυο έτσι ώστε οι κόμβοι να πεθαίνουν τυχαία και ουσιαστικά στο ίδιο ποσοστό. Η εικόνα 24 του [15] παρουσιάζει μια σύγκριση της διάρκειας ζωής συστημάτων χρησιμοποιώντας το LEACH εναντίον της άμεσης επικοινωνίας, της δρομολόγησης MTE, και ενός συμβατικού στατικού πρωτοκόλλου συστάδας, όπου οι επικεφαλής συστάδας και οι σχετικές συστάδες επιλέγονται αρχικά και παραμένουν σταθερά και η συγχώνευση στοιχείων εκτελείται στους επικεφαλής συστάδας, για το δίκτυο που παρουσιάζεται στην εικόνα 17. Για αυτό το πείραμα, σε κάθε κόμβο δόθηκαν αρχικά 0.5J της ενέργειας. Η εικόνα 24 δείχνει ότι ο LEACH αυξάνει παραπάνω από το διπλάσιο τη χρήσιμη διάρκεια ζωής του συστήματος έναντι των εναλλακτικών προσεγγίσεων. Τρέχοντας τα

παρόμοια πειράματα με τα διαφορετικά ενεργειακά κατώτατα όρια και διαπιστώθηκε ότι ανεξάρτητα με το πόση ενέργεια σε κάθε κόμβο δίνεται, παίρνει περίπου 8 φορές περισσότερο χρόνο για τον πρώτο κόμβο να πεθάνει και περίπου 3 φορές περισσότερο χρόνο για τον τελευταίο κόμβο να πεθάνει στον LEACH από οποιοδήποτε από τα άλλα πρωτόκολλα. Τα δεδομένα από αυτά τα πειράματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Το πλεονέκτημα της δυναμικής ομαδοποίησης (LEACH) εναντίον της στατικής ομαδοποίησης φαίνεται σαφώς στην εικόνα 24. Χρησιμοποιώντας έναν στατικό αλγόριθμο ομαδοποίησης, μόλις πεθαίνει ο επικεφαλής συστάδας κόμβος, όλοι οι κόμβοι από εκείνη την συστάδα πεθαίνουν εκ του αποτελέσματος δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένας τρόπος να φτάσουν τα δεδομένα τους στο σταθμό βάσης. Ενώ αυτές οι προσομοιώσεις δεν υπολογίζουν το χρόνο οργάνωσης για να διαμορφώσουν τις δυναμικές συστάδες (ούτε υπολογίζουν για οποιοδήποτε απαραίτητο ξεκίνημα δρομολόγησης κοστίζουν ή ενημερώνουν όπως οι κόμβοι πεθαίνουν), δίνουν μια καλή πρώτη προσέγγιση της επέκτασης της διάρκειας ζωής που μπορούμε να επιτύχουμε με τη χρησιμοποίηση του LEACH.

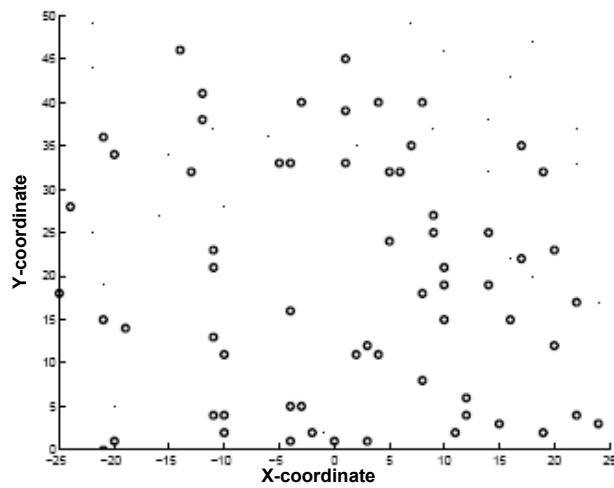


Εικόνα 24: Διάρκεια ζωής συστήματος με τη χρήση άμεσης επικοινωνίας, MTE δρομολόγηση, στατική ομαδοποίηση και LEACH με 0,5 J/κόμβο [15]

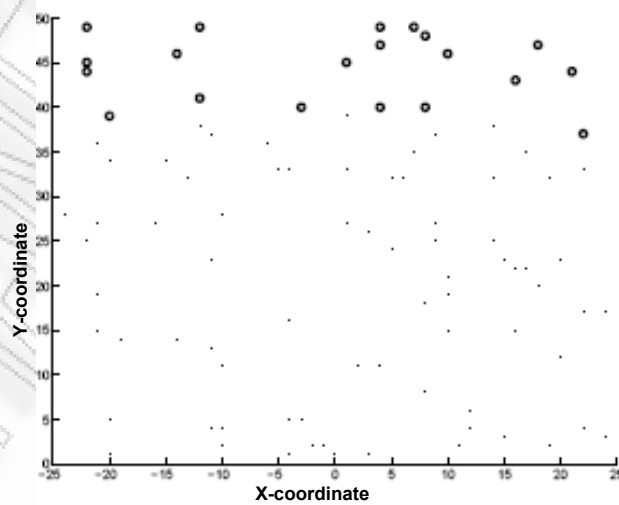
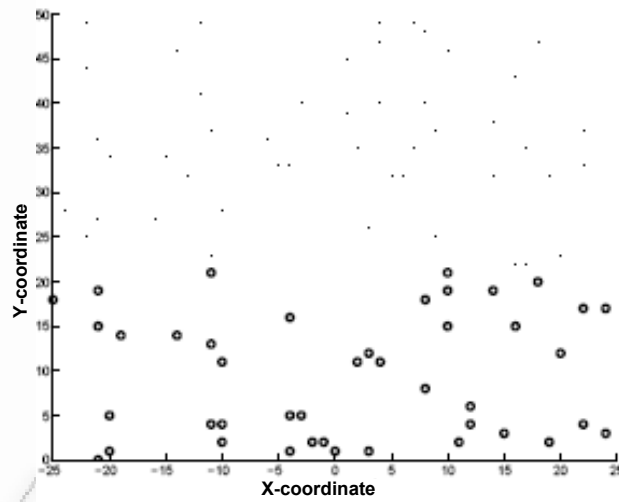
Ενέργεια (J/κόμβο)	Πρωτόκολλο	Γύρος που ο πρώτος κόμβος σβήνει	Γύρος που ο τελευταίος κόμβος σβήνει
0,25	Άμεση επικοινωνία	55	117
	MTE	5	221
	Στατική ομαδοποίηση	41	67
	LEACH	394	665
0,5	Άμεση επικοινωνία	109	234
	MTE	8	429
	Στατική ομαδοποίηση	80	110
	LEACH	932	1312
1	Άμεση επικοινωνία	217	468
	MTE	15	843
	Στατική ομαδοποίηση	106	240
	LEACH	1848	2608

Πίνακας 2: Διάρκεια ζωής με τη χρήση διαφορετικών αρχικών ποσών ενέργειας για τους κόμβους [15]

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του LEACH, που φαίνεται στην εικόνα 25 [15], είναι το γεγονός ότι οι κόμβοι πεθαίνουν ουσιαστικά με ένα «τυχαίο» τρόπο. Εάν η εικόνα 25 συγκριθεί με την εικόνα 26 [15], βλέπουμε ότι η σειρά με την οποία οι κόμβοι πεθαίνουν με τη χρήση του LEACH είναι πιο επιθυμητή από τη σειρά που πεθαίνουν χρησιμοποιώντας την άμεση επικοινωνία ή τη δρομολόγηση MTE. Με τον τυχαίο θάνατο, δεν υπάρχει κανένα τμήμα του περιβάλλοντος που «δεν ανιχνεύεται» καθώς οι κόμβοι πεθαίνουν, όπως εμφανίζεται στα άλλα πρωτόκολλα.



Εικόνα 25: Κόμβοι που παραμένουν ζωντανοί και αυτοί που είναι νεκροί μετά από 1200 γύρους με  $0,5 \text{ j/κόμβο}$  για το LEACH [15]



Εικόνα 26: Κόμβοι που παραμένουν ζωντανοί και αυτοί που είναι νεκροί μετά από 180 γύρους με  $0,5 \text{ j/κόμβο}$  για την άμεση επικοινωνία και την MTE επικοινωνία [15]

### 3.5.1.1 Λεπτομέρειες αλγορίθμου LEACH

Η λειτουργία του LEACH χωρίζεται σε κύκλους, όπου κάθε κύκλος αρχίζει με μια φάση οργάνωσης, όταν οργανώνονται οι συστάδες, ακολουθούμενος από μια φάση κατάστασης, όταν εμφανίζονται οι μεταφορές δεδομένων στο σταθμό βάσης. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα overhead, η φάση κατάστασης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη φάση οργάνωσης.

#### Φάση Διαφήμισης (Advertisement Phase)

Αρχικά, όταν δημιουργούνται οι συστάδες, κάθε κόμβος αποφασίζει εάν πρέπει να γίνει ένας επικεφαλής συστάδας για τον τρέχοντα κύκλο. Η παρούσα απόφαση είναι βασισμένη στο προτεινόμενο ποσοστό των επικεφαλής συστάδας για το δίκτυο (που καθορίζεται a priori) και τον αριθμό των περιπτώσεων που ο κόμβος είναι επικεφαλής συστάδας μέχρι τώρα. Η παρούσα απόφαση λαμβάνεται από τον κόμβο  $n$  επιλέγοντας έναν τυχαίο αριθμό μεταξύ 0 και 1. Εάν ο αριθμός είναι λιγότερο από ένα κατώτατο όριο  $T(n)$ , ο κόμβος γίνεται ένα επικεφαλής συστάδας για τον τρέχοντα κύκλο. Το κατώτατο όριο τίθεται ως:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{εάν } n \in G \\ 0 & \text{εάν } n \notin G \end{cases} \quad (1)$$

όπου  $P$  είναι το επιθυμητό ποσοστό των επικεφαλής συστάδας (π.χ.  $P=5\%$ ),  $r$  = ο τρέχον γύρος, και  $G$  είναι το σύνολο των κόμβων που δεν έχουν γίνει επικεφαλής συστάδας τους τελευταίους  $1/P$  γύρους. Χρησιμοποιώντας αυτό το κατώτατο όριο, κάθε κόμβος θα είναι ένα επικεφαλής συστάδας κάποτε μέσα στους  $1/P$  κύκλους. Κατά τη διάρκεια του γύρου 0 ( $r = 0$ ), κάθε κόμβος έχει μια πιθανότητα  $P$  να γίνει επικεφαλής συστάδας. Οι κόμβοι που είναι επικεφαλής συστάδας στο γύρο 0 δεν μπορούν να είναι επικεφαλής συστάδας για τους επόμενους  $1/P$  γύρους. Κατά συνέπεια η πιθανότητα οι υπόλοιποι κόμβοι να είναι επικεφαλής συστάδας πρέπει να αυξηθεί, δεδομένου ότι υπάρχουν λιγότεροι κόμβοι που είναι επιλέξιμοι για να γίνουν επικεφαλής συστάδας. Μετά από  $1/P-1$  κύκλους,  $T = 1$  για οποιουδήποτε κόμβους που δεν είναι ακόμα επικεφαλής συστάδας, και μετά από  $1/P$  κύκλους, όλοι οι κόμβοι είναι άλλη μια φορά επιλέξιμοι για να γίνουν επικεφαλής συστάδας. Οι μελλοντικές εκδόσεις αυτής της εργασίας θα περιλάβουν ένα βασισμένο στην ενέργεια κατώτατο όριο για να αποτελέσουν τους ανομοιόμορφους ενεργειακούς κόμβους. Σε αυτήν την περίπτωση, υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι αρχίζουν με την ίδια ποσότητα ενέργειας και να είναι κάποιος επικεφαλής συστάδας καταναλώνει περίπου την ίδια ποσότητα ενέργειας για κάθε κόμβο.

Κάθε κόμβος που έχει εκλεγεί ως επικεφαλής συστάδας για τον τρέχοντα κύκλο μεταδίδει ένα μήνυμα διαφήμισης στους υπόλοιπους κόμβους. Για αυτήν την φάση «διαφήμισης των επικεφαλής συστάδας», οι επικεφαλής συστάδας χρησιμοποιούν ένα CSMA πρωτόκολλο MAC, και όλοι οι επικεφαλής συστάδας μεταδίδουν τη διαφήμισή τους χρησιμοποιώντας το ίδιο ποσό ενέργειας. Οι μη επικεφαλής συστάδας κόμβοι πρέπει να κρατήσουν τους δέκτες τους ανοιχτούς κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης οργάνωσης για να ακούσουν τις διαφημίσεις όλων των επικεφαλής συστάδας κόμβων. Αφότου αυτή η φάση ολοκληρωθεί, κάθε μη επικεφαλής συστάδας κόμβος αποφασίζει τη συστάδα στην οποία ανήκει για αυτόν τον κύκλο. Η παρούσα απόφαση είναι βασισμένη στη λαμβανόμενη δύναμη των σημάτων διαφήμισης. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν συμμετρικά κανάλια διάδοσης, η διαφήμιση του επικεφαλής συστάδας που ακούγεται με τη μεγαλύτερη δύναμη σήματος είναι ο επικεφαλής συστάδας με τον οποίον το ελάχιστο ποσό ενέργειας απαιτείται για την επικοινωνία. Στην περίπτωση ισοπαλιών, ένας τυχαίος επικεφαλής συστάδας επιλέγεται.

#### Φάση οργάνωσης συστάδων (Cluster Set-Up Phase)

Αφότου έχει αποφασίσει κάθε κόμβος σε ποια συστάδα ανήκει, πρέπει να ενημερώσει τον επικεφαλής συστάδας κόμβο ότι θα είναι μέλος της συστάδας. Κάθε κόμβος διαβιβάζει αυτές τις πληροφορίες πίσω στον επικεφαλής συστάδας χρησιμοποιώντας πάλι ένα CSMA πρωτόκολλο MAC. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, όλοι οι επικεφαλής συστάδας κόμβοι πρέπει να κρατήσουν τους δέκτες τους ανοιχτούς.

### Δημιουργία Προγράμματος (Schedule Creation)

Ο επικεφαλής συστάδας κόμβος λαμβάνει όλα τα μηνύματα για τους κόμβους που θα επιθυμούσαν να περιληφθούν στη συστάδα. Με βάση τον αριθμό κόμβων στη συστάδα, ο επικεφαλής συστάδας κόμβος δημιουργεί ένα πρόγραμμα TDMA λέγοντας σε κάθε κόμβο πότε μπορεί να μεταδώσει. Αυτό το πρόγραμμα μεταδίδεται πίσω στους κόμβους της συστάδας.

### Μετάδοση Δεδομένων (Data Transmission)

Μόλις δημιουργηθούν οι συστάδες και καθοριστεί το πρόγραμμα TDMA, μπορεί να αρχίσει η μετάδοση δεδομένων. Υποθέτοντας ότι οι κόμβοι έχουν πάντα δεδομένα να στείλουν, τα στέλνουν κατά τη διάρκεια του διατιθέμενου χρόνου μετάδοσής τους στον επικεφαλής συστάδας. Αυτή η μετάδοση χρησιμοποιεί ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας (που επιλέγεται βασιζόμενος στη λαμβανόμενη δύναμη του επικεφαλής συστάδας διαφήμισης). Το κύκλωμα εκπομπής κάθε μη επικεφαλής συστάδας κόμβου μπορεί να κλείσει μέχρι το διατιθέμενο χρόνο μετάδοσης του κόμβου, ελαχιστοποιώντας κατά συνέπεια την ενεργειακή κατανάλωση σε αυτούς τους κόμβους. Ο επικεφαλής συστάδας κόμβος πρέπει να κρατήσει ανοικτό το δέκτη του για να παραληφθούν όλα τα δεδομένα από τους κόμβους της συστάδας. Όταν όλα τα δεδομένα παραληφθούν, ο επικεφαλής κόμβος εκτελεί τις λειτουργίες επεξεργασίας σήματος για να συμπίεσει τα δεδομένα σε ένα ενιαίο σήμα. Παραδείγματος χάριν, εάν τα στοιχεία είναι ακουστικά ή σεισμικά σήματα, ο επικεφαλής συστάδας κόμβος μπορεί να διαμορφώσει τα μεμονωμένα σήματα και να παράγει ένα σύνθετο σήμα. Αυτό το σύνθετο σήμα στέλνεται στο σταθμό βάσης. Δεδομένου ότι ο σταθμός βάσης είναι μακρινός, αυτό είναι υψηλής ενέργειας μετάδοση.

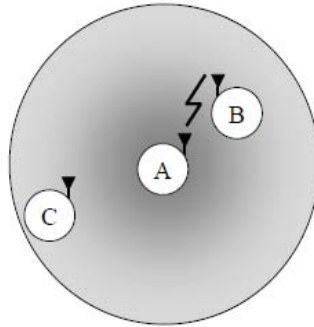
Αυτό είναι η σταθερή κατάσταση λειτουργίας των δικτύων LEACH. Μετά από έναν ορισμένο χρόνο, που καθορίζεται α priori, ο επόμενος γύρος αρχίζει με κάθε κόμβο να καθορίζει εάν θα είναι επικεφαλής συστάδας για αυτόν τον κύκλο και τη διαφήμιση αυτών των πληροφοριών.

### **3.5.1.2 Πολλαπλές Συστάδες (Multiple Clusters)**

Παραπάνω περιγράφηκε πώς στις μεμονωμένες συστάδες επικοινωνούν οι κόμβοι, μέσα στην συστάδα. Εντούτοις, η ασύρματη εκπομπή είναι ένα μέσο μετάδοσης ανοικτής εκπομπής. Υπό αυτήν τη μορφή, η μετάδοση σε μια συστάδα έχει επιπτώσεις (και ως εκ τούτου να υποβιβάζει) στην επικοινωνία σε μία κοντινή συστάδα. Παραδείγματος χάριν, στην εικόνα 27 παρουσιάζεται η ακτίνα επικοινωνίας. Η μετάδοση του κόμβου A, ενώ προορίζεται για τον κόμβο B, αλλοιώνει οποιαδήποτε μετάδοση στον κόμβο C. Για να μειώσει αυτόν τον τύπο παρέμβασης, κάθε συστάδα επικοινωνεί με τη χρησιμοποίηση διαφορετικών κωδίκων CDMA. Κατά συνέπεια, όταν αποφασίζει να γίνει ένας κόμβος επικεφαλής συστάδας, επιλέγει τυχαία από έναν κατάλογο κωδίκων διάδοσης. Ενημερώνει όλους τους κόμβους στη συστάδα να διαβιβάζουν με τη χρησιμοποίηση αυτού του διαδίδοντος κώδικα. Ο επικεφαλής συστάδας μετά φιλτράρει όλη την λαμβανόμενη ενέργεια χρησιμοποιώντας τον συγκεκριμένο κωδικό. Κατά συνέπεια τα σήματα των γειτονικών συστάδων θα φιλτραριστούν και δεν θα αλλοιώσουν η μετάδοση των κόμβων στη συστάδα.

Η αποδοτική ανάθεση καναλιών είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, ακόμα και όταν υπάρχει ένα κεντρικό κέντρο ελέγχου που μπορεί να εκτελέσει τους απαραίτητους αλγορίθμους. Η χρησιμοποίηση των κωδίκων CDMA, ενώ δεν είναι απαραίτητως η περισσότερη αποδοτική λύση εύρους ζώνης, λύνει το πρόβλημα της πολλαπλής πρόσβασης με έναν διανεμημένο τρόπο.





Εικόνα 27: Παρεμβολή εκπομπής. Ο κόμβος A εκπέμπει στον B και παρεμβάλλει οποιαδήποτε μετάδοση στον C. [15]

### 3.5.1.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

- Μικρές αποστάσεις μετάδοσης για τους περισσότερους κόμβους
- Τοπικός συντονισμός και έλεγχος
- Τυχαία περιστροφική εναλλαγή των επικεφαλής συστάδων για την ομοιόμορφη κατανομή του ενεργειακού φορτίου
- Τοπική συμπίεση δεδομένων
- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 7-8 φορές σε σχέση με την άμεση επικοινωνία και το MTE.
- Αύξηση της χρήσιμης διάρκειας ζωής του δικτύου κατά 2 φορές σε σχέση με την άμεση επικοινωνία και το MTE.

#### Μειονεκτήματα

- Κατά την ανάθεση των επικεφαλής συστάδων δεν λαμβάνεται υπόψη η υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων.
- Οι κόμβοι που επιλέγονται επικεφαλής συστάδας καταναλώνουν πολύ ενέργεια
- Η συμπίεση των δεδομένων που πραγματοποιείται από τους επικεφαλής συστάδων είναι με απώλειες.
- Υπάρχει καθυστέρηση στην μετάδοση των δεδομένων μέσα στις συστάδας λόγω της χρήσεως προγράμματος TDMA.

### 3.5.1.4 Εξέλιξη του πρωτοκόλλου

#### Ενεργειακά ενήμερη επιλογή των επικεφαλής συστάδων (E-LEACH)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω κατά την φάση της διαφήμισης κάθε κόμβος επιλέγει από μόνος του να γίνει επικεφαλής συστάδας χωρίς να λαμβάνει υπόψη την υπολειπόμενη ενέργειά του, παρά μόνο το ποσοστό των κόμβων που μπορούν να γίνουν επικεφαλής και τον αριθμό των περιπτώσεων που ο κόμβος ήταν επικεφαλής συστάδας μέχρι τώρα. Πέραν των παραπάνω θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και η παράμετρος της υπολειπόμενης ενέργειας του κόμβου για τον καθορισμό ενός επικεφαλής συστάδας. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η διαδικασία επιλογής επικεφαλής συστάδων και κάνει την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων ως πρώτη παράμετρο για την επιλογή ενός επικεφαλής συστάδας μετά τον πρώτο γύρο[33]. Όπως και το LEACH έτσι και το E-LEACH πρωτόκολλο χωρίζεται σε γύρους όπου την πρώτη φορά κάθε κόμβος έχει την ίδια πιθανότητα να γίνει επικεφαλής συστάδας, οπότε κάθε επικεφαλής επιλέγεται τυχαία. Στην συνέχεια, όπου η υπολειπόμενη ενέργεια κάθε κόμβου είναι διαφορετική, λαμβάνεται υπόψη για την επιλογή του επικεφαλής. Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι με την περισσότερη ενέργεια θα γίνουν επικεφαλής παρά αυτοί με την λιγότερη.

### Πρωτόκολλο LEACH δύο επιπέδων (TL-LEACH)

Στο πρωτόκολλο LEACH οι επικεφαλής συστάδων συλλέγουν και συγχωνεύουν τα δεδομένα από τους κόμβους στην ομάδα τους και προωθούν την πληροφορία στο σταθμό βάσης απευθείας. Οι επικεφαλής συστάδων μπορεί να βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τον σταθμό βάσης και επομένως να χρησιμοποιούν πολύ ενέργεια για την μετάδοση αυτή με αποτέλεσμα να πεθαίνουν γρηγορότερα από τους άλλους κόμβους. Μια νέα έκδοση του LEACH που ονομάζεται «δύο επιπέδων LEACH (Two Level LEACH)» προτάθηκε στο [34]. Σε αυτό το πρωτόκολλο οι επικεφαλής συστάδων συλλέγουν τα δεδομένα από τους υπόλοιπους κόμβους όπως και στο αρχικό LEACH, αλλά αντί να στέλνουν κατευθείαν τα δεδομένα στο σταθμό βάσης, χρησιμοποιούν έναν επικεφαλής συστάδας που βρίσκεται στην κατεύθυνση του σταθμού βάσης και πριν από αυτόν ως αναμεταδότη.

### Πρωτόκολλο Multihop LEACH (M-LEACH)

Στο LEACH κάθε επικεφαλής συστάδας επικοινωνεί απευθείας με τον σταθμό βάσης ανεξάρτητα της απόστασης που έχουν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κατανάλωση αρκετής ενέργειας. Το Multihop-LEACH πρωτόκολλο επιλέγει ένα βέλτιστο μονοπάτι διαμέσου άλλων επικεφαλής συστάδων και χρησιμοποιεί αυτούς τους επικεφαλής ως αναμεταδότες για να μεταδώσει τα δεδομένα πάνω από αυτούς [35]. Αρχικά η πολυ-βηματική επικοινωνία υιοθετείται ανάμεσα στους επικεφαλής συστάδων. Μετά σύμφωνα με τη βέλτιστη επιλεγμένη πορεία αυτοί οι επικεφαλής συστάδων μεταδίδουν τα δεδομένα στον αντίστοιχο επικεφαλής συστάδας που βρίσκεται κοντύτερα στο σταθμό βάσης. Τελικά ο επικεφαλής στέλνει τα δεδομένα στο σταθμό βάσης. Το M – LEACH πρωτόκολλο είναι παρόμοιο με το LEACH με τη μόνη διαφορά να είναι ότι δημιουργεί multihop επικοινωνία μεταξύ των επικεφαλής συστάδων και του σταθμού βάσης.

### Πρωτόκολλο LEACH – C

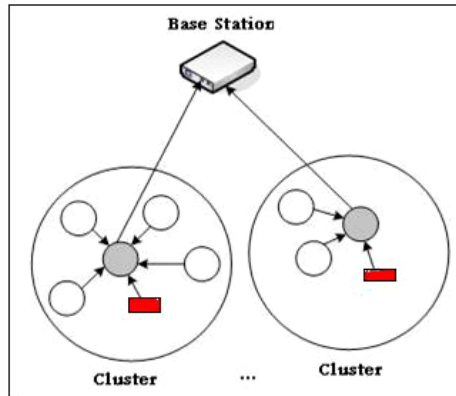
Το LEACH δεν προσφέρει καμία εγγύηση για τη θέση και τον αριθμό των επικεφαλής συστάδων. Στο [36] μια βελτίωση του LEACH προτάθηκε. Το πρωτόκολλο ονομάστηκε LEACH – C και χρησιμοποιεί ένα κεντροποιημένο αλγόριθμο ομαδοποίησης και την ίδια φάση σταθερής κατάστασης του LEACH. Το LEACH μπορεί να παράγει καλύτερη απόδοση με τη διασκόρπιση των επικεφαλής συστάδων σε όλο το δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της φάσης οργάνωσης του LEACH – C, κάθε κόμβος στέλνει τις πληροφορίες για την τρέχουσα θέση του (που καθορίζονται ενδεχομένως χρησιμοποιώντας το GPS) και το υπόλοιπο ενεργειακό επίπεδο στο σταθμό βάσης. Αντίθετα από τον καθορισμό των καλών συστάδων, ο σταθμός βάσης πρέπει να εξασφαλίσει ότι το ενεργειακό φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ όλων των κόμβων. Για να το κάνει αυτό υπολογίζει την μέση ενέργεια των κόμβων και καθορίζει ποιος κόμβος έχει ενέργεια χαμηλότερη από την τιμή αυτή.

Μόλις βρεθούν οι επικεφαλής συστάδων και οι σχετικές συστάδες, ο σταθμός βάσης μεταδίδει broadcast ένα μήνυμα που περιλαμβάνει την ταυτότητα του επικεφαλής συστάδας για κάθε κόμβο. Εάν μια ταυτότητα επικεφαλής συστάδας ταιριάζει με την ταυτότητά του, ο κόμβος είναι επικεφαλής συστάδας. Διαφορετικά ο κόμβος καθορίζει την χρονοσχιμμή TDMA του για τη μετάδοση δεδομένων και πέφτει σε sleep mode μέχρι το χρόνο του να διαβιβάσει τα δεδομένα. Η φάση σταθερής κατάστασης του LEACH – C είναι ίδια με αυτήν του πρωτοκόλλου LEACH.

### Πρωτόκολλο V – LEACH

Στο αρχικό LEACH, ο επικεφαλής συστάδας λαμβάνει δεδομένα από τα μέλη των συστάδων, τα αθροίζει και τα στέλνει έπειτα στο σταθμό βάσης που μπορεί να βρίσκεται μακριά. Ο επικεφαλής συστάδας θα πεθάνει νωρίτερα από τους άλλους κόμβους στη συστάδα λόγω της λειτουργίας λήψης-αποστολής. Όταν ο επικεφαλής συστάδας πεθάνει η συστάδα θα γίνει άχρηστη επειδή τα στοιχεία που συγκεντρώνονται από τους κόμβους δεν θα φθάσουν ποτέ στο σταθμό βάσης. Στο V-LEACH [37] πρωτόκολλο πέραν από την ύπαρξη του επικεφαλής συστάδας υπάρχει και ένας υπο-επικεφαλής (εικόνα 28) που παίρνει το ρόλο του επικεφαλής όταν αυτός πεθάνει λόγω της κατανάλωσης ενέργειας.

Έτσι τα στοιχεία των κόμβων θα καταλήγουν πάντα στο σταθμό βάσης χωρίς να χρειάζεται να εκλεγεί ένας καινούριος επικεφαλής συστάδας κάθε φορά που ο τελευταίος θα πεθαίνει. Αυτό παρατείνει την διάρκεια ζωής του δικτύου.

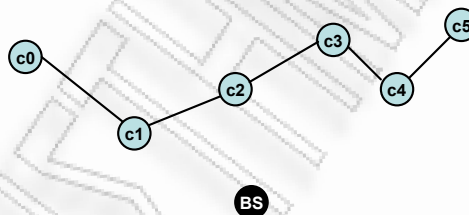


Εικόνα 28: V-LEACH [37]

### 3.5.2 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information System)

Το PEGASIS [16] είναι το βελτιωμένο πρωτόκολλο και αποτελεί εξέλιξη του LEACH, όπου μόνο ένας κόμβος επιλέγεται ως επικεφαλής κόμβος που στέλνει τα συγχωνευμένα δεδομένα στον BS ανά γύρο. Αυτό επιτυγχάνει έναν παράγοντα βελτίωσης 2 έναντι του πρωτοκόλλου LEACH [16]. Το πρωτόκολλο PEGASIS απαιτεί το σχηματισμό αλυσίδας που επιτυγχάνεται σε δύο βήματα:

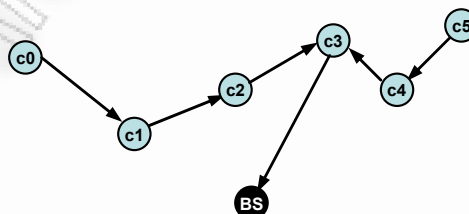
**3.5.2.1 Κατασκευή αλυσίδας:** Για να κατασκευάσουμε την αλυσίδα αρχίζουμε από τον πιο μακρινό κόμβο από τον BS και έπειτα χρησιμοποιείται η άπληστη προσέγγιση για να κατασκευάσει την αλυσίδα.



Εικόνα 29: Γράφημα που δείχνει την κατασκευή της αλυσίδας του PEGASIS με τη χρήση της άπληστης προσέγγισης [16]

Στην εικόνα 29 του [16], ο κόμβος c0 που βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο μακριά από το σταθμό βάσης. Η έναρξη κατασκευής αλυσίδας από τον κόμβο c0 που συνδέεται με τον κόμβο c1, ο κόμβος c1 συνδέεται με τον κόμβο c2, ο κόμβος c2 συνδέεται με τον κόμβο c3, και ο κόμβος c3 συνδέεται με τον κόμβο c4, ο κόμβος c4 συνδέεται με c5.

**3.5.2.2 Συγκέντρωση των στοιχείων:** Ο επικεφαλής κάθε κύκλου επιλέγεται τυχαία. Η τυχαία επιλογή του επικεφαλής κόμβου παρέχει επίσης το όφελος δεδομένου ότι είναι πιθανότερο για τους κόμβους να πεθάνουν σε τυχαίες θέσεις που παρέχουν έτσι γερό δίκτυο. Όταν ένας κόμβος πεθαίνει η αλυσίδα αναδημιουργείται για να παρακάμψει το νεκρό κόμβο.



Εικόνα 30: Περιγραφή της συγχώνευσης δεδομένων στον επικεφαλής κόμβο και αποστολή στον BS [16]

Αφού επιλέγεται ο ηγέτης στέλνει ένα token για να αρχίσει η διαδικασία συλλογής δεδομένων. Η διαβίβαση του token απαιτεί επίσης την κατανάλωση ενέργειας αλλά το κόστος του token είναι πολύ μικρό επειδή το μέγεθος του token είναι πολύ μικρό. Στην εικόνα 26 ο

κόμβος c3 επιλέγεται ως επικεφαλής κόμβος για τον συγκεκριμένο κύκλο. Ο κόμβος c5 περνά τα δεδομένα στον c3 κατά μήκος της αλυσίδας. Ο c0 περνά τα δεδομένα c3 κατά μήκος της αλυσίδας. Ο c3 λαμβάνει τα δεδομένα, συγχωνεύει όλα τα δεδομένα που έχει λάβει και τα διαβιβάζει στο σταθμό βάσης (εικόνα 30).

### 3.5.2.3 Πλεονεκτήματα του PEGASIS έναντι του LEACH

- Σε σύγκριση με τον LEACH η απόσταση μετάδοσης για το μεγαλύτερο μέρος των κόμβων μειώνεται στον PEGASIS [16].
- Τα μηνύματα που παραλαμβάνονται από κάθε επικεφαλής κόμβο είναι το πολύ 2 στον PEGASIS, λιγότερα έναντι του LEACH [16].
- Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το PEGASIS παρέχει βελτίωση παράγοντα 2 έναντι του πρωτοκόλλου LEACH για το δίκτυο 50m X 50m και τη βελτίωση παράγοντα 3 για το δίκτυο 100m X 100m [16].
- Δεδομένου ότι κάθε κόμβος επιλέγεται μια φορά, η ενεργειακή κατανάλωση είναι ισορροπημένη μεταξύ των κόμβων αισθητήρων [16].

### 3.5.2.4 Μειονεκτήματα του πρωτοκόλλου PEGASIS

- Όταν ένας επικεφαλής κόμβος επιλέγεται, δεν υπάρχει καμία εκτίμηση πόσο μακριά ο BS βρίσκεται από τον επικεφαλής κόμβο [38].
- Όταν ένας επικεφαλής κόμβος επιλέγεται το ενεργειακό επίπεδό του δεν εξετάζεται [38].
- Δεδομένου ότι υπάρχει μόνο ένας κόμβος επικεφαλής, μπορεί να είναι ο «bottle neck» του δικτύου προκαλώντας την καθυστέρηση [38].
- Η περιττή διαβίβαση στοιχείων καθώς μόνο ένας επικεφαλής κόμβος επιλέγεται [38].
- Η καθυστέρηση από την διαδοχική μετάδοση, λαμβάνοντας υπόψη ότι η επεξεργασία είναι αμελητέα σε σχέση με τη μετάδοση, είναι μεγάλη και αυξάνεται με την αύξηση των κόμβων του δικτύου.

### 3.5.2.5 Εξέλιξη του πρωτοκόλλου

#### Το PEGASIS με κόμβους CDMA

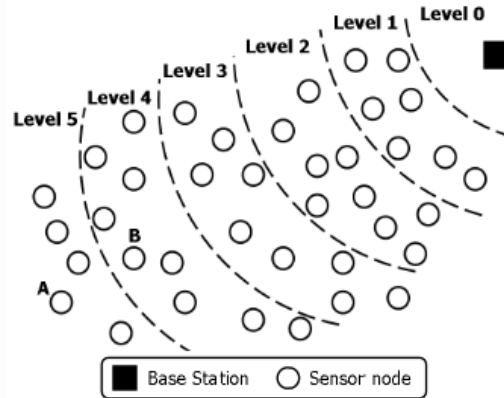
Στο γραμμικό βασισμένο στην αλυσίδα σχέδιο PEGASIS, δεδομένου ότι η μετάδοση είναι διαδοχική η μέση καθυστέρηση ανά γύρο είναι ακόμα υψηλή έτσι επιδιώκεται η ταυτόχρονη μετάδοση. Εάν οι κόμβοι είναι ικανοί για CDMA, τότε το δυαδικό σχέδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσει την παράλληλη επικοινωνία για να μειώσει τη γενική καθυστέρηση [17].

Στη βασισμένη σε αλυσίδα δυαδική προσέγγιση με χρησιμοποίηση CDMA, για να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση δεδομένων, συνδυάζεται χρησιμοποιώντας τόσο πολλά ζευγάρια όσα είναι δυνατόν σε κάθε επίπεδο. Στο χαμηλότερο επίπεδο η αλυσίδα κατασκευάζεται με τον ίδιο τρόπο όπως έγινε στο PEGASIS. Για τη συλλογή στοιχείων γύρω από κάθε κόμβο κάθε κόμβος διαβιβάζει τα στοιχεία στον κοντινότερο γείτονά του στο δεδομένο επίπεδο ιεραρχίας. Οι κόμβοι που λαμβάνουν τα στοιχεία σε χαμηλότερο επίπεδο αυξάνονται στο επόμενο επίπεδο [17].

#### Ομόκεντρο σχέδιο συγκέντρωσης (Concentric Clustering Scheme)

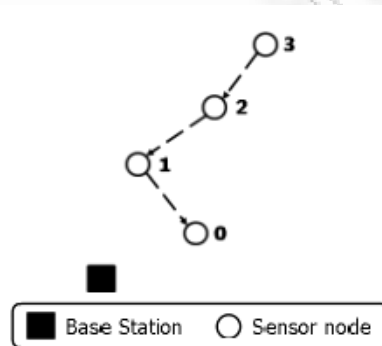
Στο ομόκεντρο σχέδιο (εικόνα 31-35 του [38]) συγκέντρωσης το δίκτυο διαιρείται υπό μορφή ομόκεντρων διαμορφωμένων συστάδων. Αυτό το πρωτόκολλο αποτελείται από τέσσερις διαδικασίες:

- α. Ανάθεση επιπέδων: Σε κάθε κόμβο στο δίκτυο ορίζεται ένα επίπεδο βασισμένο στην ομαδοποίηση των ομόκεντρων συστάδων [38].

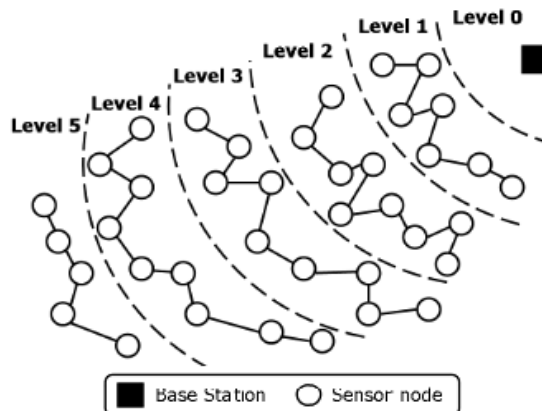


Εικόνα 31: Ανάθεση επιπέδων [38]

β. Κατασκευή αλυσίδων: Στην περιοχή του επιπέδου, κατασκευάζεται η αλυσίδα, η οποία είναι ίδια με το πρωτόκολλο PEGASIS [38].

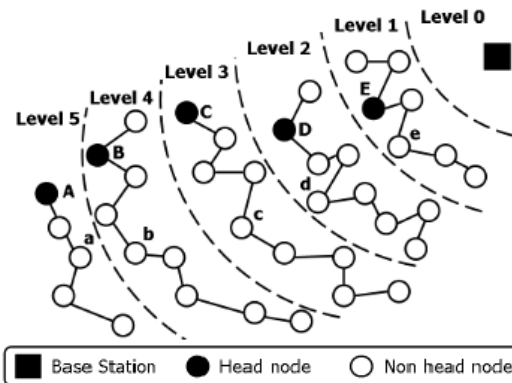


Εικόνα 32: Κατασκευή αλυσίδας με τη χρήση αλγόριθμου απληστίας [38]



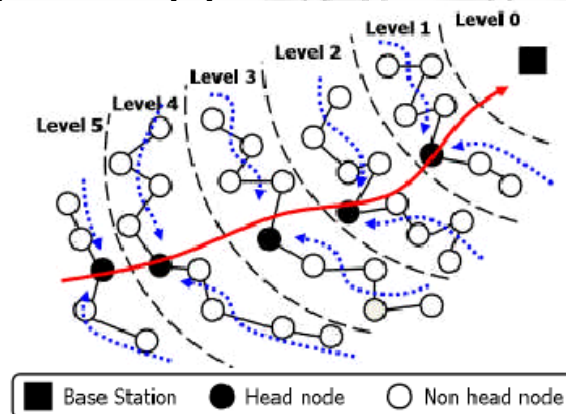
Εικόνα 33: Κατασκευή αλυσίδας σε κάθε επίπεδο [38]

γ. Ανάθεση επικεφαλής κόμβου: Ένας από τους κόμβους σε κάθε επίπεδο επιλέγεται ως επικεφαλής κόμβος. Εάν υπάρχουν  $N$  κόμβοι σε ένα επίπεδο έπειτα για τον  $i$ -οστό γύρο  $I$  mode  $N$  επιλέγεται ως επικεφαλής κόμβος. Αφότου επιλέγεται ο επικεφαλής κόμβος σε κάθε επίπεδο ενημερώνει τους επικεφαλής κόμβους του αμέσως υψηλότερου επιπέδου και του αμέσως χαμηλότερου επιπέδου [38].



Εικόνα 34: Επιλογή επικεφαλής σε κάθε αλυσίδα [38]

δ. Μετάδοση δεδομένων: Όλοι οι κόμβοι στο επίπεδο διαβιβάζουν τα δεδομένα τους στον επικεφαλής κόμβο του επιπέδου τους. Ο επικεφαλής κόμβος αφού λάβει τα δεδομένα τους τα συγχωνεύει και τα στέλνει στον επικεφαλής κόμβο του χαμηλότερου επιπέδου συστάδας. Ο επικεφαλής κόμβος πλησιέστερα στον BS συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους υψηλότερου επιπέδου επικεφαλής κόμβους και τα διαβιβάζει σε αυτόν. Ένας άλλος τρόπος είναι να σταλούν τα δεδομένα άμεσα στον BS. Εάν ο επικεφαλής κόμβος στο χαμηλότερο επίπεδο διαμορφώνει οξεία γωνία όσον αφορά τον BS και τον επικεφαλής κόμβο σε υψηλότερου επιπέδου, τα δεδομένα στέλνονται άμεσα στον BS [38].



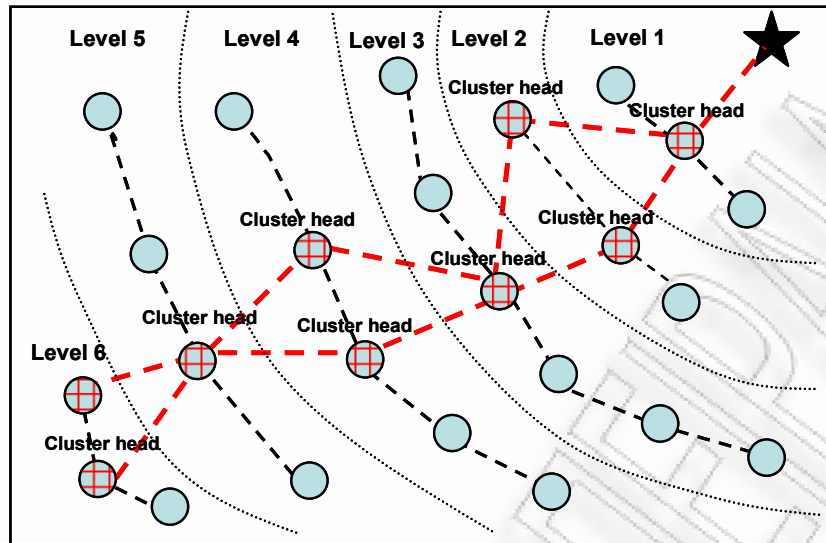
Εικόνα 35: Μετάδοση δεδομένων [38]

Τα πειραματικά αποτελέσματα καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το ομόκεντρο σχέδιο συγκέντρωσης παρέχει περίπου 35% λιγότερη κατανάλωση ενέργειας έναντι του πρωτοκόλλου PEGASIS [38].

#### Μέθοδος δρομολόγησης με διαμόρφωση διαμαντιού για την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων (Diamond-Shaped (D-S))

Το PEGASIS με διαμόρφωση διαμάντι (εικόνα 36 [39]) είναι βελτίωση πέρα από το ομόκεντρο σχέδιο συγκέντρωσης για να διαβιβαστούν τα στοιχεία αξιόπιστα. Αυτό το πρωτόκολλο είναι πολύ κοντά στο ομόκεντρο σχέδιο συγκέντρωσης εκτός από ότι κάθε εναλλασσόμενο ομόκεντρο επίπεδο συστάδων έχει 2 επικεφαλής κόμβους αντί του ενός. Τα επίπεδα με τους δύο επικεφαλής κόμβους συλλέγουν τα δεδομένα και τα στέλνουν στη χαμηλότερου επιπέδου συστάδα που αποτελείται από έναν επικεφαλής κόμβο. Τα επίπεδα που αποτελούνται από έναν επικεφαλής κόμβο στέλνουν τα δεδομένα τους στην επόμενη συστάδα επιπέδων που αποτελείται από 2 επικεφαλής κόμβους. Έτσι και οι δύο κόμβοι λαμβάνουν το ίδιο αντίγραφο των στοιχείων [39].

Το ποσοστό λάθους στην παράδοση πακέτων μειώθηκε καθώς παραλαμβάνονται περισσότερα αντίγραφα των στοιχείων και το δίκτυο επεκτείνει τη διάρκεια ζωής [39].



Εικόνα 36: Σχηματισμός του σχήματος διαμαντιού στο D-S PEGASIS [39]

Ένα προσανατολισμένο σε αλυσίδα δίκτυο αισθητήρων για την αποδοτική συλλογή δεδομένων (COSEN)

Το COSEN [40] λειτουργεί σε δύο βήματα:

Στάδιο δημιουργίας αλυσίδας: Στο στάδιο σχηματισμού αλυσίδας διάφορες χαμηλότερου επιπέδου και υψηλότερου επιπέδου αλυσίδες διαμορφώνονται. Κάθε αλυσίδα επιπέδου έχει επικεφαλής κόμβο. Κάθε αλυσίδα είναι καθορισμένου μήκους. Εάν υπάρχουν  $N$  κόμβοι στο δίκτυο,  $C$  κόμβοι αποτελούν μια αλυσίδα και ένας αριθμός  $N/C$  αλυσίδων υπάρχουν στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της φάσης σχηματισμού αλυσίδων εάν μια αλυσίδα υπερβαίνει τους  $C$  κόμβους, τότε ένας νέος σχηματισμός αλυσίδας αρχίζει. Αντίθετα από PEGASIS ο επικεφαλής κόμβος επιλέγεται βάσει των υψηλότερων ενεργειακών κόμβων. Για να αποφεύγει πάρα πολλή επικοινωνία, και για να αποφεύγει το χρόνο να επιλεγεί ο επικεφαλής σε κάθε κύκλο, τα πρωτόκολλα COSEN δεν αλλάζουν τον επικεφαλής πολύ συχνά. Κάθε  $N/C$  γύρο νέος επικεφαλής κόμβος επιλέγεται. Μόλις επιλεγεί ο επικεφαλής για τη χαμηλότερου επιπέδου αλυσίδα, η υψηλότερου επιπέδου αλυσίδα διαμορφώνεται και ο υψηλότερου επιπέδου επικεφαλής επιλέγεται. Για τον υψηλότερου επιπέδου επικεφαλής, σε απόσταση από τον BS, η ενέργεια των κόμβων και οι κόμβοι που δεν είναι επιλεγμένοι επικεφαλής για τον τελευταίο  $N/C$  κύκλο. Όταν 20% των κόμβων πεθαίνει οι αλυσίδες αναδημιουργούνται πάλι [40].

Φάση συλλογής δεδομένων: Ο επικεφαλής κόμβος αρχίζει την έναρξη της συλλογής δεδομένων με τη διάβαση ενός token στον τελευταίο κόμβο στην αλυσίδα. Κάθε κόμβος αρχίζει να συλλέγει τα δεδομένα και να τα περνά στον επόμενο κόμβο. Ο επικεφαλής κόμβος συλλέγει τα δεδομένα και τα διαβιβάζει στον επικεφαλής κόμβο στην αλυσίδα υψηλότερου επιπέδου. Όταν ο υψηλότερου επιπέδου επικεφαλής παίρνει τις πληροφορίες συλλέγει τις πληροφορίες και στέλνει τα στοιχεία στον BS [40].

### 3.5.3 Ιεραρχικό PEGASIS (Hierarchical PEGASIS)

Το ιεραρχικό PEGASIS [17] είναι μια βελτίωση του αρχικού PEGASIS προκειμένου να μειωθεί η καθυστέρηση που παρατηρείται από τις διαδοχικές μεταδόσεις και να παρέχει την δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλο δίκτυο αισθητήρων. Η καθυστέρηση για μια μετάδοση πακέτων (υποθέτουμε ότι όλα τα πακέτα είναι μεγέθους 2000 bit) οφείλεται στο χρόνο μετάδοσης δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία καθυστέρηση αναμονής και οι καθυστερήσεις επεξεργασίας και διάδοσης είναι αμελητέες έναντι του χρόνου μετάδοσης. Με το άμεσο σχέδιο μετάδοσης, οι κόμβοι θα πρέπει να διαβιβάζουν στο σταθμό βάσης, ένας κάθε φορά, που δημιουργεί καθυστέρηση συνολικά  $N$  μονάδες όπου  $N$  ο αριθμός των κόμβων (1 μονάδα ανά μετάδοση). Το σχέδιο βασισμένο στη γραμμική αλυσίδα, αν και ενεργειακά αποδοτικό, θα απαιτήσει επίσης  $N$  μονάδες καθυστέρησης καθώς οι μεταδόσεις είναι διαδοχικές. Για να μειώσει την καθυστέρηση, κάποιος πρέπει να εκτελέσει ταυτόχρονες μεταδόσεις. Η καλή γνωστή

προσέγγιση της χρησιμοποίησης ενός δυαδικού σχεδίου για να συνδυαστούν τα στοιχεία από  $N$  κόμβους παράλληλα θα πάρει  $N$  μονάδες καθυστέρησης, αν και προκύπτει ένα αυξανόμενο ενεργειακό κόστος. Το  $\text{Energy} \cdot \text{Delay}$  είναι μια ενδιαφέρουσα παράμετρος για να βελτιστοποιηθεί ανά γύρο συλλογής δεδομένων.

Οι ταυτόχρονες ασύρματες επικοινωνίες μεταξύ ζευγαριών κόμβων είναι δυνατές μόνο εάν υπάρχει ελάχιστη παρέμβαση μεταξύ των διαφορετικών μεταδόσεων. Η τεχνολογία CDMA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτύχει τις πολλαπλάσιες ταυτόχρονες ασύρματες μεταδόσεις με τη χαμηλή παρέμβαση. Εάν οι κόμβοι αισθητήρων είναι CDMA, τότε είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί το δυαδικό σχέδιο και να εκτελεστούν παράλληλες επικοινωνίες για να μειωθεί η γενική καθυστέρηση. Εντούτοις, το ενεργειακό κόστος μπορεί να αυξηθεί ελαφρώς δεδομένου ότι θα υπάρξει ακόμα μια παρέμβαση μικρής ποσότητας από άλλες απρομελέτητες μεταδόσεις. Εναλλακτικά, με ένα ενιαίο κανάλι και τους κόμβους να μην υποστηρίζουν CDMA, οι ταυτόχρονες μεταδόσεις είναι δυνατές μόνο μεταξύ κόμβων χωρισμένων στο χώρο. Δεδομένου ότι τα ενεργειακά κόστη και η καθυστέρηση ανά μετάδοση για αυτούς τους δύο τύπους κόμβων είναι αρκετά διαφορετικά, θα εξετάσουμε τη  $\text{energy} \cdot \text{delay}$  μείωση για το πρόβλημα συλλογής δεδομένων χωριστά για αυτές τις δύο περιπτώσεις.

Στο [17] παρουσιάζονται δύο παραλλαγές για το πρωτόκολλο: μια βασισμένη σε αλυσίδα δυαδικό πρωτόκολλο συνδυασμού που χρησιμοποιεί κόμβους CDMA και ένα πρωτόκολλο 3 επιπέδων ιεραρχίας με κόμβους χωρίς CDMA. Μια αλυσίδα διαμορφώνεται μεταξύ των κόμβων αισθητήρων και στα δύο πρωτόκολλα έτσι ώστε κάθε κόμβος να λάβει από και να διαβιβάσει σε έναν στενό γείτονα στο χαμηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας. Τα συγκεντρωμένα στοιχεία κινούνται από κόμβο σε κόμβο, συγχωνεύονται και τελικά ένας συγκεκριμένος κόμβος τα διαβιβάζει στον BS. Οι κόμβοι αναλαμβάνουν εκ περιτροπής τη διαβίβαση στον BS έτσι ώστε η μέση ενέργεια που ξοδεύεται από κάθε κόμβο ανά γύρο να μειώνεται. Το δυαδικό σχέδιο έχει μια ιεραρχία του  $\log N$ , με το  $N$  ίσο με τον αριθμό των κόμβων. Το δυαδικό σχέδιο επομένως θα είχε μια καθυστέρηση  $7 + 1$  (για τη διαβίβαση στο σταθμό βάσης) για 100 κόμβους και αποδίδει καλύτερα από το LEACH κατά έναν παράγοντα 8. Το πρωτόκολλο 3 επιπέδων ιεραρχίας βασισμένο σε αλυσίδα έχει μια υψηλότερη καθυστέρηση αλλά είναι καλύτερο από το δυαδικό σχέδιο με τους κόμβους μη-CDMA. Αυτό επειδή στο δυαδικό σχέδιο υπάρχουν πολλές κοντινές ταυτόχρονες μεταδόσεις στα χαμηλότερα επίπεδα και η παρέμβαση θα είναι πολύ υψηλή. Στο τριών επιπέδων σχέδιο, πραγματοποιούνται οι λιγότερες και οι πιο απόμακρες ταυτόχρονες μεταδόσεις προκαλώντας τη λιγότερη παρέμβαση. Αυτό το τριών επιπέδων ιεραρχίας πρωτόκολλο βασισμένο σε αλυσίδα αποδίδει καλύτερα από το άμεσο σχέδιο από έναν παράγοντα περίπου 60.

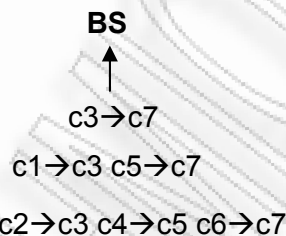
### 3.5.3.1 Δυαδική προσέγγιση βασισμένη σε αλυσίδα με τη χρήση CDMA

Αρχικά, στο [17] εξετάστηκε ένα δίκτυο αισθητήρων με κόμβους ικανούς για επικοινωνία CDMA. Με αυτό το σύστημα CDMA, είναι δυνατό τα ζευγάρια κόμβων που επικοινωνούν με τους ευδιάκριτους κώδικες χρήσης να ελαχιστοποιήσουν την παρεμβολή. Κατά συνέπεια, η παράλληλη επικοινωνία είναι δυνατή με 50 ζευγάρια για το δίκτυο των 100 κόμβων. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση, συνδυάστηκαν τα στοιχεία χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερα ζευγάρια σε κάθε επίπεδο που οδηγεί σε μια ιεραρχία  $\log N$  επιπέδων. Στο χαμηλότερο επίπεδο, κατασκευάστηκε μια γραμμική αλυσίδα μεταξύ όλων των κόμβων, όπως έγινε στον PEGASIS, έτσι ώστε οι παρακείμενοι κόμβοι στην αλυσίδα να είναι κοντινοί. Για την κατασκευή της αλυσίδας, υιοθετήθηκε ότι όλοι οι κόμβοι έχουν συνολική γνώση του δικτύου και υιοθετούν τον άπληστο αλγόριθμο. Η άπληστη προσέγγιση στην κατασκευή της αλυσίδας λειτουργεί καλά, και αυτό γίνεται πριν από τον πρώτο κύκλο της επικοινωνίας. Για να κατασκευαστεί η αλυσίδα, αρχίζει με τον πιο απόμακρο κόμβο από τον BS. Αρχίζει με αυτόν τον κόμβο προκειμένου να σιγουρευτεί ότι οι κόμβοι μακριά από τον BS έχουν κοντινούς γείτονες. Όπως στον άπληστο αλγόριθμο οι αποστάσεις γειτόνων θα αυξηθούν βαθμιαία δεδομένου ότι οι κόμβοι ήδη στην αλυσίδα δεν μπορούν να επισκεφθούν ξανά.

Για τη συγκέντρωση των δεδομένων σε κάθε κύκλο, κάθε κόμβος διαβιβάζει σε έναν κοντινό γείτονα σε ένα δεδομένο επίπεδο της ιεραρχίας. Αυτό συμβαίνει σε κάθε επίπεδο στην ιεραρχία, αλλά η μόνη διαφορά είναι ότι οι κόμβοι που λαμβάνουν σε κάθε επίπεδο είναι οι μόνοι κόμβοι που ανέρχονται στο επόμενο επίπεδο. Τέλος, κορυφαίος ο μόνος κόμβος που παραμένει θα είναι ο επικεφαλής και αυτός που θα διαβιβάσει το μήνυμα των 2000bit στον BS.



Σημειώστε ότι κόμβος  $i$  θα είναι σε κάποια τυχαία θέση  $j$  στην αλυσίδα. Οι κόμβοι αναλαμβάνουν εκ περιτροπής να διαβιβάσουν στο BS και χρησιμοποιήθηκε ο κόμβος  $i \bmod N$  (το  $N$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό κόμβων) για να διαβιβάσει στο BS στο γύρο  $i$ . Στη εικόνα 37, για το γύρο 3, ο κόμβος  $c3$  είναι ο επικεφαλής. Δεδομένου ότι, ο κόμβος  $c3$  είναι σε θέση 3 (μετρώντας από το 0) στην αλυσίδα, όλοι οι κόμβοι σε μια άρτια σε αριθμό θέση θα στείλουν στο δεξιό γείτονά τους. Τώρα στο επόμενο επίπεδο, ο κόμβος  $c3$  είναι ακόμα σε περιπτή θέση και πάλι, όλοι οι κόμβοι σε μια άρτια θέση θα συγχωνέψουν τα στοιχεία τους με τα λαμβανόμενα στοιχεία και θα τα στείλουν στον δεξιό τους. Στο τρίτο επίπεδο, ο κόμβος  $c3$  δεν είναι σε περιπτή θέση, έτσι ο κόμβος  $c7$  θα συγχωνέψει τα στοιχεία του και θα τα διαβιβάσει στο  $c3$ . Τέλος, ο κόμβος  $c3$  θα συνδυάσει τα τρέχοντα στοιχεία του με αυτά που παραλαμβάνει από τον  $c7$  και θα διαβιβάσει το μήνυμα στον BS. Το βασισμένο στην αλυσίδα δυαδικό σχέδιο εκτελεί την συγχώνευση στοιχείων σε κάθε κόμβο που διαβιβάζει εκτός από τους τελικούς κόμβους σε κάθε επίπεδο. Κάθε κόμβος θα συγχωνεύσει τα στοιχεία του γείτονά του με τα δικά του για να παράγει ένα ενιαίο πακέτο του ίδιου μήκους και να διαβιβάσει έπειτα αυτό στον επόμενο κόμβο. Στο παραπάνω παράδειγμα, ο κόμβος  $c0$  θα περάσει τα στοιχεία του στον κόμβο  $c1$ . Ο κόμβος  $c1$  λιώνει τα στοιχεία του κόμβου  $c0$  με τα δικά του και τα διαβιβάζει έπειτα στον κόμβο  $c3$  στο επόμενο επίπεδο. Στις προσομοιώσεις του [17], εξασφαλίστηκε ότι κάθε κόμβος εκτελεί ίσο αριθμό αποστολών και λήψεων μετά από  $N$  κύκλους επικοινωνίας, και κάθε κόμβος διαβιβάζει στο BS σε έναν από τους κύκλους  $N$ . Υπολογίζεται έπειτα το μέσο ενεργειακό κόστος ανά γύρο, ενώ το κόστος καθυστέρησης είναι το ίδιο για κάθε κύκλο.



Εικόνα 37: Συγκέντρωση δεδομένων σε ένα βασισμένο σε αλυσίδα δυαδικό σχέδιο [17]

Το βασισμένο στην αλυσίδα δυαδικό σχέδιο βελτιώνεται στο LEACH με τη διάσωση της ενέργειας και της καθυστέρησης σε διάφορα στάδια. Στα χαμηλότερα επίπεδα, οι κόμβοι διαβιβάζουν στις πιο κοντινές αποστάσεις έναντι των κόμβων που διαβιβάζουν σε έναν επικεφαλής συστάδας στο πρωτόκολλο LEACH, και μόνο ένας κόμβος διαβιβάζει στον BS σε κάθε κύκλο της επικοινωνίας. Επιτρέποντας στους κόμβους να διαβιβάσουν ταυτόχρονα, το κόστος καθυστέρησης για το δυαδικό σχέδιο μειώνεται από αυτό του LEACH από έναν παράγοντα περίπου 3.

Ενώ στο LEACH, μόνο 5 ομάδες μπορούν να διαβιβάσουν ταυτόχρονα, εδώ σε κάθε επίπεδο, έχουμε πολλαπλούς κόμβους να διαβιβάσουν ταυτόχρονα. Σε κάθε επίπεδο του δυαδικού σχεδίου, οι μεταδόσεις είναι ταυτόχρονες δημιουργώντας συνολική καθυστέρηση  $\log N + 1$  για τη διαβίβαση στον BS. Στο LEACH, η καθυστέρηση για δίκτυο 100 κόμβων θα είναι 27 μονάδες. Η καθυστέρηση για όλους τους κόμβους που διαβιβάζουν στον επικεφαλής συστάδας είναι ο μέγιστος αριθμός κόμβων σε οποιοδήποτε από τις 5 συστάδες. Εάν όλες οι συστάδες είναι του ίδιου μεγέθους, τότε η καθυστέρηση θα ήταν 19. Κατόπιν και οι 5 επικεφαλής συστάδες πρέπει να αναλάβουν εκ περιτροπής να διαβιβάσουν στον BS, που κάνουν την συνολική καθυστέρηση 24 μονάδες. Για τους υπολογισμούς της επιπλέον κυκλοφορίας, έχουμε 1 μονάδα καθυστέρησης για το σχηματισμό συστάδων, 1 μονάδα καθυστέρησης για όλους τους κόμβους για να μεταδώσουν στον επικεφαλής συστάδας την παρουσία τους σε εκείνη την συστάδα, και τελικά 1 μονάδα καθυστέρησης για τον επικεφαλής συστάδας για να μεταδώσει ένα πρόγραμμα TDMA στους κόμβους έτσι ώστε οι κόμβοι να ξέρουν πότε να μεταδώσουν στον επικεφαλής συστάδας.

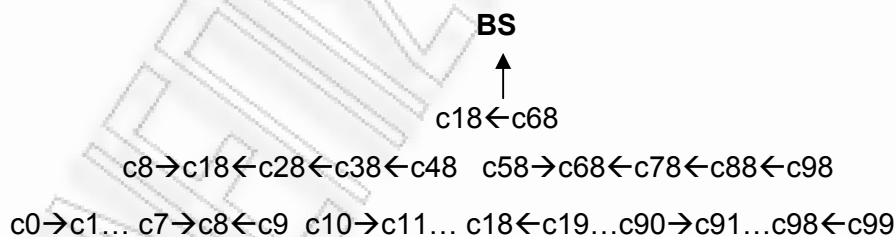
### 3.5.3.2 Τριών επιπέδων βασισμένο σε αλυσίδα σχήμα χωρίς CDMA

Η χρήση CDMA μπορεί να μην ισχύσει για όλα τα δίκτυα αισθητήρων καθώς αυτοί οι κόμβοι μπορεί να είναι ακριβοί. Επομένως, χρειάζεται ένα πρωτόκολλο που θα επιτύχει ελάχιστο  $\text{energy} \cdot \text{delay}$  με τους κόμβους μη-CDMA. Δεν θα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί το δυαδικό

σχέδιο σε αυτήν την περίπτωση δεδομένου ότι η παρεμβολή θα είναι πάρα πολύ σε χαμηλότερα επίπεδα. Είτε πρέπει να αυξηθεί το ενεργειακό κόστος σημαντικά είτε να ληφθούν περισσότερα χρονικά βήματα σε χαμηλότερα επίπεδα της ιεραρχίας και τα δύο από τα οποία θα οδηγήσουν σε πολύ υψηλότερο energy\*delay κόστος. Επομένως, προκειμένου να βελτιωθεί το energy\*delay χρειάζεται ένα πρωτόκολλο που θα επιτρέπει τις ταυτόχρονες μεταδόσεις που είναι μακριά για να ελαχιστοποιήσει την παρέμβαση επιτυγχάνοντας λογικό κόστος καθυστέρησης.

Με βάση τα πειράματα στο [17], προτάθηκε το βασισμένο στην αλυσίδα σχέδιο τριών επιπέδων για τη συλλογή δεδομένων στα δίκτυα αισθητήρων με τους κόμβους μη-CDMA. Το τριών επιπέδων σχέδιο αρχίζει με τη γραμμική αλυσίδα μεταξύ όλων των κόμβων και τους διαιρεί σε 10 ομάδες. Στο δίκτυο 100 κόμβων, επομένως, μόνο 10 ταυτόχρονες μεταδόσεις πραγματοποιούνται συγχρόνως, και η συγχώνευση στοιχείων πραγματοποιείται σε κάθε κόμβο (εκτός από τους τελικούς κόμβους σε κάθε επίπεδο). Οι μεταδόσεις είναι επίσης αρκετά μακρινές χώρια ότι υπάρχει ελάχιστη παρέμβαση. Η εικόνα 38 του [17] παρουσιάζει ένα παράδειγμα αυτού του σχεδίου με 100 κόμβους. Εδώ έχουμε 10 ομάδες των 10. Θα υπάρχει ένας διαφορετικός επικεφαλής που θα διαβιβάζει στον BS σε κάθε κύκλο για να διανείμει ομοίμορφα το φόρτο εργασίας μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Βρίσκουμε τον δείκτη  $i$  που αντιπροσωπεύει την θέση του επικεφαλής modulo 10. Στην εικόνα 38, c18 είναι ο ηγέτης.

Στην εικόνα 38, ο c18 είναι ο επικεφαλής, τότε όλοι οι κόμβοι θα στείλουν τα δεδομένα τους στην κατεύθυνση με δείκτη 8 μέσα στην ομάδα τους δεδομένου ότι  $18 \text{ modulo } 10$  είναι 8. Η καθυστέρηση στο πρώτο επίπεδο είναι 9 μονάδες. Κατόπιν το δεύτερο επίπεδο θα περιέχει τους κόμβους c8, c18, c28... c98. Αυτοί οι 10 κόμβοι θα διαιρεθούν σε δύο ομάδες. Δεδομένου ότι η θέση του επικεφαλής είναι 18, όλοι οι κόμβοι που είναι στην πρώτη ομάδα θα στείλουν κάτω στην αλυσίδα 10 θέσεις από τη θέση τους στην αλυσίδα. Έτσι ο κόμβος c48 θα στείλει στον κόμβο c38, και ο κόμβος c38 θα στείλει στον κόμβο c28 και ούτω καθεξής. Δεδομένου ότι η θέση του κόμβου c8 είναι λιγότερο από τον κόμβο c18, ο κόμβος c8 θα διαβιβάσει σε μια θέση που είναι 10 μεγαλύτερη από την δική του. Στην ομάδα 2, οι κόμβοι ξέρουν σε ποια κατεύθυνση να στείλουν τα δεδομένα χρησιμοποιώντας τη θέση του επικεφαλής+ 50. Έτσι εδώ, οι κόμβοι στην ομάδα 2 θα στείλουν στην κατεύθυνση του κόμβου c68 με τον ίδιο τρόπο όπως στην ομάδα 1. Αυτό μας δίνει μια καθυστέρηση 4 μονάδων για το δεύτερο επίπεδο. Στο τρίτο επίπεδο, ο κόμβος c68 διαβιβάσει στον κόμβο c18, και έπειτα τελικά ο κόμβος c18 διαβιβάσει στο σταθμό βάσης, που μας δίνει μια συνολική καθυστέρηση 15 μονάδων. Το πρόγραμμα μετάδοσης μπορεί να προγραμματιστεί μια φορά στην αρχή έτσι ώστε όλοι οι κόμβοι να ξέρουν πού να σταλούν τα δεδομένα σε κάθε κύκλο επικοινωνίας.



Εικόνα 38: Βασισμένο σε αλυσίδα τριών επιπέδων σχήμα χωρίς τη χρήση CDMA [17]

### 3.5.3.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Σύμφωνα με το [17] τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Το βασισμένο στην αλυσίδα δυαδικό σχέδιο είναι περίπου 8x καλύτερα από το LEACH και 130x καλύτερα από άμεσο για 50m X 50m δίκτυο από την άποψη της energy\* delay για τα δίκτυα αισθητήρων με τους κόμβους CDMA.
- Το βασισμένο στην αλυσίδα δυαδικό σχέδιο είναι περίπου 12x καλύτερα από το LEACH και 280x καλύτερα από άμεσο για ένα 100m X 100m δίκτυο από την άποψη energy\*delay για τα δίκτυα αισθητήρων με τους κόμβους CDMA.
- Το βασισμένο στην αλυσίδα σχέδιο 3 επιπέδων είναι περίπου 4 φορές καλύτερο από PEGASIS και 60 φορές καλύτερο από άμεσο για 50m X 50m δίκτυο από την άποψη energy\*delay για τα δίκτυα αισθητήρων με τους κόμβους μη-CDMA.

- Το βασισμένο στην αλυσίδα σχέδιο 3 επιπέδων είναι περίπου 4 φορές καλύτερο από PEGASIS και 140 φορές καλύτερο από το άμεσο για ένα 100m X 100m δίκτυο από την άποψη  $energy \cdot delay$  για τα δίκτυα αισθητήρων με τους κόμβους μη-CDMA.
- Ένας ισορροπημένος ενεργειακός διασκεδασμός μεταξύ των κόμβων αισθητήρων για να έχει την πλήρη χρήση του πλήρους δικτύου αισθητήρων.

### 3.5.4 Πρωτόκολλο TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

Το TEEN [18] (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) είναι ένα νέο πρωτόκολλο δικτύου. Στοχεύει στα αντιδραστικά δίκτυα και είναι το πρώτο πρωτόκολλο που αναπτύσσεται για τα αντιδραστικά δίκτυα, απ' ό, τι ξέρουμε.

Στα αντιδραστικά δίκτυα οι κόμβοι αντιδρούν αμέσως στις ξαφνικές και δραστικές αλλαγές στην τιμή μιας ανιχνεύσιμης ιδιότητας. Υπό αυτήν τη μορφή, είναι καλοταίριασμένα για τις χρονικά κρίσιμες εφαρμογές.

#### 3.5.4.1 Λειτουργία

Σε αυτό το πρωτόκολλο, σε κάθε χρόνο αλλαγής συστάδων, ο επικεφαλής συστάδας μεταδίδει στα μέλη του τα παρακάτω:

Χαρακτηριστικά (A): Αυτό είναι ένα σύνολο φυσικών παραμέτρων για τις οποίες ο χρήστης ενδιαφέρεται για τη λήψη των δεδομένων.

Σκληρό κατώτατο όριο ( $H_T$ ): Αυτό είναι μια τιμή κατώτατου ορίου για τις ανιχνεύσιμες ιδιότητες. Είναι η απόλυτη τιμή των ιδιοτήτων πέρα από την οποία, ο κόμβος που ανιχνεύει αυτήν την τιμή πρέπει να ανάψει τη συσκευή αποστολής σημάτων του και να υποβάλει αναφορά στον επικεφαλής συστάδας του.

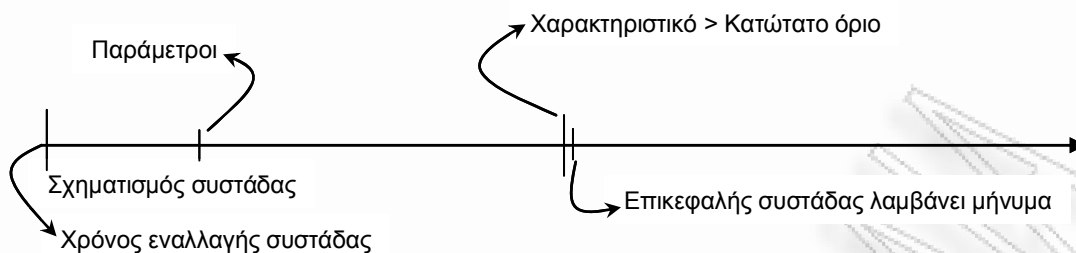
Μαλακό κατώτατο όριο ( $S_T$ ): Αυτό είναι μια μικρή αλλαγή στην τιμή της ανιχνεύσιμης ιδιότητας που προκαλεί τον κόμβο για να ανάψει τη συσκευή αποστολής σημάτων της και να διαβιβάσει.

Οι κόμβοι αισθάνονται το περιβάλλον τους συνεχώς. Ο πρώτος χρόνος μια παράμετρος από το σύνολο ιδιοτήτων φθάνει στη τιμή του σκληρού κατώτατου ορίου, ο κόμβος ανάβει τη συσκευή αποστολής σημάτων του και στέλνει τα ανιχνεύσιμα δεδομένα. Η ανιχνεύσιμη τιμή αποθηκεύεται σε μια εσωτερική μεταβλητή στον κόμβο, αποκαλούμενο ανιχνεύσιμη τιμή (sensed value – SV). Οι κόμβοι θα διαβιβάσουν έπειτα τα δεδομένα στην τρέχουσα περίοδο συστάδων, μόνο όταν και οι δύο ακόλουθοι όροι ισχύσουν:

- Η τρέχουσα τιμή των ανιχνεύσιμων ιδιοτήτων είναι μεγαλύτερη από το σκληρό κατώτατο όριο.
- Η τρέχουσα τιμή των ανιχνεύσιμων ιδιοτήτων διαφέρει από το SV κατά ένα ποσό ίσο με ή μεγαλύτερο από το μαλακό κατώτατο όριο.

Όποτε ένας κόμβος διαβιβάζει δεδομένα, το SV τίθεται ίσο με την τρέχουσα τιμή των ανιχνεύσιμων ιδιοτήτων.

Κατά συνέπεια, το σκληρό κατώτατο όριο προσπαθεί να μειώσει τον αριθμό μεταδόσεων επιτρέποντας στους κόμβους να διαβιβάσουν μόνο όταν η ανιχνεύσιμη ιδιότητα είναι στο πεδίο ενδιαφέροντος. Το μαλακό κατώτατο όριο μειώνει περαιτέρω τον αριθμό μεταδόσεων με την εξαίρεση όλων των μεταδόσεων που μπορεί να έχουν εμφανιστεί όταν υπάρχει ελάχιστη ή καμία αλλαγή στις ανιχνεύσιμες ιδιότητες.



Εικόνα 39: Χρονική γραμμή για το TEEN [18]

### 3.5.4.2 Σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα

Τα σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του TEEN παρουσιάζονται παρακάτω:

- Τα χρονικά κρίσιμα δεδομένα φθάνουν στο χρήστη σχεδόν στιγμιαία. Έτσι, αυτό το πρωτόκολλο είναι κατεξοχήν ταιριασμένο για χρονικά κρίσιμες εφαρμογές αντίληψης δεδομένων.
- Η μετάδοση μηνυμάτων καταναλώνει πολύ περισσότερη ενέργεια από την ανίχνευση δεδομένων. Έτσι, ακόμα κι αν οι κόμβοι αισθάνονται συνεχώς, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί ενδεχομένως να είναι πολλή λιγότερη απ' ό, τι στο δυναμικό δίκτυο, επειδή η μετάδοση στοιχείων γίνεται λιγότερο συχνά.
- Το μαλακό κατώτατο όριο μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με την κρισιμότητα των ανιχνεύσιμων ιδιοτήτων και της εφαρμογής.
- Μια μικρότερη αξία του μαλακού κατώτατου ορίου δίνει μια ακριβέστερη εικόνα του δικτύου, εις βάρος της αυξανόμενης κατανάλωσης ενέργειας. Κατά συνέπεια, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει τη σχέση μεταξύ της ενεργειακής αποδοτικότητας και της ακρίβειας των δεδομένων.
- Σε κάθε χρόνο αλλαγής συστάδων, οι ιδιότητες μεταδίδονται εκ νέου και έτσι, ο χρήστης μπορεί να τις αλλάξει αν απαιτείται.

Το κύριο μειονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι, εάν δεν επιτυγχάνονται τα κατώτατα όρια, οι κόμβοι δεν θα επικοινωνήσουν ποτέ και ο χρήστης δεν θα πάρει οποιαδήποτε δεδομένα από το δίκτυο καθόλου και δεν θα ξέρει ακόμα κι αν όλοι οι κόμβοι πεθαίνουν. Κατά συνέπεια, αυτό το σχέδιο δεν ταιριάζει σε εφαρμογές όπου ο χρήστης πρέπει να πάρει τα δεδομένα σε κανονική βάση.

Ένα άλλο πιθανό πρόβλημα με αυτό το πρωτόκολλο είναι ότι μια πρακτική εφαρμογή θα έπρεπε να εξασφαλίσει ότι δεν υπάρχει καμία σύγκρουση στη συστάδα. Ο σχεδιασμός TDMA των κόμβων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποφύγει αυτό το πρόβλημα. Αυτό εντούτοις θα εισαγάγει μια καθυστέρηση στην υποβολή έκθεσης των χρόνο-κρίσιμων δεδομένων. Το CDMA είναι μια άλλη πιθανή λύση σε αυτό το πρόβλημα.

### 3.5.5 APTEEN (Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

Το πρωτόκολλο αυτό αποτελεί την εξέλιξη του TEEN και χρησιμοποιεί μια υβριδική λειτουργία όπου τα δεδομένα αποστέλλονται και όταν υπάρχει ανίχνευση του γεγονότος και κατά την αποστολή περιοδικών καταστάσεων.

Στο APTEEN [19] μόλις αποφασιστούν οι CHs, σε κάθε περίοδο συστάδων, ο επικεφαλής συστάδας μεταδίδει αρχικά τις ακόλουθες παραμέτρους:

**Ιδιότητες (A):** Αυτό είναι ένα σύνολο φυσικών παραμέτρων για τις οποίες ο χρήστης ενδιαφέρεται για τη λήψη των στοιχείων.

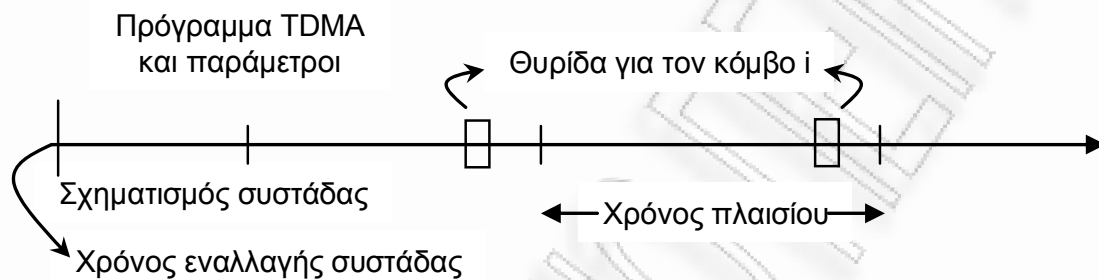
**Κατώτατα όρια:** Αυτή η παράμετρος αποτελείται από ένα σκληρό κατώτατο όριο ( $H_T$ ) και ένα μαλακό κατώτατο όριο ( $S_T$ ). Το  $H_T$  είναι μια ιδιαίτερη τιμή μιας ιδιότητας πέρα από την οποία ένας κόμβος μπορεί να προκληθεί για να διαβιβάσει τα στοιχεία. Το  $S_T$  είναι μια μικρή αλλαγή

στην τιμή μιας ιδιότητας που μπορεί να προκαλέσει έναν κόμβο για να διαβιβάσει τα στοιχεία πάλι.

Πρόγραμμα εκπομπής: Αυτό είναι ένα πρόγραμμα TDMA παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στο [15], ορίζοντας μια χρονοσχισμή σε κάθε κόμβο.

Χρόνος αρίθμησης ( $T_c$ ): Είναι το μέγιστο χρονικό διάστημα δύο διαδοχικών εκθέσεων που στέλνονται μεταξύ από έναν κόμβο. Μπορεί να είναι ένα πολλαπλάσιο του μήκους προγράμματος TDMA και αποτελεί το δυναμικό συστατικό.

Σε ένα δίκτυο αισθητήρων, οι πολύ κοντινοί κόμβοι εμπίπτουν στην ίδια συστάδα, ανιχνεύουν παρόμοια στοιχεία και προσπαθούν να στείλουν τα στοιχεία τους ταυτόχρονα, προκαλώντας πιθανές συγκρούσεις. Εισάγετε ένα πρόγραμμα TDMA έτσι ώστε σε κάθε κόμβο στη συστάδα να ορίζεται μια χρονοσχισμή μετάδοσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 40 από το [19].



Εικόνα 40: Χρονική γραμμή για το APTEEN [19]

### 3.5.5.1 Σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα

Τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα του πρωτοκόλλου APTEEN είναι:

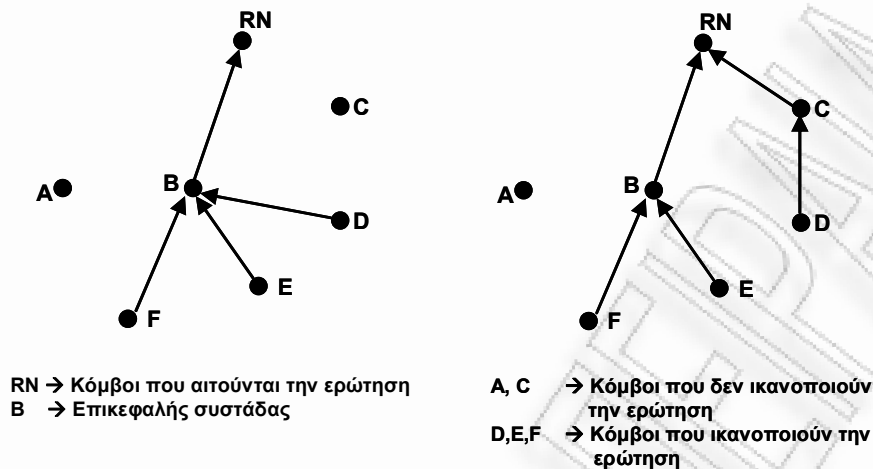
- Με την αποστολή περιοδικών δεδομένων, δίνεται στο χρήστη μια πλήρη εικόνα του δικτύου. Αναπαράγεται επίσης αμέσως στις δραστικές αλλαγές, καθιστώντας το κατά συνέπεια άμεσο στις χρονικές κρίσιμες καταστάσεις. Κατά συνέπεια, συνδυάζει και τις δυναμικές και παθητικές πολιτικές.
- Προσφέρει μια ευελιξία επιτρέποντας στο χρήστη να θέτει το χρονικό διάστημα ( $T_c$ ) και τις τιμές των κατώτατων ορίων για τις ιδιότητες.
- Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να ελεγχθεί από το χρόνο αρίθμησης και τις τιμές των κατώτατων ορίων.
- Το υβριδικό δίκτυο μπορεί να μιμηθεί ένα δυναμικό δίκτυο ή ένα παθητικό δίκτυο, με κατάλληλη ρύθμιση του χρόνου αρίθμησης και τις τιμές των κατώτατων ορίων.

Το κύριο μειονέκτημα αυτού του σχεδίου είναι η πρόσθετη πολυπλοκότητα που απαιτείται για να εφαρμόσει τις λειτουργίες των κατώτατων ορίων και το χρόνο αρίθμησης. Εντούτοις, αυτό είναι μια λογική ανταλλαγή και παρέχει πρόσθετη ευελιξία και μεταβλητότητα.

### 3.5.5.2 Διαμόρφωση ερώτησης

Για να χειριστούμε τις ερωτήσεις αποτελεσματικά σε ένα δίκτυο, με τις εκατοντάδες και χιλιάδες αισθητήρες, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε δύο πιθανές εναλλακτικές λύσεις: μια επίπεδη τοπολογία και μια βασισμένη στη συστάδα προσέγγιση. Σε μια επίπεδη τοπολογία, κάθε κόμβος που ικανοποιεί τους όρους ερώτησης πρέπει χωριστά να στείλει τα στοιχεία στον κόμβο αίτησης. Στην καλύτερη περίπτωση, μερικοί ενδιάμεσοι κόμβοι μπορούν να κάνουν κάποια συνάθροιση, όπως φαίνεται στην εικόνα 41 [19]. Σε μια ιεραρχική συστάδα, μόνο ο επικεφαλής συστάδας (ΕΣ) πρέπει να αθροίσει και έτσι φαίνεται αποδοτικότερο. Αυτό είναι το σχέδιο που χρησιμοποιείται στο πρωτόκολλο APTEEN. Εάν υποθεθεί ότι οι παρακείμενοι κόμβοι μπορούν να αισθανθούν παρόμοια δεδομένα, μπορεί να διαμορφωθούν ζευγάρια δύο κόμβων και να κάνουν μόνο έναν κόμβο από κάθε ζευγάρι να αποκριθεί σε μια ερώτηση. Ο άλλος κόμβος μπορεί να πάει σε έναν τρόπο «ύπνου» και να μην χρειαστεί να λάβει την ερώτηση. Κατά

συνέπεια, δύο κόμβοι μπορούν διαδοχικά να πάρουν το ρόλο του χειρισμού ερωτήσεων εάν υπάρχουν κόμβοι αρκετά στενοί να διαμορφώσουν ζευγάρια.



Εικόνα 41: Σύγκριση των τοπολογιών δρομολόγησης με ερώτηση [19]

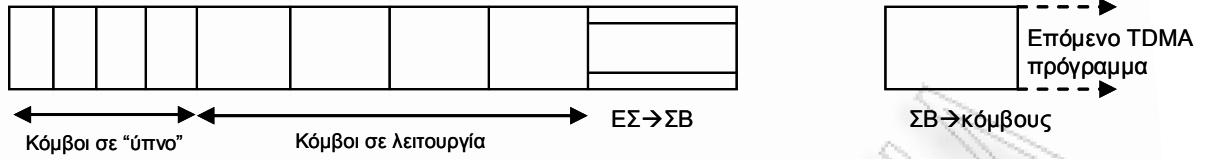
### 3.5.5.3 Διαμόρφωση του προγράμματος TDMA

Οι κόμβοι που αφουγκράζονται τις ερωτήσεις πρέπει να είναι πάντα άγρυπνοι (δηλ., στην κατάσταση idle έτοιμοι να λάβουν οποιαδήποτε ερώτηση). Επίσης, αυτοί οι idle κόμβοι θα έχουν περισσότερα δεδομένα να στείλουν εάν λαμβάνουν τις ερωτήσεις, δεδομένου ότι πρέπει να στείλουν τα δεδομένα καθώς επίσης και τις ερωτήσεις. Ως εκ τούτου, οι χρονοσχιμές (time slots) για αυτούς τους idle κόμβους πρέπει να είναι μεγαλύτερες από τις χρονοσχιμές για τους κόμβους σε κατάσταση ύπνου.

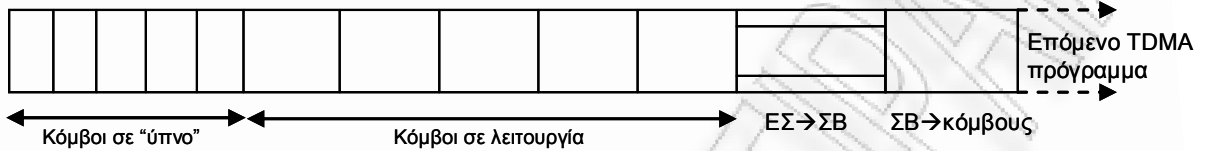
Με την τροποποίηση του προγράμματος TDMA, μπορεί να έχουμε τους κόμβους “ύπνου” να στείλουν τα στοιχεία τους πρώτα και έπειτα οι “idle” κόμβοι. Παραδείγματος χάριν, εάν ο παρακείμενος κόμβος a και ο κόμβος b αποτελούν το ζευγάρι ύπνου/idle, θα έχουν τις χρονοσχιμές τους σε μια μέση απόσταση του μισού χρόνου του πλαισίου. Έτσι, ακόμα κι αν το διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακώσεων του κόμβου a είναι μεγαλύτερο λόγω των μεγαλύτερων αυλακώσεων για τους μη απασχολημένους κόμβους, τα κρίσιμα στοιχεία μπορούν ακόμα να αισθανθούν και να διαβιβαστούν από τον κόμβο b χωρίς να πρέπει να περιμένουμε την επόμενη χρονοσχιμή του κόμβου a. Οι κόμβοι μπορούν να αλλάξουν τους ρόλους τους ανάμεσα στους χρόνους αλλαγής συστάδων, έτσι ώστε οι κόμβοι ύπνου να πηγαίνουν σε κατάσταση idle και να χειριστούν τις ερωτήσεις και οι idle κόμβοι να πηγαίνουν στην κατάσταση “ύπνου”.

Ο ΕΣ αθροίζει όλα τα στοιχεία και τα στέλνει στον υψηλότερου επιπέδου ΕΣ του (ή στον BS). Μόλις λάβει ο BS τα δεδομένα από όλους τους ΕΣς, εξάγει τις ερωτήσεις και τις απαντήσεις από τα στοιχεία και τις διαβιβάζει στην κατάσταση down-link, άμεσα στους κόμβους αισθητήρων ή το χρήστη παρά να περάσουν από τους ΕΣς. Διαφορετικός κώδικας CDMA χρησιμοποιείται σε κάθε συστάδα για να αποφευχθεί τις συγκρούσεις μεταξύ των συστάδων. Εντούτοις, ένας κοινός κώδικας CDMA υιοθετείται για up-link από τους επικεφαλής συστάδας στον BS και την down-link σύνδεση από τον BS σε όλους τους κόμβους.

Αυτό υπονοεί ότι ο BS δεν πρέπει να διαβιβάζει στους κόμβους όταν διαβιβάζουν οι κόμβοι τα στοιχεία στους ΕΣς τους στις χρονοσχιμές τους. Έτσι, πρέπει να οριστεί μια χωριστή χρονοσχιμή για τον BS και να περιληφθεί στο πρόγραμμα TDMA. Εντούτοις, κάθε συστάδα μπορεί να έχει διαφορετικό αριθμό μελών, που οδηγούν στα διαφορετικά μήκη πλαισίων TDMA. Έτσι, ο BS πρέπει να υπολογίσει το μήκος του πιο μακροχρόνιου προγράμματος TDMA μεταξύ των συστάδων και να λάβει υπόψη τα διαβιβασθέντα δεδομένα από τους ΕΣς για να φθάσουν σε αυτόν και μετά μπορεί να διαβιβάσει τα δεδομένα του. Τέλος, ενσωματώνοντας όλους αυτούς τους παράγοντες, ένα πρόγραμμα TDMA μπορεί να καθοριστεί όπως φαίνεται στην εικόνα 42.



(α) Πλαίσιο χρόνου μικρότερο από το μεγαλύτερο πλαίσιο χρόνου



(β) Το μεγαλύτερο πλαίσιο στο δίκτυο

Εικόνα 42: Διαφορετικά μήκη πλαισίου σε ένα δίκτυο [19]

### 3.5.5.4 Δρομολόγηση Ερωτήσεων

Τα περισσότερα τρέχοντα πρωτόκολλα που αναπτύσσονται για τις ερωτήσεις είναι κατάλληλα για μόνο έναν από τους τύπους ερωτήσεων. Το ARTEEN μπορεί να χειριστεί όλους τους τρεις τύπους. Είναι το πρώτο πρωτόκολλο που χειρίζεται όλους τους τύπους ερωτήσεων που μπορούν να υπάρξουν αποτελεσματικά. Τέτοιες ερωτήσεις είναι οι ιστορικές, που αναφέρονται συλλογή δεδομένων που αφορούν χρονικό διάστημα που έχει περάσει, οι στιγμιαίες που αναφέρονται σε δεδομένα της παρούσας χρονικής περιόδου και επίμονες που αναφέρονται σε δεδομένα που λαμβάνονται για μεγάλο χρονικό διάστημα από την στιγμή της ερώτησης και μετά.

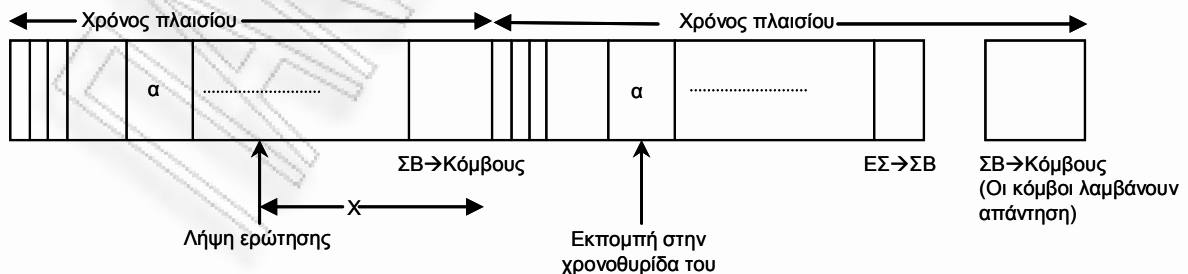
#### Ιστορική ερώτηση

Το σχήμα της ερώτησης είναι το ακόλουθο:

```

type 0 // type of query
temp -1 // -1 for "?"
location northwest quadrant
time 120 //in minutes
    
```

Ο κόμβος που λαμβάνει αυτήν την ερώτηση την διαβιβάζει στον ΕΣ του στην αυλάκωσή του. Ο ΕΣ αθροίζει όλα τα στοιχεία και τα διαβιβάζει στον BS στο τέλος του προγράμματος. Ο BS ελέγχει τον τύπο ερώτησης και ανακτά την απάντηση από τη μνήμη του και στέλνει την απάντηση στους κόμβους άμεσα στην χρονοσχισμή της down-link σύνδεσής τους. Έτσι ο κόμβος παίρνει την απάντηση στην ερώτησή του σε ένα ελάχιστο  $x$  και ένα μέγιστο  $x + \text{"frame χρόνου"}$  όπου το  $x$  είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της άφιξης της ερώτησης και του τέλους εκείνου του πλαισίου. Αυτό είναι διευκρινισμένο στην εικόνα 43.



Εικόνα 43: Χειρισμός ιστορικής ερώτησης [19]

Στιγμαία ερώτηση

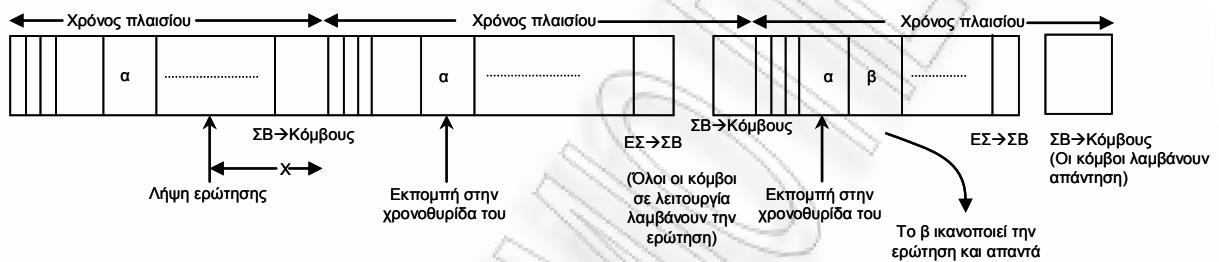
Το σχήμα της ερώτησης είναι το ακόλουθο:

```

type 1 // type of query
temp -1 // -1 for "?"
location northwest quadrant

```

Ο κόμβος στέλνει την ερώτηση στον ΕΣ του στην αυλάκωσή του και ο BS την λαμβάνει στο τέλος του προγράμματος. Εάν η ερώτηση είναι για τα χρονικά κρίσιμα στοιχεία, ο BS έχουν ήδη αυτά τα δεδομένα από τους κόμβους και έτσι απαντά σε τέτοιες ερωτήσεις αμέσως στην χρονοσχισμή της down-link σύνδεσης στο ίδιο πλαίσιο. Για άλλες ερωτήσεις αυτού του τύπου για τις οποίες ο BS δεν έχει τα δεδομένα, μεταδίδει τις ερωτήσεις στους κόμβους στην αυλάκωσή τους. Όλοι οι "idle" κόμβοι που ικανοποιούν τις ερωτήσεις στέλνουν τα στοιχεία στην αυλάκωσή τους στον BS μέσω των ΕΣ τους. Ο σταθμός BS αθροίζει όλα τα λαμβανόμενα δεδομένα και μεταδίδει την απάντηση. Έτσι, εάν η ερώτηση είναι για δεδομένα όπου ο BS μπορεί να απαντήσει αμέσως, η καθυστέρηση είναι ίδια με αυτήν για τις ιστορικές ερωτήσεις. Για άλλες στιγμιαίες ερωτήσεις, ο χρόνος απόκρισης θα είναι μεταξύ  $x + \text{"frame-time"}$  και  $2 * \text{"frame-time"}$  και παρουσιάζεται στην εικόνα. 44.



Εικόνα 44: Χειρισμός στιγμιαίας ερώτησης [19]

Επίμονη ερώτηση

Το σχήμα της ερώτησης είναι το ακόλουθο:

```

type 2 // type of query
temp -1 // -1 for "?"
location northwest quadrant
time 120 //in minutes

```

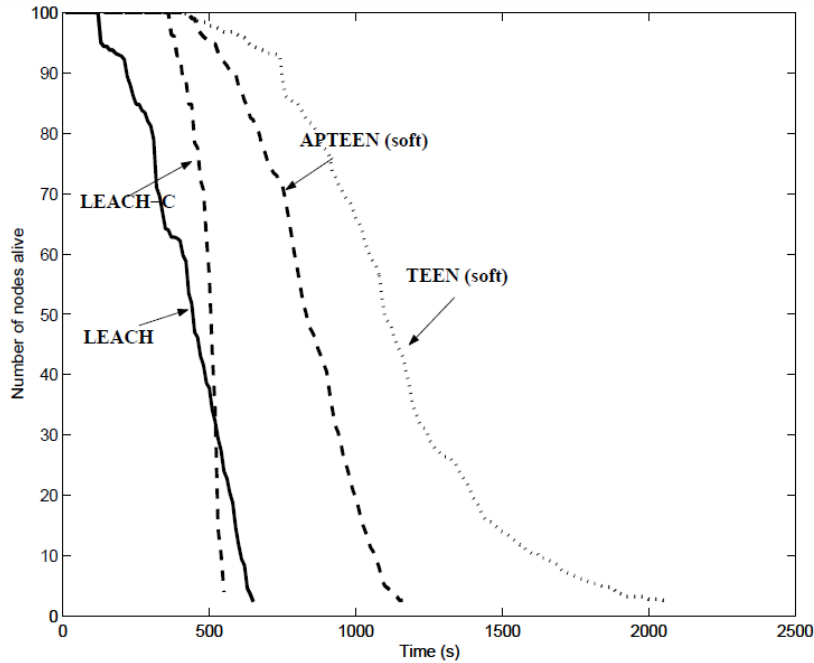
Αυτός ο τύπος ερώτησης αντιμετωπίζεται σχεδόν ακριβώς η στιγμιαία ερώτηση. Η αρχική καθυστέρηση είναι η ίδια με αυτήν της στιγμιαίας ερώτησης και έπειτα η καθυστέρηση είναι ένα frame-time κατά τη διάρκεια της ερώτησης.

**3.5.5.5 Σύγκριση**

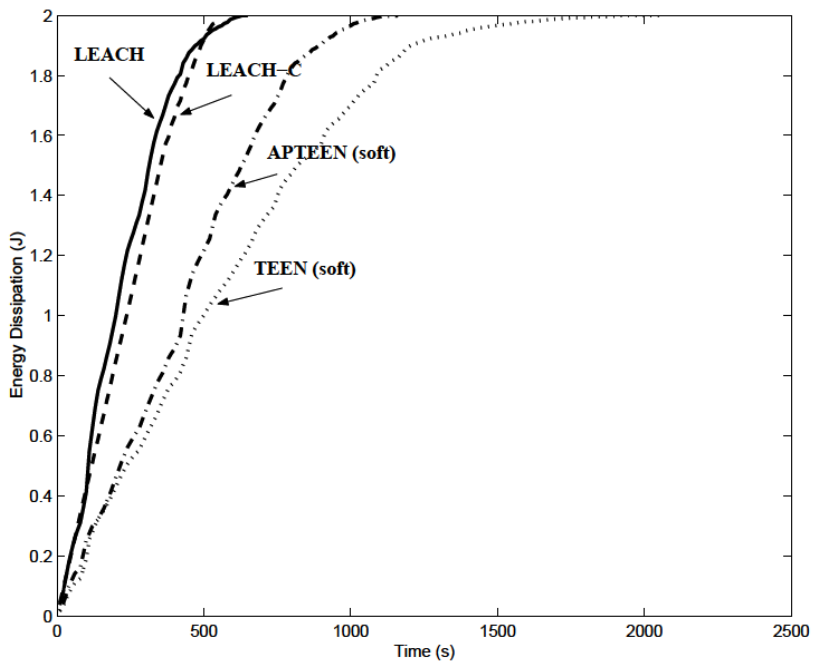
Οι εικόνες 40-42 [19] συγκρίνουν το APTEEN με το TEEN και το LEACH (leach και leach-c) όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, αριθμός ζωντανών κόμβων και συνολικών σημάτων δεδομένων που παραλαμβάνονται στον BS με την πάροδο του χρόνου, αντίστοιχα.

Η απόδοση του APTEEN βρίσκεται μεταξύ του TEEN και του LEACH όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τη μακροζωία του δικτύου. Αυτό αναμένεται δεδομένου ότι ο TEEN διαβιβάζει μόνο τα χρόνο-κρίσιμα στοιχεία ενώ ανιχνεύει το περιβάλλον συνεχώς. Για να υπερνικήσει τα μειονεκτήματα του TEEN ενσωματώθηκε η περιοδική μετάδοση στοιχείων για να δημιουργηθεί ο APTEEN. Ο APTEEN εκτελεί καλύτερα από το LEACH δεδομένου ότι ο APTEEN διαβιβάζει τα στοιχεία βασισμένα στις τιμές κατώτατων ορίων αντίθετα από τον LEACH που διαβιβάζει τα στοιχεία πάντα. Έτσι, βασισμένος στην εφαρμογή και τους ενεργειακούς περιορισμούς, μπορούμε να αποφασίσουμε πώς να επιλέξουμε τις παραμέτρους στο πρωτόκολλο APTEEN μας. Αλλά αυτή η αποταμίευση ενέργειας αυξάνει το χρόνο απόκρισης για τις ερωτήσεις.

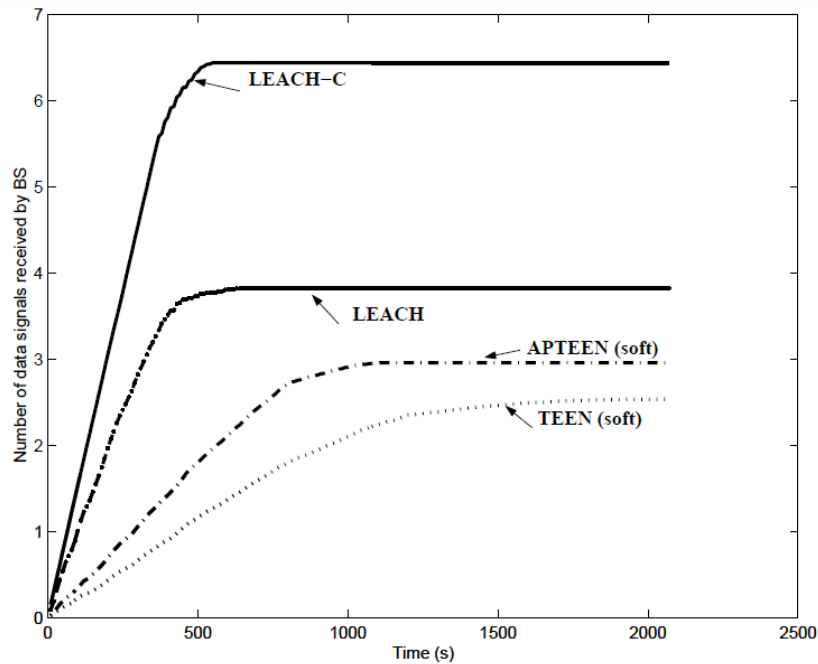




**Εικόνα 45: Σύγκριση του αριθμού των κόμβων που παραμένουν ενεργοί σε LEACH, TEEN και APTEEN [19]**



**Εικόνα 46: Σύγκριση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας σε LEACH, TEEN και APTEEN [19]**



Εικόνα 47: Συνολικά σήματα δεδομένων που λαμβάνει ο BS στο χρόνο [19]

### 3.5.6 HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering)

Το πρωτόκολλο HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering) [41] έχει τέσσερις αρχικούς στόχους:

- Παράταση της διάρκειας ζωής δικτύου με τη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας,
- Ολοκλήρωση της διαδικασίας συγκέντρωσης μέσα σε έναν σταθερό αριθμό επαναλήψεων/βημάτων,
- Ελαχιστοποίηση των επικεφαλίδων ελέγχου (για να είναι γραμμικό στον αριθμό κόμβων), και
- Παραγωγή καλά κατανομημένων επικεφαλής συστάδων και συμπαγείς συστάδες.

Το HEED δεν κάνει καμία υπόθεση για την:

- Ομοιογένεια της διασποράς κόμβων στον τομέα,
- Πυκνότητα ή διάμετρος δικτύου,
- Διανομή της κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ των κόμβων αισθητήρων,
- Εγγύτητα της συζήτησης των παρατηρητών.

Ας υποθεθεί ότι το διάστημα επεξεργασίας συστάδας  $T_{CP}$ , είναι ο χρόνος που λαμβάνεται από το πρωτόκολλο για να ομαδοποιηθεί το δίκτυο. Ας υποθεθεί ότι το διάστημα λειτουργίας δικτύου,  $T_{NO}$ , είναι ο χρόνος μεταξύ του τέλους ενός διαστήματος  $T_{CP}$  και της έναρξης του επόμενου διαστήματος  $T_{CP}$ . Πρέπει να εξασφαλιστεί εκείνο το  $T_{NO} \gg T_{CP}$  για να μειώσουμε τις επικεφαλίδες.

Υποθέτουμε ότι  $N$  κόμβοι είναι διασκορπισμένοι σε έναν τομέα. Ο στόχος είναι να προσδιοριστεί ένα σύνολο επικεφαλής συστάδων που καλύπτουν ολόκληρο τον τομέα. Κάθε κόμβος  $U_i$  όπου  $1 \leq i \leq N$ , χαρτογραφείται έπειτα σε ακριβώς μια συστάδα  $c_j$ , όπου  $1 \leq j \leq N_c$ , και  $N_c$  είναι ο αριθμός συστάδων ( $N_c \leq N$ ). Ο κόμβος μπορεί άμεσα να επικοινωνήσει με τον επικεφαλής συστάδας του (μέσω ενός βήματος). Οι ακόλουθες απαιτήσεις πρέπει να καλυφθούν:

- Η συγκέντρωση κατανέμεται εντελώς. Κάθε κόμβος λαμβάνει ανεξάρτητα τις αποφάσεις του βασισμένες στις τοπικές πληροφορίες.
- Η ομαδοποίηση ολοκληρώνεται μέσα σε έναν σταθερό αριθμό επαναλήψεων (ανεξάρτητα από τη διάμετρο του δικτύου).
- Στο τέλος κάθε  $T_{CP}$ , κάθε κόμβος είναι είτε ένας επικεφαλής συστάδας, είτε ένας μη-επικεφαλής κόμβος (στον οποίο αναφερόμαστε ως κανονικός κόμβος) που ανήκει σε ακριβώς μια συστάδα.
- Η συγκέντρωση πρέπει να είναι αποδοτική από την άποψη της πολυπλοκότητας επεξεργασίας και της ανταλλαγής μηνυμάτων.
- Οι επικεφαλής συστάδας κατανέμονται καλά στο πεδίο αισθητήρων.

### 3.5.6.1 Παράμετροι Ομαδοποίησης

Ο μέγιστος στόχος του πρωτοκόλλου είναι να παραταθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Για αυτόν τον λόγο, η επιλογή επικεφαλής συστάδας είναι βασισμένη πρώτιστα στην υπολειπόμενη ενέργεια κάθε κόμβου. Σημειώστε ότι η υπολειπόμενη ενεργειακή μέτρηση δεν είναι απαραίτητη, μιας και η ενέργεια που καταναλώνεται ανά bit για την ανίχνευση, επεξεργασία και την επικοινωνία είναι χαρακτηριστικά γνωστή. Για να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα και να παραταθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου, λαμβάνουμε υπόψη το κόστος επικοινωνίας μέσα στην ομάδα ως μια δευτερεύουσα παράμετρο ομαδοποίησης. Παραδείγματος χάριν, το κόστος μπορεί να είναι μια συνάρτηση της εγγύτητας των γειτόνων ή της πυκνότητας της συστάδας.

Χρησιμοποιείται η αρχική παράμετρος για να επιλεγεί με πιθανότητα ένα αρχικό σύνολο επικεφαλής συστάδων, και η δευτερεύουσα παράμετρος για “να σπάσει τους δεσμούς”. Ένας δεσμός σε αυτό το πλαίσιο σημαίνει ότι ένας κόμβος εμπίπτει στη “περιοχή” περισσότερων από ενός επικεφαλής συστάδας, συμπεριλαμβανομένης της κατάστασης όταν εμπίπτουν δύο δοκιμαστικά επικεφαλής συστάδας στην ίδια περιοχή. Για να καταλάβουμε τι σημαίνει η “περιοχή”, παρατηρούμε ότι ένας κόμβος έχει χαρακτηριστικά μερικά (π.χ.,  $\delta$ ) ιδιαίτερα επίπεδα ενέργειας μετάδοσης. Καθώς το επίπεδο δύναμης αυξάνεται, η περιοχή κάλυψης αυξάνεται. Κατά συνέπεια, η περιοχή της συστάδας ή η ακτίνα καθορίζεται από το επίπεδο ενέργειας μετάδοσης που χρησιμοποιείται για τις ανακοινώσεις μέσα στην συστάδα κατά τη διάρκεια της ομαδοποίησης. Αναφερόμαστε σε αυτό ως επίπεδο ενέργειας συστάδων (cluster power level). Το επίπεδο ενέργειας συστάδων πρέπει να τεθεί ένα από τα χαμηλότερα επίπεδα ενέργειας ενός κόμβου, για να αυξήσει τη χωρική επαναχρησιμοποίηση, και να διατηρήσει τα υψηλότερα επίπεδα ενέργειας για την επικοινωνία μέσα στη συστάδα. Αυτά τα επίπεδα υψηλότερης ενέργειας πρέπει κατά προσέγγιση να καλύψουν τουλάχιστον δύο ή περισσότερες διαμέτρους συστάδων για να εγγυηθούν ότι η προκύπτουσα επικάλυψη μέσα στις συστάδες θα ισχύει. Εάν αυτός ο όρος δεν μπορεί να ικανοποιηθεί, κατόπιν η ομαδοποίηση σαφώς δεν ισχύει. Το επίπεδο ενέργειας συστάδων υπαγορεύει τον αριθμό συστάδων στο δίκτυο. Είναι σχεδόν δύσκολο να καθοριστεί ένα βέλτιστο επίπεδο δύναμης συστάδων, επειδή η τοπολογία δικτύου αλλάζει λόγω της αποτυχίας κόμβων και της ενεργειακής μείωσης.

Σε περίπτωση πολλαπλών υποψηφίων επικεφαλής συστάδων, οι επικεφαλής συστάδας που παράγουν το χαμηλότερο κόστος επικοινωνίας μέσα στη συστάδα ευνοούνται. Αυτό το κόστος είναι μια λειτουργία (i) των ιδιοτήτων συστάδων, όπως το μέγεθος συστάδων, και (ii) εάν τα μεταβλητά επίπεδα ενέργειας είναι ή όχι επιτρεπτά για τη μετάδοση μέσα σε μια συστάδα, δηλ., εάν κάθε κόμβος επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει το κατώτατο επίπεδο ενέργειας για να φθάσει στον επικεφαλής συστάδας του ή εάν όλη η επικοινωνία μέσα στη συστάδα πρέπει να χρησιμοποιήσει το ίδιο επίπεδο δύναμης. Εάν το επίπεδο δύναμης που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μέσα στη συστάδα καθορίζεται για όλους τους κόμβους, τότε το κόστος μπορεί να είναι ανάλογο προς (i) το βαθμό κόμβων, εάν η απαίτηση είναι να διανεμηθεί το φορτίο μεταξύ των επικεφαλής συστάδας, ή (ii)  $1 / (\text{βαθμός του κόμβου})$ , εάν η απαίτηση είναι να δημιουργηθούν πυκνές συστάδες. Αυτό σημαίνει ότι ένας κόμβος ενώνεται με τον επικεφαλής συστάδας με τον ελάχιστο βαθμό για να κατανείμει το φορτίο του επικεφαλής συστάδας (ενδεχομένως εις βάρος της αυξανόμενης παρέμβασης και της μειωμένης χωρικής επαναχρησιμοποίησης), ή ενώνεται με αυτόν με το μέγιστο βαθμό για να δημιουργήσει πυκνές συστάδες. Χρησιμοποιούμε τους όρους «το ελάχιστο κόστος βαθμού» και «το μέγιστο κόστος βαθμού» για να δείξουμε αυτούς τους τύπους κόστους. Παρατηρήστε ότι η επικοινωνία μέσα

στη συστάδα δεν ενσωματώνεται στη συνάρτηση κόστους δεδομένου ότι, οι τοπικές πληροφορίες είναι ανεπαρκείς σε αυτήν την περίπτωση.

Τώρα εξετάστε την περίπτωση όταν επιτρέπονται τα μεταβλητά επίπεδα ενέργειας για την επικοινωνία μέσα στη συστάδα. Ας υποθεθεί ότι το  $MinPwr_i$  δείχνει το κατώτατο επίπεδο δύναμης που απαιτείται από έναν κόμβο  $u_i$ ,  $1 \leq i \leq M$ , για να επικοινωνήσει με τον επικεφαλής συστάδας  $u$ , όπου το  $M$  είναι ο αριθμός κόμβων μέσα στη περιοχή της συστάδας. Καθορίζεται η “μέση ελάχιστη ενέργεια επικοινωνίας” (average minimum reachability power – AMRP) ως μέσο όρο των κατώτατων επιπέδων ενέργειας που απαιτούνται από όλους τους κόμβους  $M$  μέσα στη περιοχή της συστάδας για να φθάσουν στο  $u$ . Δηλαδή:

$$AMRP = (\sum_{i=1}^M MinPwr_i)/M. \quad (2)$$

Εάν κάθε κόμβος επιτρέπεται να επιλέξει το κατάλληλο επίπεδο ενέργειας για να φθάσει στον επικεφαλής συστάδας του, κατόπιν το AMRP παρέχει μια καλή εκτίμηση του κόστους επικοινωνίας. Το AMRP ενός κόμβου είναι ένα μέτρο της αναμενόμενης κατανάλωσης ενέργειας επικοινωνίας μέσα στη συστάδα εάν αυτός ο κόμβος γίνει επικεφαλής συστάδας. Η χρησιμοποίηση του AMRP ως κόστος στην επιλογή των επικεφαλής συστάδας είναι ανώτερο από απλώς να επιλεγεί ο πιο κοντινός επικεφαλής συστάδας, δεδομένου ότι παρέχει έναν ενοποιημένο μηχανισμό για όλους τους κόμβους, συμπεριλαμβανομένων των επικεφαλής συστάδων, για να σπάσει τους δεσμούς μεταξύ των δοκιμαστικών επικεφαλής συστάδων.

Εάν ένας κόμβος πρέπει να επιλέξει τον επικεφαλής συστάδας του μεταξύ των κόμβων, ο πιο κοντινός γείτονας μέσα στη περιοχή συστάδας του (ο γείτονας που φθάνεται με τη χρησιμοποίηση του μικρότερου επιπέδου ενέργειας) μπορεί να επιλεγεί ως επικεφαλής συστάδας του. Ο πίνακας 2 συνοψίζει τις διαφορετικές επιλογές για τον υπολογισμό του κόστους επικοινωνίας.

Σκοπός \ Ενέργεια	Ίδια	Ελάχιστη
Κατανομή φορτίου	Βαθμός κόμβου	AMRP
		Βαθμός κόμβου
Πυκνότητα συστάδας	1 / Βαθμός κόμβου	AMRP
		Βαθμός κόμβου

Πίνακας 2: Προσδιορισμός του κόστους επικοινωνίας σύμφωνα με το σκοπό και την ενδοσυσταδική ενέργεια επικοινωνίας [41]

### 3.5.6.2 Λειτουργία πρωτοκόλλου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η ομαδοποίηση ενεργοποιείται κάθε  $T_{CP}+T_{NO}$  δευτερόλεπτα για να επιλεγούν νέοι επικεφαλής συστάδων. Σε κάθε κόμβο, η διαδικασία ομαδοποίησης απαιτεί έναν αριθμό επαναλήψεων τις οποίες αναφέρουμε ως  $N_{iter}$ . Κάθε βήμα χρειάζεται χρόνο  $t_c$  ο οποίος θα πρέπει να είναι αρκετός για να ληφθούν τα μηνύματα από κάθε γείτονα που βρίσκεται στην περιοχή της ομάδας. Τοποθετούμε ένα αρχικό ποσοστό επικεφαλής συστάδας ανάμεσα σε όλους τους κόμβους  $N$ ,  $C_{prob}$  (ας πούμε 5%), θεωρώντας ότι ένα βέλτιστο ποσοστό δεν μπορεί να υπολογιστεί  $a priori$ . Το  $C_{prob}$  χρησιμοποιείται μόνο για να περιορίσει τις αρχικές ανακοινώσεις του επικεφαλής συστάδας και δεν ασκεί καμία άμεση επίδραση στις τελικές συστάδες. Προτού αρχίσει ένας κόμβος την εκτέλεση του HEED, θέτει την πιθανότητα να γίνει ένας επικεφαλής συστάδας,  $CH_{prob}$ , ως εξής:

$$CH_{prob} = C_{prob} \times \frac{E_{residual}}{E_{max}} \quad (3)$$

όπου  $E_{residual}$  είναι η εκτίμηση τρέχουσα υπολειπόμενη ενέργεια στον κόμβο, και  $E_{max}$  είναι μια μέγιστη ενέργεια αναφοράς (που αντιστοιχεί σε μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία), η οποία είναι χαρακτηριστικά ίδια για όλους τους κόμβους. Η τιμή  $CH_{prob}$  ενός κόμβου, εντούτοις, δεν επιτρέπεται να μειωθεί κάτω από ένα ορισμένο κατώτατο όριο  $p_{min}$  (π.χ.,  $10^{-4}$ ), που επιλέγεται να είναι αντιστρόφως ανάλογη του  $E_{max}$ . Αυτός ο περιορισμός είναι ουσιαστικός για τη λήξη του αλγορίθμου σε  $N_{iter}=O(1)$  επαναλήψεις, όπως θα παρουσιάσουμε αργότερα. Παρατηρήστε ότι η

ομαδοποίηση της προσέγγισή μας είναι σε θέση να χειρίζεται τις ετερογενείς μπαταρίες κόμβων. Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε κόμβος θα έχει την δική του τιμή  $E_{max}$ .

Κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε επανάληψης  $i$ , με  $i \leq N_{iter}$ , κάθε «αποκαλυμμένος» κόμβος (όπως καθορίζεται κατωτέρω) εκλέγεται να γίνει ένας επικεφαλής συστάδας με την πιθανότητα  $CH_{prob}$ . Μετά από το βήμα  $i$ , το σύνολο των δοκιμαστικών επικεφαλής συστάδων,  $S_{CH}$ , τίθεται { επικεφαλής συστάδων μετά από το βήμα  $i - 1$  υ νέοι επικεφαλής που επιλέγονται στο βήμα  $i$  }. Ένας κόμβος  $u_i$  επιλέγει τον επικεφαλής συστάδας του ( $my\_cluster\_head$ ) να είναι ο κόμβος με το χαμηλότερο κόστος σε  $S_{CH}$  ( $S_{CH}$  μπορεί να περιλάβει το ίδιο  $u_i$  εάν επιλέγεται ως δοκιμαστικός επικεφαλής συστάδας). Κάθε κόμβος διπλασιάζει έπειτα το  $CH_{prob}$  του και πηγαίνει στο επόμενο βήμα. Ο ψευδοκώδικας για κάθε κόμβο δίνεται παρακάτω. Σημειώστε ότι εάν διαφορετικά επίπεδα ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία μέσα στη συστάδα, τότε η γραμμή 1 στη φάση I πρέπει να τροποποιηθεί ως εξής: Ανακαλύψτε τους γείτονες μέσα σε κάθε επίπεδο ενέργειας  $Pwr_i \leq Pwr_c$ , όπου  $Pwr_c$  είναι το επίπεδο ενέργειας συστάδας. Σε αυτήν την περίπτωση μόνο, υποθέτουμε ότι εάν ο επικεφαλής συστάδας  $u$  μπορεί να φθάσει έναν κόμβο  $u$  με επίπεδο ενέργειας  $\ell$ , τότε το  $u$  μπορεί να φθάσει το  $u$  με το επίπεδο  $\ell$  επίσης. Η ανακάλυψη γειτόνων δεν είναι απαραίτητη κάθε φορά που προκαλείται η ομαδοποίηση. Αυτό είναι επειδή σε ένα στάσιμο δίκτυο, όπου οι κόμβοι δεν πεθαίνουν απροσδόκητα, το σύνολο γειτόνων κάθε κόμβου δεν αλλάζει πολύ συχνά. Επιπλέον, η κατανομή «HEED» της κατανάλωσης ενέργειας επεκτείνει τη διάρκεια ζωής όλων των κόμβων στο δίκτυο, το οποίο προσθέτει στη σταθερότητα του συνόλου γειτόνων. Οι κόμβοι επίσης αυτόματα ενημερώνουν τα σύνολα γειτόνων τους στα δίκτυα πολυ-βηματικής στέλνοντας και λαμβάνοντας περιοδικά μηνύματα κύτπου της καρδιάς.

Σημειώστε επίσης ότι όταν ένας κόμβος εκλέγεται να γίνει ένας επικεφαλής συστάδας, στέλνει ένα μήνυμα ανακοίνωσης  $cluster\_head\_msg(Node\ ID, selection\ status, cost)$ , όπου το  $selection\ status$  τίθεται στο  $tentative\_CH$ , εάν το  $CH_{prob}$  του είναι λιγότερο από 1, ή στο  $final\_CH$ , εάν το  $CH_{prob}$  του έχει φθάσει σε 1. Ένας κόμβος θεωρεί τον εαυτό του “καλυμμένο” εάν έχει λάβει νέα από είτε έναν  $tentative\_CH$  είτε έναν  $final\_CH$ . Εάν ένας κόμβος ολοκληρώσει την εκτέλεση του HEED χωρίς επιλογή ενός επικεφαλής συστάδας που είναι ο  $final\_CH$ , θεωρεί τον εαυτό του “ακάλυπτο”, και αναγγέλλεται να είναι ένας επικεφαλής συστάδας με κατάσταση  $final\_CH$ . Ένας  $tentative\_CH$  κόμβος μπορεί να γίνει ένας κανονικός κόμβος σε μια επόμενη επανάληψη εάν βρει έναν επικεφαλής συστάδας χαμηλότερου κόστους. Σημειώστε ότι ένας κόμβος μπορεί να εκλέξει να γίνει ένας επικεφαλής συστάδας σε διαδοχικά διαστήματα ομαδοποίησης εάν έχει υψηλή υπολειπόμενη ενέργεια και χαμηλό κόστος.

Ο ψευδοκώδικας του πρωτοκόλλου, που παρέχεται παρακάτω από το [41], καλύπτει τις απαιτήσεις που απαριθμούνται στην αρχή της παραγράφου και συζητούνται έπειτα.

## I. Initialize

1.  $S_{nbr} \leftarrow \{u: u \text{ lies within my cluster range}\}$
2. Compute and broadcast cost to  $\in S_{nbr}$
3.  $CH_{prob} \leftarrow \max(C_{prob} \times E_{residual} / E_{max}, p_{min})$
4.  $is\_final\_CH \leftarrow FALSE$

## II. Repeat

1. If  $((S_{CH} \leftarrow \{u: u \text{ is a cluster head}\}) \neq \emptyset)$
2.  $my\_cluster\_head \leftarrow least\_cost(S_{CH})$
3. If  $my\_cluster\_head = NodeID$
4. If  $(CH_{prob} = 1)$
5.  $Cluster\_head\_msg(NodeID, final\_CH, cost)$
6.  $is\_final\_CH \leftarrow TRUE$
7. Else
8.  $Cluster\_head\_msg(NodeID, tentative\_CH, cost)$
9. Elseif  $(CH_{prob} = 1)$
10.  $Cluster\_head\_msg(NodeID, final\_CH, cost)$
11.  $is\_final\_CH \leftarrow TRUE$

12. Elseif  $\text{Random}(0,1) \leq \text{CH}_{\text{prob}}$
  13.  $\text{Cluster\_head\_msg}(\text{NodeID}, \text{tentative\_CH}, \text{cost})$
  14.  $\text{CH}_{\text{previous}} \leftarrow \text{CH}_{\text{prob}}$
  15.  $\text{CH}_{\text{prob}} \leftarrow \min(\text{CH}_{\text{prob}} \times 2, 1)$
- Until**  $\text{CH}_{\text{previous}} = 1$

### III. Finalize

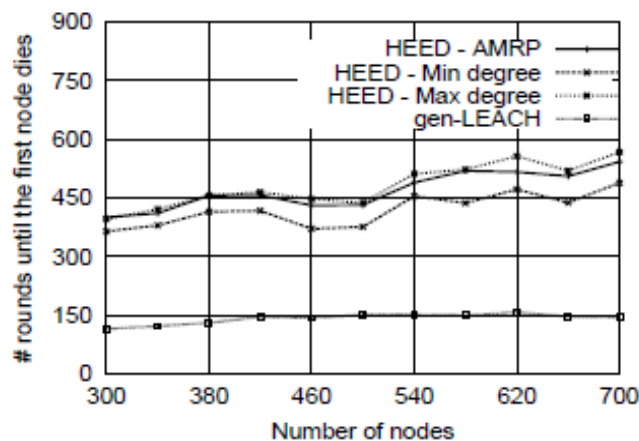
1. If ( $\text{is\_final\_CH} = \text{FALSE}$ )
2. If ( $(\text{S}_{\text{CH}} \leftarrow \{u: u \text{ is a final cluster head}\}) \neq \emptyset$ )
3.  $\text{my\_cluster\_head} \leftarrow \text{least\_cost}(\text{S}_{\text{CH}})$
4.  $\text{join\_cluster}(\text{cluster\_head\_ID}, \text{NodeID})$
5. Else  $\text{Cluster\_head\_msg}(\text{NodeID}, \text{final\_CH}, \text{cost})$
6. Else  $\text{Cluster\_head\_msg}(\text{NodeID}, \text{final\_CH}, \text{cost})$

### 3.5.6.3 Σύγκριση

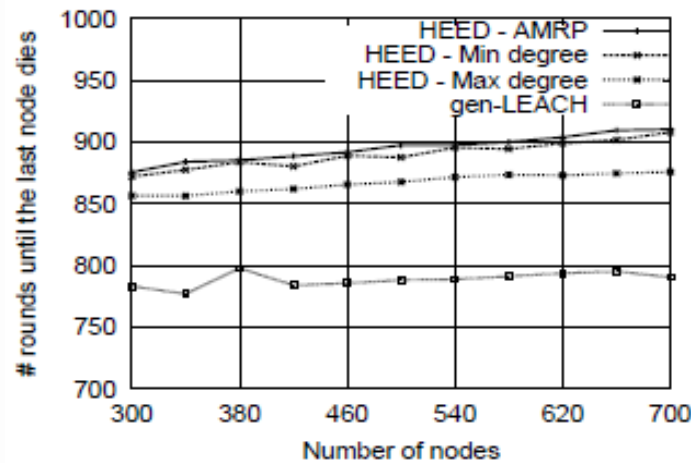
Στο [41] συγκρίνεται το HEED με μια γενικευμένη προσέγγιση του LEACH (στην οποία αναφερόμαστε ως gen-LEACH) στο οποίο δύο χαρακτηριστικά γνώρισμα προστίθενται στο οριζόμενο από την εφαρμογή πρωτόκολλο LEACH, που περιγράφεται στο [15]. Το πρώτο χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι ότι το πρωτόκολλο δρομολόγησης υποτίθεται ότι διέδωσε την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων σε όλο το δίκτυο. Αν και αυτή η προσέγγιση απαιτεί την εκτενή ανταλλαγή μηνυμάτων (για την πληροφορία της υπολειπόμενης ενέργειας), επιλέγει καλύτερους επικεφαλής συστάδων από τον αρχικό LEACH και παρατείνει έτσι τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Ένας κόμβος που εκτελεί τον gen-LEACH εκλέγεται για να γίνει επικεφαλής συστάδας στο χρόνο  $t$  με την πιθανότητα  $\text{CH}_{\text{prob}}(t)$ ,

$$\text{όπου } \text{CH}_{\text{prob}}(t) = \min((E_i(t)/E_{\text{total}}) \times k, 1).$$

Εδώ  $E_i$  είναι η υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου  $i$  και  $E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N E_i(t)$ . Το δεύτερο χαρακτηριστικό γνώρισμα που προστίθεται στο LEACH είναι ότι ένας κόμβος επιλέγει έναν επικεφαλής συστάδας στην εγγύτητα ακτίνας συστάδας του, η οποία δεν υποτίθεται ότι εκτάθηκε σε ολόκληρη την περιοχή του δικτύου. Αυτό γενικεύει το LEACH για να εξυπηρετήσει τα πολύ-βηματικά δίκτυα.



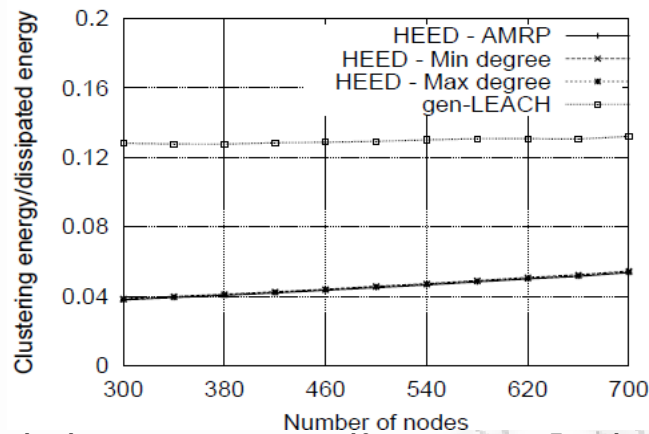
Εικόνα 48: Διάρκεια ζωής δικτύου με τη χρήση του HEED έναντι LEACH (πτώση πρώτου κόμβου) [41]



**Εικόνα 49: Διάρκεια ζωής δικτύου με τη χρήση του HEED έναντι gen-LEACH (πτώση τελευταίου κόμβου) [41]**

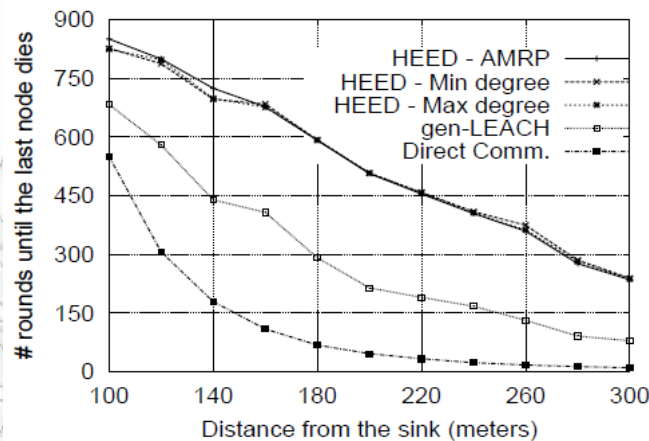
Ένας κόμβος θεωρείται «νεκρός» εάν έχει χάσει 99.9% της αρχικής ενέργειάς του. Για το HEED, το 5% χρησιμοποιείται ως αρχικό δοκιμαστικό ποσοστό των επικεφαλής συστάδων ( $C_{prob}$ ). Για τον gen-LEACH,  $k_{opt}$  επιλέχθηκε να είναι 11 για 300-700 κόμβων δίκτυα, ο οποίος εμπίπτει στη σειρά του  $k_{opt}$  που υπολογίζεται σύμφωνα με το [36]. Η εικόνα 48 [41] συγκρίνει τη διάρκεια ζωής δικτύου με το HEED στον gen-LEACH, όπου η διάρκεια ζωής του δικτύου είναι ο χρόνος έως ότου πεθαίνει ο πρώτος κόμβος. Η ομαδοποίηση του HEED σαφώς βελτιώνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου από την gen-LEACH ομαδοποίηση για όλους τους τύπους κόστους. Αυτό είναι επειδή ο gen-LEACH επιλέγει τυχαία τους επικεφαλής συστάδων (και ως εκ τούτου τα μεγέθη συστάδων), το οποίο μπορεί να οδηγήσει στο γρηγορότερο θάνατο μερικών κόμβων. Αυτό αποφεύγεται στο HEED επειδή οι τελικοί επικεφαλής συστάδων επιλέγονται έτσι ώστε να είναι καλά κατανομημένοι μέσα στο δίκτυο και το κόστος επικοινωνίας ελαχιστοποιείται. Όταν μετριέται ο αριθμός κύκλων έως ότου πεθαίνει ο τελευταίος κόμβος, παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται όπως φαίνεται στην εικόνα 49 [41].

Μετρώντας επίσης την ενέργεια που καταναλώνεται στην ομαδοποίηση ως μέρος της συνολικής απελευθερωμένης ενέργειας στο δίκτυο. Για το gen-LEACH, υποτίθεται ότι στο τέλος κάθε κύκλου, κάθε κόμβος στέλνει την πληροφορία της υπολειπόμενης ενέργειάς του στον επικεφαλής συστάδας του, το οποίο αθροίζει αυτές τις πληροφορίες και τις μεταδίδει μέσα στο δίκτυο χρησιμοποιώντας μόνο ένα μήνυμα. Η εικόνα 50 επεξηγεί την ενεργειακή αναλογία για τους διαφορετικούς αριθμούς κόμβων (τα αποτελέσματα των τριών τύπων κόστους HEED επιβάλλονται σχεδόν). Το HEED χρησιμοποιεί τη λιγότερη ενέργεια στην ομαδοποίηση από τον gen-LEACH, αν και η διαδικασία ομαδοποίησής του απαιτεί περισσότερα από ένα βήματα για κάθε κόμβο. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ενέργεια που καταναλώνεται από τον gen-LEACH για τη διάδοση της πληροφορίας της υπολειπόμενης ενέργειας. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι διαπιστώσαμε ότι το αρχικό LEACH χρησιμοποιεί τη λιγότερη ενέργεια στην ομαδοποίηση και αυξάνει τη διάρκεια ζωής και πάνω από το HEED και πάνω από το gen-LEACH όταν χρησιμοποιείται συγκεκριμένα για την εφαρμογή που περιγράφεται στο [15], και στις υποθέσεις που γίνονται εκεί. Αυτό είναι διαισθητικό, δεδομένου ότι το HEED θα επιλέξει ένα μόνο επικεφαλής συστάδας κάθε φορά για ολόκληρο το δίκτυο, εάν κάθε κόμβος μπορεί να φθάσει σε όλους τους άλλους κόμβους στο δίκτυο σε ένα βήμα, ενώ ο LEACH θα διανείμει το φορτίο μεταξύ μερικών επικεφαλής συστάδων.



Εικόνα 50: Ποσοστό ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για την ομαδοποίηση σε σχέση με την συνολική ενέργεια [41]

Τέλος, μελετήθηκε στο [41] η επίδραση της απόστασης μεταξύ του κόμβου προορισμού και του δικτύου, στη διάρκεια ζωής του δικτύου (που χρησιμοποιεί τον καθορισμό «του θανάτου του τελευταίου κόμβου» για την διάρκεια ζωής του δικτύου). Σε αυτό το πείραμα, υπολογίστηκε ο αριθμός κύκλων στον οποίο το δίκτυο ήταν ζωντανό χρησιμοποιώντας τους διαφορετικούς τύπους κόστους HEED, το gen-LEACH, και την άμεση επικοινωνία. Καθορίστηκε η Χ-συντεταγμένη του κόμβου προορισμού και διαφοροποιήθηκε το ύψος (Υ-συντεταγμένη). Η απόσταση υπολογίζεται από τον κόμβο προορισμού στο πιο κοντινό σημείο στο δίκτυο. Ο αριθμός κόμβων καθορίστηκε σε 500. Η εικόνα 51 δείχνει ότι το HEED παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, έναντι του gen-LEACH και την άμεση επικοινωνία. Η διάρκεια ζωής του δικτύου επιδεινώνεται σοβαρά κατά τη χρησιμοποίηση της άμεσης επικοινωνίας καθώς η απόσταση αυξάνεται, το οποίο υπογραμμίζει τα πλεονεκτήματα της ομαδοποίησης του δικτύου. Η άμεση επικοινωνία στις μεγάλες αποστάσεις οδηγεί επίσης στα σοβαρά προβλήματα παρεμβολής, ειδικά στα πυκνά δίκτυα. Η χρησιμοποίηση της άμεσης επικοινωνίας μπορεί να είναι ανεκτή μόνο όταν ο κόμβος προορισμού είναι πολύ κοντά στο δίκτυο (που δεν είναι η περίπτωση σε αυτήν την εφαρμογή), για να αποφευχθεί η επικεφαλίδα της ομαδοποίησης.



Εικόνα 51: Διάρκεια ζωής δικτύου για ένα 500 κόμβων δίκτυο καθώς ο κόμβος μετακινείται [41]

### 3.5.6.4 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

- Ο αριθμός των επαναλήψεων για την ολοκλήρωση του αλγόριθμου είναι ανεξάρτητος από την ακτίνα των συστάδων και είναι  $O(1)$ .
- Η διάρκεια ζωής του δικτύου επεκτείνεται σε σχέση με το gen-LEACH (και όσο αφορά τον χρόνο που ο πρώτος κόμβος πεθαίνει και το χρόνο που ο τελευταίος κόμβος πεθαίνει)

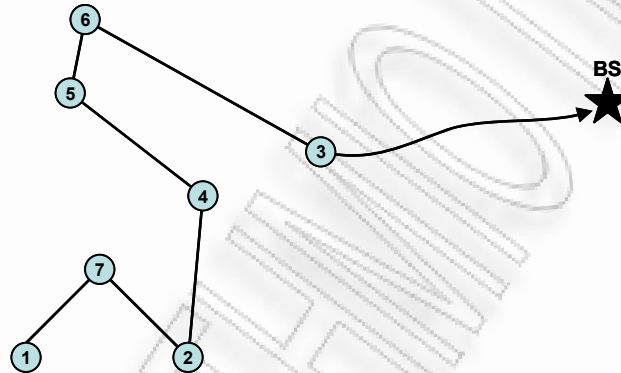


### Μειονεκτήματα

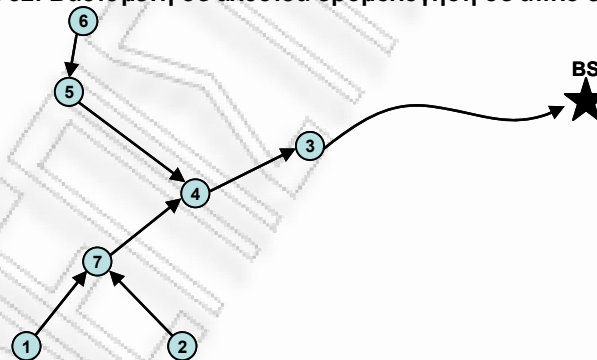
- Στον HEED, οι δοκιμαστικοί επικεφαλής συστάδας επιλέγονται τυχαία βασισμένοι στην υπολειπόμενη ενέργειά τους. Επομένως, ο HEED δεν μπορεί να εγγυηθεί τη βέλτιστη επιλογή επικεφαλής από την άποψη της ενέργειας, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί τη δευτερεύουσα παράμετρο για να επιλύσει τις συγκρούσεις.

### 3.5.7 PEDAP (Power Efficient Data gathering and Aggregation Protocol)

Στο [42] παρουσιάστηκε ένα βασισμένο σε δέντρο πρωτόκολλο συνάθροισης το PEDAP (Power Efficient Data gathering and Aggregation Protocol) και η ενεργειακά ενήμερη έκδοσή του. Το PEDAP παρατείνει τη διάρκεια ζωής του τελευταίου κόμβου στο σύστημα παρέχοντας μια καλή διάρκεια ζωής για τον πρώτο κόμβο, ενώ η ενεργειακά ενήμερη έκδοσή του επιτρέπει κοντά στη βέλτιστη διάρκεια ζωής του πρώτου κόμβου αν ελαφρώς μειωθεί η διάρκεια ζωής του τελευταίου κόμβου. Ένα άλλο πλεονέκτημα των πρωτοκόλλων είναι ότι βελτιώνουν τη διάρκεια ζωής του συστήματος ακόμα κι αν ο σταθμός βάσης είναι μέσα στον τομέα, ενώ το LEACH και το PEGASIS δεν μπορούν.



Εικόνα 52: Βασισμένη σε αλυσίδα δρομολόγηση σε απλό δίκτυο [42]



Εικόνα 53: Δρομολόγηση βασισμένη στο ελάχιστο δέντρο ανάπτυξης σχήμα σε απλό δίκτυο [42]

Η κύρια ιδέα, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου, πρέπει να είναι να ελαχιστοποιηθεί η συνολική ενέργεια που χρησιμοποιείται στο σύστημα σε έναν κύκλο επικοινωνίας, ισορροπώντας ταυτόχρονα την κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των κόμβων.

Το πρώτο μέρος της ιδέας μπορεί να πραγματοποιηθεί βέλτιστα με τον υπολογισμό ενός ελάχιστου δέντρου ανάπτυξης πάνω στο δίκτυο αισθητήρων με τις δαπάνες  $C_{ij}$  συνδέσεων (που δίνεται στην εξίσωση (4) μεταξύ των κόμβων και του  $C_i$  (που δίνονται στην εξίσωση (5) μεταξύ των κόμβων και του σταθμού βάσης. Στις εξισώσεις αυτές  $E_{elec}$  είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τα συστήματα αποστολής,  $E_{amp}$  είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τον ενισχυτή του σήματος,  $d_{ij}$  η απόσταση των δύο κόμβων και  $d_{ib}$  η απόσταση ενός κόμβου από το σταθμό βάσης. Τα πακέτα στοιχείων καθοδηγούνται έπειτα στο σταθμό βάσης πάνω από τις κορυφές του υπολογισμένου δέντρου ελάχιστης κατανάλωσης. Καλούμε αυτήν την στρατηγική δρομολόγησης ως PEDAP.

$$C_{ij}(k) = 2 * E_{elec} * k + E_{amp} * k * d_{ij}^2 \quad (4)$$

ή

$$C_i'(k) = E_{elec} * k + E_{amp} * k * d_{ib}^2 \quad (5)$$

Η εικόνα 52 από το [42] επεξηγεί σχετικά την ιδέα. Αν και το PEDAP δεν λαμβάνει υπόψη το ζήτημα ισορροπίας της ενέργειας, επιτυγχάνει πάντα μια καλή διάρκεια ζωής για τον τελευταίο κόμβο. Αυτό επειδή, μέχρι το χρόνο που ο πρώτος κόμβος πεθαίνει, η ελάχιστη πιθανή ενέργεια χρησιμοποιείται από ολόκληρο το σύστημα. Έτσι η συνολική υπολειπόμενη ενέργεια είναι βέλτιστη για τους υπόλοιπους κόμβους. Αυτό ισχύει για κάθε θάνατο, κατά συνέπεια μετά από κάθε θάνατο κόμβου η υπολειπόμενη ενέργεια στο σύστημα είναι μέγιστη. Έτσι το πρωτόκολλο PEDAP επιτυγχάνει σχεδόν τη βέλτιστη διάρκεια ζωής για τον τελευταίο κόμβο στο σύστημα, παρέχοντας μια καλή διάρκεια ζωής για τον πρώτο κόμβο.

Προκειμένου να επιτευχθεί το δεύτερο μέρος της ιδέας, την ισορροπία του φορτίου (στο εξής κατανάλωση ενέργειας) μεταξύ των κόμβων, χρησιμοποιήθηκε η πληροφορία για την υπολειπόμενη ενέργεια κάθε κόμβου. Όταν ο σταθμός βάσης είναι μακριά από τους κόμβους, ο κόμβος που πεθαίνει πρώτα είναι συνήθως αυτός που στέλνει τα αθροισμένα και συγχωνευμένα δεδομένα στο σταθμό βάσης. Έτσι, ένας κόμβος με χαμηλή υπολειπόμενη ενέργεια δεν θα ήθελε να στείλει στο σταθμό βάσης. Αυτός ο κόμβος θα επιθυμούσε να χρησιμοποιήσει την υπολειπόμενη ενέργειά του με την αποστολή σε έναν κοντινό γείτονα και προσπαθώντας έτσι να μεγιστοποιήσει τη διάρκεια ζωής του. Επίσης ένας χαμηλής ενέργειας κόμβος δεν θα επιθυμούσε να λάβει πολλά πακέτα από άλλους κόμβους, μιας και η λήψη είναι επίσης μια λειτουργία υψηλής ενέργειας. Η τάση του θα ήταν μόνο να στείλει τα στοιχεία του και να μην λάβει τίποτα. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, μας βοηθά μια μικρή αλλαγή στις συναρτήσεις κόστους. Οι νέες συναρτήσεις κόστους θα είναι οι ακόλουθες:

$$C_{ij}(k) = \frac{2 * E_{elec} * k + E_{amp} * k * d_{ij}^2}{e_i} \quad (6)$$

ή

$$C_i'(k) = \frac{E_{elec} * k + E_{amp} * k * d_{ib}^2}{e_i} \quad (7)$$

όπου  $e_i$  είναι η υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου  $i$  η οποία είναι σε σχέση με τη μέγιστη ενέργεια στην μπαταρία (π.χ.  $0 \leq e_i \leq 1$ ).

Όπως φαίνεται τώρα το κόστος επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων δεν είναι συμμετρικό. Σύμφωνα με την (6) το κόστος αποστολής μηνύματος από τον κόμβο  $i$  στους γείτονές του αυξάνεται καθώς η υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου  $i$  μειώνεται. Παρόλο που αυτή η νέα φόρμουλα συνήθως δεν αλλάζει την επιλογή του γείτονα που θα στείλει ο κόμβος, αναβάλλει την περίληψη του κόμβου στο δέντρο. Όσο πιο αργότερα ο κόμβος συμπεριλαμβάνεται στο δέντρο τόσο πιο λιγότερα μηνύματα θα λάβει. Σύμφωνα με την (7), για ένα χαμηλής ενέργειας κόμβο το κόστος αποστολής στο σταθμό βάσης αυξάνεται και επομένως η επιθυμία αποστολής του στο σταθμό βάσης μειώνεται. Έτσι εάν ο αλγόριθμος ανάπτυξης του δέντρου εκτελείται περιοδικά κάθε συγκεκριμένο αριθμό κόμβων (όπως 100), ένα πιο ενεργειακά ενήμερο σχήμα δρομολόγησης βρίσκεται για την επόμενη περίοδο, που εξαρτάται από την παρούσα κατάσταση (ενεργοί κόμβοι και ενέργειά τους). Αυτή είναι η ιδέα πίσω από την ενεργειακά ενήμερη έκδοση του PEDAP το οποίο ονομάζουμε PEDAP-PA (Power Efficient Data gathering and Aggregation Protocol - Power Aware).

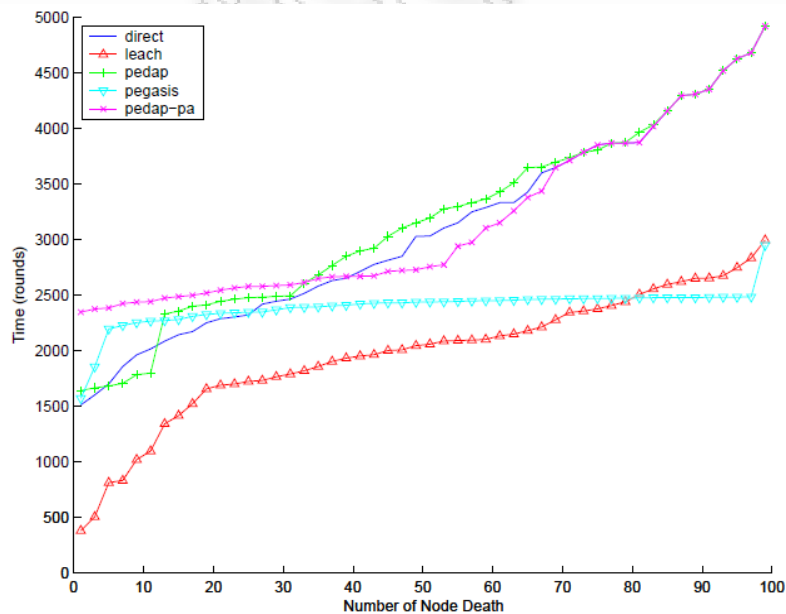
### 3.5.7.1 Λεπτομέρειες του αλγορίθμου PEDAP

Το πρωτόκολλο PEDAP προϋποθέτει ότι η θέση των κόμβων είναι γνωστή στο σταθμό βάσης a priori. Και οι δύο αλγόριθμοι είναι συγκεντρωτικοί, με το σταθμό βάσης να είναι υπεύθυνος για τον υπολογισμό των πληροφοριών δρομολόγησης. Αυτό επειδή σε συστήματα όπου κάποια στοιχεία είναι περιορισμένα σε πόρους και κάποια δεν είναι, είναι επιθυμητό να δίνεται το φορτίο του υπολογισμού στα πιο δυνατά στοιχεία του συστήματος.

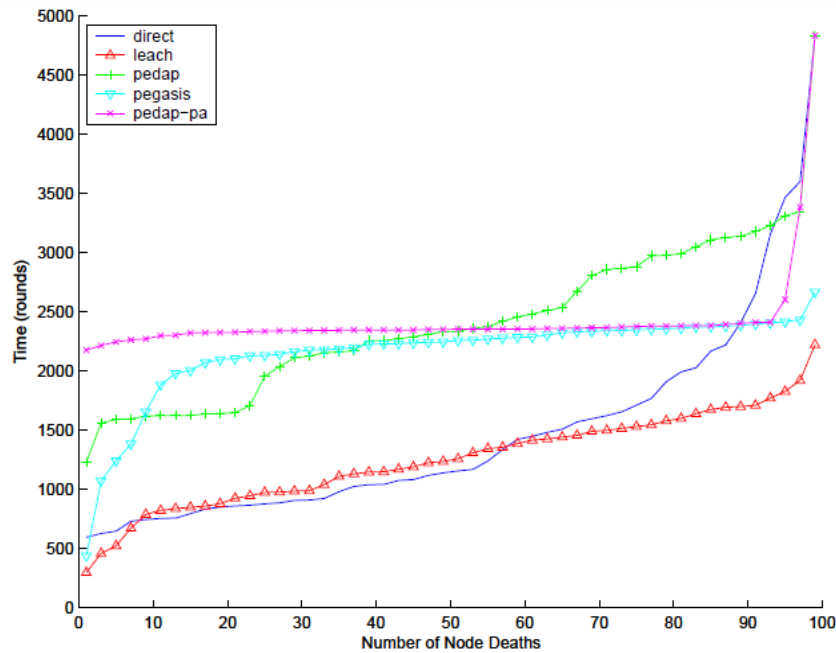
Οι πληροφορίες δρομολόγησης υπολογίζονται με την χρήση του αλγορίθμου ανάπτυξης του ελάχιστου δέντρου όπου ο σταθμός βάσης είναι η ρίζα. Ο αλγόριθμος λειτουργεί όπως παρακάτω: Αρχικά επιλέγουμε έναν κόμβο ως ρίζα (το σταθμό βάσης στην συγκεκριμένη περίπτωση). Μετά σε κάθε επανάληψη επιλέγουμε την ελάχιστου βάρους κορυφή από μια κορυφή του δέντρου προς μια κορυφή εκτός δέντρου και την προσθέτουμε στο δέντρο. Στην περίπτωση μας αυτό σημαίνει ότι η κορυφή που συμπεριλήφθηκε στο δέντρο θα στείλει τα δεδομένα μέσω της σύνδεσης αυτής. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία μέχρι όλοι οι κόμβοι να συμπεριληφθούν στο δέντρο. Στην εικόνα 53 φαίνεται το αποτέλεσμα για το υποτυπώδες δίκτυο. Η δυσκολία του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι  $O(n^2)$  όπου  $n$  ο αριθμός των κόμβων του δικτύου.

Όπως φαίνεται, ο σταθμός βάσης συμπεριλαμβάνεται στη γραφική παράσταση του δικτύου. Κατά συνέπεια, με τον υπολογισμό ενός ελάχιστου δέντρου ανάπτυξης πάνω από αυτήν την γραφική παράσταση με τις συναρτήσεις κόστους να δίνονται όπως παραπάνω και με τη δρομολόγηση των πακέτων σύμφωνα με το δέντρο ανάπτυξης, επιτυγχάνουμε ένα σύστημα ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης. Εκτός από τη γνώση των θέσεων των κόμβων, ο σταθμός βάσης μπορεί επίσης να υπολογίσει τα υπόλοιπα ενεργειακά επίπεδα των κόμβων με τη χρησιμοποίηση του δεδομένου μοντέλου δαπανών, δεδομένου ότι ξέρει πόση ενέργεια ένας κόμβος ξοδεύει σε έναν κύκλο. Μετά από κάποιο ορισμένο αριθμό κύκλων που περνούν (πχ. 100) ο σταθμός βάσης επαναυπολογίζει τις πληροφορίες δρομολόγησης αποκλείοντας τους νεκρούς κόμβους. Μετά από κάθε υπολογισμό, ο σταθμός βάσης στέλνει σε κάθε κόμβο τις απαραίτητες πληροφορίες για τον κόμβο (δηλ. το γονέα του κόμβου στο δέντρο προκειμένου να φθάσει στο σταθμό βάσης, τον αριθμό σχισμής χρόνου όπου θα στείλει ο κόμβος τα δεδομένα του στο γονέα του σε έναν κύκλο, από πόσους διαφορετικούς γείτονες ο κόμβος θα λάβει τα πακέτα σε έναν κύκλο και πότε, κ.λπ.). Έτσι, το κόστος της καθιέρωσης του συστήματος με τις νέες πληροφορίες δρομολόγησης είναι ίσο με το σύνολο των δαπανών των κυκλωμάτων λήψης κάθε κόμβου. Επομένως, το κόστος οργάνωσης για την περιοδική καθιέρωση του σχήματος δρομολόγησης είναι μικρό έναντι του LEACH και του PEGASIS.

Και για τους δύο αλγορίθμους το πρωτόκολλο είναι ίδιο. Το μόνο που πρέπει να αλλάξει είναι οι συναρτήσεις κόστους. Έτσι η εναλλαγή μεταξύ των δύο πρωτοκόλλων απαιτεί μια μικρή μόνο αλλαγή στο σταθμό βάσης και καμία αλλαγή στους κόμβους.



Εικόνα 54: Χρόνοι όπου οι κόμβοι πεθαίνουν σε ένα 50X50μ. δίκτυο. Ο σταθμός βάσης βρίσκεται στο κέντρο [42]



Εικόνα 55: Χρόνοι όπου οι κόμβοι πεθαίνουν σε ένα 100X100μ. δίκτυο. Ο σταθμός βάσης βρίσκεται στο κέντρο [42]

### 3.5.7.2 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

- Καλύτερη απόδοση από το LEACH και το PEGASIS όσον αφορά τον χρόνο που ο πρώτος κόμβος και ο τελευταίος κόμβος πεθαίνουν ανεξάρτητα εάν ο σταθμός βάσης βρίσκεται στο κέντρο του πεδίου ή εκτός.
- Καλύτερη απόδοση στην περίπτωση που ο σταθμός βάσης βρίσκεται μέσα στο κέντρο του πεδίου ελέγχου.
- Μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση που ο σταθμός βάσης και κάποιοι κόμβοι δεν βρίσκονται σε άμεση επικοινωνία, με την εφαρμογή ενός κατακευματισμένου αλγόριθμου ελάχιστου δέντρου ανάπτυξης. Αυξάνεται όμως το κόστος δημιουργία του δέντρου.

#### Μειονεκτήματα

- Γνώση από το σταθμό βάσης της θέσεως των κόμβων.
- Δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας με το σταθμό βάσης.
- Ο αλγόριθμος είναι συγκεντρωτικός και τον έλεγχο τον έχει ο σταθμός βάσης.

### 3.5.8 Αλγόριθμος αυτό-οργάνωσης (SELF-ORGANIZING ALGORITHM)

Στο [5] περιγράφεται ένας αλγόριθμος που βοηθά στην αυτό-οργάνωση ενός συνόλου κόμβων αισθητήρων που διασκορπίζεται τυχαία σε μια περιοχή. Το δίκτυο αποτελείται από δύο τύπους αισθητήρων: τους αισθητήρες δρομολογητές που προωθούν τα δεδομένα και τους εξειδικευμένους αισθητήρες που ανιχνεύουν τα γεγονότα. Οι αισθητήρες δρομολογητές αυτό-διαμορφώνονται σε ένα δίκτυο χρησιμοποιώντας αυτόν τον αλγόριθμο και οι εξειδικευμένοι αισθητήρες παρακολουθούν μόνο τους κοντινότερους αισθητήρες δρομολογητές που είναι ζωντανοί. Ο αλγόριθμος αποτελείται από τέσσερις φάσεις και εκτελεί τις ακόλουθες διαδικασίες στη σειρά που αναφέρονται:

- Φάση ανακαλύψεως: Κάθε κόμβος ανακαλύπτει ανεξάρτητα το σύνολο των γειτόνων του στο δίκτυο και καθορίζει τη μέγιστη ακτίνα του μετάδοσης δεδομένων.

- **Φάση οργάνωσης:** Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης το δίκτυο οργανώνεται και εκτελούνται οι ακόλουθες διαδικασίες:

(α) Οι κόμβοι ομαδοποιούνται σε ομάδες και οι ομάδες ομαδοποιούνται σε μεγαλύτερες ομάδες. Κατά αυτόν τον τρόπο, μια ιεραρχία των ομάδων διαμορφώνεται στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος εξασφαλίζει ότι η ιεραρχία είναι ισορροπημένη.

(β) Σε κάθε κόμβο διατίθεται μια διεύθυνση βασισμένη στη θέση του στην ιεραρχία.

(γ) Ένας πίνακας δρομολόγησης του  $O(\log n)$  υπολογίζεται για κάθε κόμβο στο δίκτυο.

(δ) Ένα δέντρο μετάδοσης ανοικτής εκπομπής και μια γραφική παράσταση μετάδοσης ανοικτής εκπομπής που εκτείνεται σε όλους τους κόμβους κατασκευάζονται. Η γραφική παράσταση μετάδοσης ανοικτής εκπομπής μετατρέπεται έπειτα σε μια κατευθυνόμενη ακυκλική γραφική παράσταση βασισμένη στον κόμβο πηγής στο δίκτυο.

- **Φάση συντήρησης:** Στη φάση συντήρησης εκτελούνται οι ακόλουθες διαδικασίες.

(α) Στον ενεργό έλεγχο, κάθε κόμβος παρακολουθεί την αποθηκευμένη ενέργεια του και στέλνει συνεχώς το μήνυμα «είμαι ζωντανός» στους γείτονές του κάθε 30sec. Στον παθητικό έλεγχο, ο κόμβος στέλνει το μήνυμα ενεργοποίησης στους γείτονές του μόνο κατόπιν παραγγελίας.

(β) Κάθε κόμβος ενημερώνει συνεχώς τον πίνακα δρομολόγησής του για τον επόμενο κόμβο στην πορεία κατανάλωσης λιγότερης ενέργειας και στην πορεία μικρότερης καθυστέρησης στις ομάδες όπως υπαγορεύονται από τον αλγόριθμο.

(γ) Οι κόμβοι ενημερώνουν επίσης τους γείτονές τους για τους πίνακες δρομολόγησής τους και τα ενεργειακά επίπεδά τους στους γειτονικούς κόμβους τους.

(δ) Τα ανεκτικές δέντρα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής ελαττωμάτων και τα γραφήματα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής διατηρούνται χρησιμοποιώντας τους Local Markov Loops (LML).

- **Φάση αυτό-αναδιοργάνωσης:** Σε αυτήν την φάση, ένας κόμβος μπορεί να ανιχνεύσει τον διαχωρισμό της ομάδας ή τις αποτυχίες κόμβων και να αλλάξει τον πίνακα δρομολόγησής του βασισμένο στη νέα τοπολογία. Εάν όλοι οι γείτονες ενός κόμβου αποτυγχάνουν, κατόπιν ο κόμβος επαναλαμβάνει τη φάση ανακαλύψεων. Εάν ένα χωρίσμα ομάδας εμφανίζεται λόγω αποτυχίας συνδέσεως ή κόμβου, οι υποομάδες αναδιοργανώνονται και ενώνονται με νέες ομάδες. Η αναδιοργάνωση ομάδας εξασφαλίζει ότι η ιεραρχία είναι ακόμα ισορροπημένη.

Παρακάτω δίνεται, σύμφωνα με το [5] μια πλήρη περιγραφή κάθε φάσης και επιδεικνύεται συγκεκριμένα πώς η διευθυνσιοδότηση, η δρομολόγηση και η broadcast μετάδοση των πληροφοριών εκτελούνται σε αυτό το αυτο-οργανωμένο δίκτυο.

### 3.5.8.1 Φάση ανακαλύψεως

Στη φάση ανακαλύψεως, κάθε κόμβος ανακαλύπτει το σύνολο γειτόνων του στο δίκτυο. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που εξετάζονται βρίσκοντας το σύνολο γειτόνων για έναν ιδιαίτερο κόμβο. Ένας κόμβος δεν πρέπει να έχει πολλούς γείτονες επειδή η κεραία του δέκτη του κόμβου πρέπει να είναι "time multiplexed" μεταξύ των διάφορων κόμβων και ως εκ τούτου η χρονική φέτα που λαμβάνεται για κάθε κόμβο είναι εξαιρετικά λίγη και με αυτόν τον τρόπο η καθυστέρηση του συστήματος αυξάνεται και η ρυθμοαπόδοση μειώνεται. Ένας άλλος παράγοντας που εξετάζεται είναι η μέγιστη ακτίνα της μετάδοσης για κάθε κόμβο. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται στη μετάδοση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ του αποστολέα και του δέκτη. Ως εκ τούτου κάθε κόμβος θα χρησιμοποιούσε πολλή ενέργεια διαβιβάζοντας τα δεδομένα. Στην πραγματικότητα, κάθε κόμβος οριοθετεί το σύνολό του γειτόνων και της μέγιστης ακτίνας μετάδοσης. Απ' την άλλη, ένας κόμβος  $X$  θα επιθυμούσε να έχει έναν ελάχιστο αριθμό γειτόνων  $n(x)$  για εκτιμήσεις απόδοσης. Για τους εξειδικευμένους αισθητήρες  $n(x)=1$  αλλά για τους δρομολογητές αισθητήρες το  $n(x)$  πρέπει να είναι υψηλότερο. Αυτό θα εξαρτηθεί από την εφαρμογή και την πυκνότητα των αισθητήρων στο δίκτυο.

### Βήματα φάσης ανακάλυψης

1. Κάθε κόμβος  $x$  επιλέγει μια μικρή ακτίνα  $r$  και μεταδίδει ένα μήνυμα “Hello” περίπου σε μια ακτίνα  $r$  και επίσης, δείχνει εάν είναι ένας εξειδικευμένος κόμβος ή ένας κόμβος δρομολογητής.

2. Κάθε κόμβος μέσα σε μια ακτίνα  $r$  απαντάει με ένα μήνυμα «είμαι εδώ» με τις συντεταγμένες του (που καθορίζονται από το GPS).

3. Εάν ο αριθμός των κόμβων που αποκρίθηκε είναι λιγότερος από ένα ελάχιστο κατώτατο όριο  $n(x)$ , κατόπιν το  $x$  μεταδίδει το μήνυμα “Hello” πέρα από μια ακτίνα  $kr$  για  $k > 1$ . Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ο αριθμός κόμβων  $N$  που αποκρίνονται ικανοποιεί το  $n(x) \leq N \leq N(x)$  όπου το  $n(x)$  και το  $N(x)$  δείχνουν το ελάχιστο και το μέγιστο αριθμό γειτόνων που μπορούν να αναγνωριστούν από το  $x$ .

Σημειώστε ότι ένας αισθητήρας δρομολογητών μπορεί να συνδεθεί με οποιοδήποτε τύπο αισθητήρα αλλά ένας εξειδικευμένος αισθητήρας συνδέεται μόνο με τους αισθητήρες δρομολογητών. Η χρησιμοποίηση των βημάτων που περιγράφονται παραπάνω από κάθε κόμβο ανακαλύπτει το σύνολο γειτόνων και τη μέγιστη απόσταση της μετάδοσης.

### 3.5.8.2 Φάση οργάνωσης

Η οργανωτική φάση αποτελείται από διάφορα στάδια:

- Σχηματισμός μιας ιεραρχίας με τη βοήθεια του σχηματισμού ομάδας.
- Εκτέλεση αναδιοργάνωσης ομάδας εάν είναι απαραίτητο.
- Παραγωγή των διευθύνσεων για τους κόμβους.
- Παραγωγή του πίνακα δρομολόγησης σε κάθε κόμβο
- Παραγωγή των δέντρων μετάδοσης ανοικτής εκπομπής και τα γραφήματα μέσα σε μια ομάδα και συγχώνευση των γραφικών παραστάσεων μετάδοσης ανοικτής εκπομπής και των δέντρων όποτε οι ομάδες συγχωνεύονται.

Παρακάτω περιγράφεται κάθε στάδιο λεπτομερώς. Στην αρχή θα ήταν απαραίτητο να γίνει κατανοητό πώς μια ιεραρχία βρίσκεται με έναν διανεμημένο τρόπο και πώς η αναδιοργάνωση ομάδας βοηθά στην παραγωγή μιας ισοροπημένης ιεραρχίας.

#### Διαμόρφωση ομάδας

Το βασικό βήμα στον αλγόριθμο είναι η φάση παραγωγής ομάδας. Αφού έχει βρει κάθε κόμβος το σύνολο γειτόνων του, κάθε δρομολογητής κόμβος προσπαθεί να διαμορφώσει μια μικρή βασική ομάδα με τους γείτονές του. Κάθε ομάδα είναι περιορισμένη σε ένα μέγεθος  $8$  μελών και κάθε κόμβος πρέπει να ανήκει σε ακριβώς μια βασική ομάδα. Σε κάθε κόμβο στην ομάδα διατίθεται μια διεύθυνση 3-bit και κάθε κόμβος διατηρεί την απόσταση και το επόμενο βήμα(hop) για την επικοινωνία κάθε άλλου κόμβου στην ομάδα.

#### Συγχώνευση ομάδων

Υποθέστε ότι υπάρχουν 2 ομάδες  $G_1$  και  $G_2$  με διευθύνσεις των  $m$  και  $n$  bit αντίστοιχα. Από τις διευθύνσεις  $n$ -bit, λαμβάνουμε ότι κάθε κόμβος  $G_2$  έχει μια διεύθυνση  $n$ -bit. Για μια βασική ομάδα, έχουμε  $n = 3$ . Υποθέστε το  $m \geq n$  χωρίς απώλεια γενικότητας. Ο αλγόριθμος έχει μια βασική παράμετρο διαφοράς ύψους συγκεκριμένα  $\Delta > 0$  που υπαγορεύει τη μέγιστη διαφορά ύψους ανεκτή για τη συγχώνευση δέντρων. Επομένως εάν  $m - n \leq \Delta$ , έπειτα τα  $G_1$ ,  $G_2$  συγχωνεύονται σε μια ομάδα  $G$  και όλοι οι κόμβοι στο  $G_1$  προσθέτουν το bit 0 μπροστά από τη διεύθυνσή τους και όλοι οι κόμβοι στο  $G_2$  προσθέτουν το bit 1 μπροστά από τη διεύθυνσή τους. Εάν  $m - n > \Delta$  εξετάζεται έπειτα η διεύθυνση κάποιου κόμβου που συνδέει το  $G_1$  με έναν κόμβο του  $G_2$ . Υποθέτουμε αυτόν τον κόμβο να είναι  $x$  και με μια διεύθυνση  $(x_1, x_2, \dots, x_m)$ . Εξετάζουμε την υποομάδα  $H_i$  που διαμορφώνεται από το σύνολο όλων των κόμβων  $G_1$  με τα πρώτα κομμάτια  $i$  ίσα με  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$  για  $i \leq m - n - 1$ . Από την ιδιότητα σχηματισμού ομάδας μπορεί να δει κανείς ότι το  $H_i$  συνδέεται. Ανακαλύψτε εάν το  $H_{m-n-1}$  έχει αρκετό ελεύθερο διάστημα διευθύνσεων για την προσαρμογή του  $G_2$  μέσα στην υποομάδα του. Με αρκετό διάστημα,

απαιτούμε να ξέρουμε εάν  $H_{m-n-1}$  έχει ένα υποκατάστημα στην ιεραρχία του όπου το  $G_2$  μπόρεσε να προστεθεί στην ιεραρχία  $H_{m-n-1}$  χωρίς την επιρροή του ύψους του  $H_{m-n-1} \cup G_2$ . Εάν δεν είναι δυνατό να εκτελεσθεί αυτή η συγχώνευση δοκιμάζουμε το ίδιο πράγμα με  $H_i$  για τη μέγιστη αξία του  $i$  από το  $m-n-2$  έως 1. Εάν δεν είναι δυνατό να συγχωνεύσει με οποιαδήποτε τιμή του  $i$ , κατόπιν συγχωνεύουμε το  $G_2$  με το  $G_1$  στην αρχική μόδα και χαρακτηρίστε τη νέα γραφική παράσταση ως ασυμμετρία ύψους.

#### Αναδιοργάνωση ομάδων

Μια ιεραρχία μιας ομάδας πρέπει να αναδιοργανωθεί όταν έχει ασυμμετρία ύψους σε πολλαπλά επίπεδα. Εάν η ιεραρχία της ομάδας δεν είναι εξισορροπημένη, τότε η ομάδα σπάει σε υποομάδες μικρότερου μεγέθους που ανασυγκροτούνται με παρόμοιο τρόπο για να παραχθεί μια ιεραρχία που είναι ισορροπημένη. Αυτή η αναδιοργάνωση δεν έχει επιπτώσεις στην κατάσταση του υπολοίπου δικτύου. Μερικοί πίνακες δρομολόγησης κοντινών κόμβων θα πρέπει να αλλάξουν τις διευθύνσεις των γειτόνων τους.

#### Διαμόρφωση της ιεραρχίας

Το σημαντικότερο μέρος του αλγορίθμου είναι ο σχηματισμός ιεραρχίας. Υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος έχει τελειώσει τον αλγόριθμο σχηματισμού βασικής ομάδας. Εάν ένας κόμβος δεν είναι ικανός να προσχωρήσει σε οποιαδήποτε ομάδα, διαμορφώνει μια ομάδα με διεύθυνση 000. Ένας κόμβος μιας ομάδας  $G$  είναι ένας οριακός κόμβος εάν συνδέεται με έναν κόμβο κάποιας άλλης ομάδας. Θέστε την τιμή του  $\Delta$  να είναι το ύψος μιας βασικής ομάδας που είναι 3. Τα ακόλουθα βήματα πραγματοποιούνται για να λάβουν την ιεραρχία:

- Κάθε ομάδα  $G$  λαμβάνει διαφημίσεις από τις παρακείμενες ομάδες της μέσω των οριακών κόμβων της. Αυτά τα μηνύματα είναι broadcast μετάδοση σε όλη την ομάδα. Κάθε διαφήμιση αποτελείται από το μέγεθος της παρακείμενης ομάδας (αριθμός bit διευθύνσεων).
- Κάθε κόμβος συμπεριλαμβάνεται σε μια παρακείμενη ομάδα  $G'$  που είναι η πιο κοντινή στο μέγεθος του  $G$  και έχει το μεγαλύτερο αριθμό οριακών κόμβων.
- Ο κόμβος της  $G$  στέλνει το μήνυμα συμμετοχής πίσω στην  $G'$ . Εάν η  $G'$  αποφασίσει επίσης να ενωθεί με το  $G$ , κατόπιν οι δύο ομάδες συγχωνεύουν αλλιώς το  $G$  επιλέγει την επόμενη καλύτερη ομάδα  $H$ .
- Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου συγχωνεύονται όλες οι ομάδες σε μία. Σε οποιοδήποτε σημείο εάν μια ομάδα δεν είναι ισορροπημένη (η ιεραρχία δεν είναι ισορροπημένη) έπειτα η ομάδα αναδιοργανώνεται με μια αυξανόμενη τιμή  $\Delta_{\text{new}} = \Delta_{\text{old}} + 1$ .

**Θεώρημα 1:** Το ύψος της ιεραρχίας του δικτύου θα είναι  $O(\log n)$  όπου το  $n$  είναι ο αριθμός των κόμβων στη γραφική παράσταση.

Το ανωτέρω θεώρημα προκύπτει από την ιδιότητα του ιεραρχικού δέντρου να είναι ισορροπημένο σε ύψος. Για να δοθεί μια γενική εικόνα, εάν η τιμή του  $\Delta=3$ , τότε κάθε κόμβος σε ένα δίκτυο αισθητήρων 10000 κόμβων θα έχει μια δεκαεξάμπιτη (16bit) διεύθυνση.

#### Διαμόρφωση του πίνακα δρομολόγησης

Χρησιμοποιώντας τον ανωτέρω ιεραρχικό αλγόριθμο διαμόρφωσης, ένα ιεραρχικό δέντρο μπορεί να διαμορφωθεί στο δίκτυο και κάθε κόμβος θα έχει μια διεύθυνση. Ας υποθέσουμε ότι κάθε κόμβος έχει μια διεύθυνση ομάδας  $m$ -bit. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, μπορούμε να κατασκευάσουμε έναν πίνακα δρομολόγησης σε κάθε κόμβο. Ας υποθέσουμε ότι  $(x_1, x_2, \dots, x_m)$  είναι η διεύθυνση ενός δρομολογητή αισθητήρα  $x$ . Τότε αυτός ο αισθητήρας θα διατηρούσε το λιγότερο κόστος και το επόμενο βήμα (next hop) στην κοντινότερη πορεία στους ακόλουθους προορισμούς  $(x'_1, (x_1, x'_2), \dots, (x_1, \dots, x_{m-1}, x'_m)$ . Παραδείγματος χάριν, ας υποθέσουμε ότι η τιμή του  $m$  είναι 4. Ας υποθέσουμε ότι ένας δρομολογητής κόμβος έχει τη διεύθυνση 0011. Αυτός ο κόμβος διατηρεί το επόμενο βήμα στις ομάδες 1, 01, 000, 0010. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να διατηρηθεί ένας πίνακας δρομολόγησης του  $O(m)$  σε κάθε κόμβο και να εκτελεσθεί η ιεραρχική δρομολόγηση.

Ωστόσο μια προσωρινή μνήμη μπορεί να υιοθετηθεί σε κάθε κόμβο για να εναποθηκεύσει το επόμενο βήμα για τις συγκεκριμένες ομάδες προορισμού. Αλλά αυτό το σχήμα προσωρινής

αποθήκευσης πρέπει να καταδεικνύει τον επόμενο κόμβο (next hop) κατά μήκος όλων των κόμβων στην πορεία. Ακόμα κι αν ένας κόμβος χάσει την πληροφορία, η πληροφορία χάνεται.

### Γραφήματα και δέντρα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής

Τα γραφήματα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής αναφέρονται στη χρήση των γενικευμένων γραφημάτων για την ανοικτής εκπομπής αναμετάδοση παρά τη χρησιμοποίηση των αναπτυσσόμενων δέντρων. Η αντίληψη είναι ότι ένας κόμβος θα είναι προσιτός μέσω πολλαπλάσιων πορειών από την πηγή και με αυτόν τον τρόπο η ανοχή σε λάθη (fault-tolerance) προστίθεται στο σύστημα. Στα δίκτυα αισθητήρων, τα γραφήματα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής θα καταλάωναν περισσότερη ενέργεια από τα δέντρα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής. Στην περίπτωση μας, τα γραφήματα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής μετασχηματίζονται στα κατευθυνόμενα άκυκλα γραφήματα που κατευθύνονται από την πηγή. Επομένως δεν υπάρχει κανένας βρόχος στο γράφημα. Για να μειώσουμε την κατανάλωση ισχύος στα γραφήματα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής, υποδεικνύουμε ορισμένες συνδέσεις ως βασικές συνδέσεις και άλλες συνδέσεις ως δευτερεύουσες. Όλα τα μηνύματα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής διαβιβάζονται άμεσα μέσω των συνδέσεων μετάδοσης ανοικτής εκπομπής παρά με τη χειραψία 3 βημάτων [5]. Κατά μήκος των δευτεροβάθμιων συνδέσεων τα πρωτόκολλα ακολουθούν το μηχανισμό χειραψιών 3 βημάτων [5].

Τα δέντρα και τα γραφήματα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής διαμορφώνονται με τον ακόλουθο τρόπο:

- Όταν διαμορφώνεται μια βασική ομάδα, ένα δέντρο και ένα γράφημα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής κατασκευάζονται για τη βασική ομάδα. Μερικοί κόμβοι του γραφήματος μετάδοσης ανοικτής εκπομπής χαρακτηρίζονται ως βασικοί και διαμορφώνουν το δέντρο μετάδοσης ανοικτής εκπομπής.
- Όταν δύο ομάδες G και H συγχωνεύονται, επιλέγουμε 2 χαμηλού κόστους κορυφές που συνδέουν το G με το H. Ας τις ονομάζουμε  $e_1, e_2$ . Έστω ότι τα γραφήματα και τα δέντρα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής των G και H είναι  $B(G), B(H), T(G)$  και  $T(H)$  αντίστοιχα. Έστω ότι  $cost(e_1) < cost(e_2)$  και έστω ότι η συγχωνευμένη ομάδα είναι το P. Τότε  $B(P) = B(G) \cup B(H) \cup \{e_1, e_2\}$  και  $T(P) = T(G) \cup T(H) \cup \{e_1\}$ .

**Θεώρημα 2:** Η ενέργεια που καταναλώνεται για την broadcast μετάδοση μηνυμάτων με την χρήση αυτής της προσέγγισης είναι  $(n-1)E + nE'/2$  όπου E είναι η μέση ενέργεια που καταναλώνεται για την αποστολή ενός μακροχρόνιου μηνύματος κατά μήκος ενός βήματος, E' είναι η μέση ενέργεια που καταναλώνεται για την αποστολή ενός αιτήματος-ack σύντομο μήνυμα κατά μήκος ενός βήματος και το n είναι ο αριθμός κόμβων στο δίκτυο.

Αυτό είναι καλύτερο από την ενέργεια που καταναλώνεται από το πρωτόκολλο SPIN στο [13]. Εκείνο το πρωτόκολλο καταναλώνει  $(n-1)E + 2eE'$  όπου e είναι ο αριθμός των κορυφών του γραφήματος. Σε οποιοδήποτε σενάριο μετάδοσης ανοικτής εκπομπής, η ενέργεια  $(n-1)E$  που καταναλώνεται είναι αναπόφευκτη και είναι το χαμηλότερο όριο για το ποσό ενέργειας που πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Σε ένα τυπικό δίκτυο αισθητήρων κάθε κόμβος θα έχει περίπου 10-15 γείτονες. Η τιμή του e για ένα τέτοιο δίκτυο θα είναι 6n και ως εκ τούτου η συνολική ενέργεια που χρησιμοποιείται ανά broadcast μετάδοση είναι  $(n-1)E + 12nE'$ . Ο αλγόριθμός μας σώζει κατά έναν παράγοντα 24 κατά μέσο όρο στην πρόσθετη ενέργεια που χρησιμοποιείται ανά broadcast μετάδοση. Αν και η αξία E' είναι πολύ μικρή, η αξία  $2eE'$  μπορεί να είναι πολύ μεγάλη για τα μεγάλα δίκτυα αισθητήρων. Για δύο αισθητήρες που χωρίζονται από μια απόσταση 10 μέτρων, απαιτεί 150nJ ανά bit πληροφορίας για να διαβιβαστεί και 170nJ είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη λήψη ενός bit πληροφορίας. Ένα τυπικό μήνυμα αιτήματος-ack απαιτεί περίπου 8 bytes πληροφορίας για να ανταλλαχθεί μεταξύ των δύο κόμβων. Η αξία E' είναι σε αυτή την περίπτωση 20480nJ. Λαμβάνοντας υπόψη ένα δίκτυο 1000 κόμβων με μια μέση συνδετικότητα 12, ο αλγόριθμός μας καταναλώνει μια πρόσθετη ενέργεια 10mJ ενώ ο αλγόριθμος στο [11] (SPIN) καταναλώνει 240mJ για κάθε broadcast μετάδοση.

### **3.5.8.3 Φάση συντήρησης**

Υπάρχουν δύο τύποι συντήρησης που μπορούν να εκτελεστούν σε ένα self-organizing



σύστημα. Είναι ο ενεργός και ο παθητικός έλεγχος. Στη φάση συντήρησης, θα ήταν απαραίτητο να διατηρηθούν οι συνεπείς πίνακες δρομολόγησης σε κάθε κόμβο καθώς επίσης οι ενημερώσεις των δαπανών των κόμβων σε κάθε κόμβο. Θα ήταν επίσης απαραίτητο να διατηρηθούν τα δέντρα ανοχής λάθους (fault tolerant) της μετάδοσης ανοικτής εκπομπής.

#### Ενεργός εναντίον παθητικού ελέγχου

Στον ενεργό έλεγχο, κάθε κόμβος επαληθεύει την θέση των γειτόνων του περιοδικά. Κάθε κόμβος στέλνει ένα μήνυμα "I am alive" σε όλους τους γείτονές του μια φορά κάθε 30 δευτερόλεπτα εάν δεν έχει στείλει οποιοδήποτε μήνυμα κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 δευτερολέπτων. Εάν ένας κόμβος δεν λαμβάνει μια απάντηση από το γείτόνά του για έξι διαδοχικά χρονικά διαστήματα, ο κόμβος υποθέτει ότι η σύνδεση μεταξύ των δύο κόμβων έχει αποτύχει και αναδιοργανώνει τη δομή της για να ανεχτεί την αποτυχία της σύνδεσης.

Στον αντιδραστικό έλεγχο, ένας κόμβος ελέγχει εάν ένας συγκεκριμένος γείτονας είναι ζωντανός μόνο κατόπιν παραγγελίας. Ο κόμβος A στέλνει ένα ιδιαίτερο μήνυμα "Are you alive?" στον κόμβο B για το οποίο ο κόμβος B αποκρίνεται με ένα ACK. Ο παθητικός έλεγχος χρησιμοποιείται ως μηχανισμός για την διατήρηση της ενέργειας ενός συγκεκριμένου κόμβου.

#### Παράμετροι δρομολόγησης

Η καθυστέρηση δεν είναι ένας πολύ σημαντικός περιορισμός στα δίκτυα αισθητήρων. Θα ήταν πιο συμφέρον να σωθεί η χρησιμοποιούμενη ενέργεια παρά η καθυστέρηση που λαμβάνει χώρα από τα μηνύματα. Ο στόχος της δρομολόγησης είναι να κρατηθεί το δίκτυο ζωντανό για το μέγιστο χρονικό διάστημα. Προτείνονται δύο διαφορετικές άπληστες μετρικές που μπορούν να βοηθήσουν στην επίτευξη αυτού του στόχου. Λαμβάνοντας υπόψη ένα δίκτυο με κάθε κόμβο να έχει μια ορισμένη ενέργεια, είναι ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα να υπολογίσει θεωρητικά την ικανότητα του δικτύου ακόμη και για μια ιδιαίτερη πηγή και έναν κόμβο προορισμού. Στο πρώτο μετρικό, καθοδηγούνται πάντα κατά μήκος της πορείας που έχει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας ανά bit πληροφορίας που διαβιβάζεται. Στο δεύτερο μετρικό, διαβιβάζονται πάντα κατά μήκος της πορείας που μετρά τη μέγιστη ικανότητα από την άποψη των bit που μπορούν να διαβιβαστούν. Λαμβάνοντας υπόψη τους κόμβους A, B με τις ενέργειες E(A), E(B) και ότι ο A καταναλώνει ενέργεια E' για τη διαβίβαση ενός bit στο B και το B καταναλώνει E'' για τη λήψη ενός bit από το A. Η ικανότητα της σύνδεσης μεταξύ του A, B δίνεται από το  $\min(E(A)/E', E(B)/E'')$ .

#### Συντήρηση των πινάκων δρομολόγησης

Κάθε κόμβος ενημερώνει συνεχώς τους γειτονικούς κόμβους του για την μετρική του κόστους και αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται από τους γείτονές του για να ενημερώσουν τους πίνακες δρομολόγησης τους. Το πρόβλημα του υπολογισμού στο άπειρο μπορεί να αποφευχθεί με την μη χρησιμοποίηση της εγγραφής του επόμενου βήματος για την ενημέρωση της εγγραφής του πίνακα δρομολόγησης για μια συγκεκριμένη ομάδα προορισμού. Και οι δύο μετρικές κόστους μπορούν να γίνουν loop-free.

#### Συντήρηση της υποδομής μετάδοσης ανοικτής εκπομπής

Για να διατηρήσει τα ευπροσάρμοστα δέντρα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής παρά τις αποτυχιές κόμβων ή συνδέσεων, είναι απαραίτητο να ανιχνευθούν οι αποτυχιές κόμβων εκ των προτέρων με τον έλεγχο των απαιτήσεων ενέργειας ενός κόμβου. Η αρχή πίσω από την δημιουργία του δέντρου μετάδοσης ανοικτής εκπομπής ανεκτό σε ελάττωμα είναι με την αλλαγή του δέντρου μετάδοσης ανοικτής εκπομπής σε ένα νέο δέντρο όπου ο κόμβος που πρόκειται να αποτύχει να είναι ένας κόμβος φύλλο. Επομένως αυτός ο κόμβος δεν θα πρέπει να μεταδώσει broadcast οποιοδήποτε πληροφορίες σε οποιοδήποτε άλλο κόμβο στο δέντρο. Για τον κόμβο u που πρόκειται να αποτύχει εξετάστε όλες τις άκρες (u, v) που είναι παρόν στο δέντρο μετάδοσης ανοικτής εκπομπής. Κατασκευάστε έναν τοπικό βρόχο Markov (local Markov loop – LML) με την επιλογή μιας τυχαίας άκρης (w, x) έτσι ώστε η άκρη (u, v) είναι μέρος ενός τοπικού βρόχου που διαμορφώνεται με την προσθήκη της άκρης (w, x) στο δέντρο. Αφαιρέστε το (u, v) από το δέντρο. Παίρνουμε ένα νέο δέντρο με το βαθμό του u μειωμένο κατά 1. Εκτελέστε αυτήν την λειτουργία έως ότου το u γίνει ένας κόμβος φύλλο.

### 3.5.8.4 Φάση αναδιοργάνωσης

Η αναδιοργάνωση εμφανίζεται όταν, είτε αποτυγχάνει ένας κόμβος ή όταν εμφανίζεται ένας διαχωρισμός δικτύου. Αναφέρουμε τον τύπο των αποτυχιών και προτείνουμε λύσεις:

- **Αποτυχία κόμβου:** Κάθε κόμβος στέλνει συνεχώς ένα “I am alive” μήνυμα στους γείτονές του. Εάν ένας κόμβος δεν λαμβάνει οποιοδήποτε μήνυμα από έναν γείτονα για περίοδο 6 κύκλων, ο γείτονας υποτίθεται ότι είναι “νεκρός”. Κάθε γείτονας του κόμβου ενημερώνει όλες τις καταχωρήσεις στον πίνακα δρομολόγησής του, όπου το επόμενο βήμα είναι ο κόμβος που “πέθανε”. Εάν ο κόμβος που είναι αναγκασμένος να αποτύχει δεν είναι ένας κόμβος φύλλο του δέντρου μετάδοσης ανοικτής εκπομπής, κατόπιν ο κόμβος γίνεται ένα κόμβω φύλλο από τους τοπικούς βρόχους.

- **Αποτυχία συνδέσεως:** Μια αποτυχία συνδέσεως εμφανίζεται όταν ένας κόμβος γίνεται απρόσιτος από έναν άλλο κόμβο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο πίνακας δρομολόγησης αλλάζει αναλόγως και στους δύο κόμβους. Εάν η κορυφή είναι μια βασική κορυφή στο δέντρο μετάδοσης ανοικτής εκπομπής, ο αλγόριθμος μετατρέπει την αντίστοιχη δευτερεύουσα κορυφή που συνδέει τις δύο ομάδες σε μια βασική κορυφή και εκτελεί έναν τοπικό βρόχο για να βρει μια εναλλακτική κορυφή.

- **Διαχωρισμός ομάδας:** Εάν όλες οι συνδέσεις που συνδέουν δύο μέρη μιας ομάδας αποτυγχάνουν ή εάν μερικοί κρίσιμοι κόμβοι αποτυγχάνουν, η ομάδα διαχωρίζεται σε δύο ή περισσότερα αποσυνδεδεμένα κομμάτια. Αυτά τα αποσυνδεδεμένα κομμάτια θα αναδιοργανωθούν σε νέες ομάδες και θα συγχωνευτούν με άλλες γειτονικές ομάδες. Σε αυτή την περίπτωση, η διεύθυνση όλων των κόμβων στην ομάδα αλλάζει.

- **Επανεύρεση κόμβων:** Υποθέστε ένα σενάριο στο οποίο όλοι οι γειτονικοί κόμβοι ενός συγκεκριμένου κόμβου έχουν αποτύχει. Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος αρχίζει μια φάση επανεύρεσης με μια αρχική ακτίνα ίση με την προηγούμενη μέγιστη ακτίνα συνδετικότητας.

Η αναδιοργάνωση των ομάδων και τα γεγονότα ανακαλύψεων κόμβων είναι πολύ σπάνια. Τα μόνα κοινά περιστατικά είναι αποτυχίες κόμβων και συνδέσεως.

### 3.5.8.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

- Η ιεραρχία που διαμορφώνεται από τον αλγόριθμο είναι αυστηρά ισορροπημένη. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ αριστερό υποδέντρου και του δεξιού υποδέντρου σε οποιοδήποτε επίπεδο είναι αυστηρά λιγότερο ή ίσο προς Δ.
- Η κατάσταση δρομολόγησης που διατηρείται από οποιοδήποτε αισθητήρα δρομολογητή είναι  $O(\log n)$ .
- Ο αλγόριθμος υπολογίζει αυξητικά ένα γράφημα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής που είναι 2- συνδεδεμένο.
- Το γράφημα μετάδοσης ανοικτής εκπομπής μπορεί να προσανατολιστεί ως κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφημα από οποιοδήποτε κόμβο κατά τρόπο μοναδικό. Η ιδιοκτησία μοναδικότητας εγγυάται από την παρουσία μιας ιεραρχίας.
- Η ιδιότητα ότι κάθε εξειδικευμένος αισθητήρας συνδέεται με κάποιο αισθητήρα δρομολογητή επιτρέπει σε αυτούς τους αισθητήρες να είναι κινητοί.

#### Μειονεκτήματα

- Ο αλγόριθμος έχει μια αρχική φάση οργάνωσης και δεν έχει μια έννοια της κατόπιν παραγγελίας οργάνωσης. Η αρχική οργάνωση είναι καλή για τις εφαρμογές που απαιτούν το διευθυνσιοδότηση ή/και δρομολόγηση. Ισχύει πολύ στα σενάρια όπου η φάση συντήρησης δεν είναι πολύ δαπανηρή. Σε εξαιρετικά δυναμικά συστήματα, δεν είναι καλύτερο να υπάρξει καμία υπονοούμενη οργάνωση ή η κατόπιν παραγγελίας οργάνωση. Το [11] είναι ένα παράδειγμα μιας εργασίας που δεν έχει καμία υπονοούμενη οργάνωση. Το [5] ανήκει στην κατηγορία κατόπιν παραγγελίας οργάνωσης.

- Η διαμόρφωση μιας ιεραρχίας σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλοί κόμβοι περικοπών στο δίκτυο δεν θα ήταν μια καλή ιδέα. Αυτό θα αύξανε την πιθανότητα της εφαρμογής της φάσης αναδιοργάνωσης.
- Ο αλγόριθμος δεν συζητά το πρωτόκολλο που απαιτείται για τη διαβίβαση των στοιχείων από έναν κόμβο σε έναν άλλο κόμβο. Συγκεκριμένα, δεν αντιμετωπίζει το ζήτημα όταν πρέπει ένας κόμβος να διαβιβάσει πληροφορίες σε έναν άλλο κόμβο.

### 3.5.9 Αλγόριθμος SHPER

Το μοντέλο του πρωτοκόλλου SHPER[43] (Scaling Hierarchical Power Efficient Routing) υποθέτει τη συνύπαρξη ενός σταθμού βάσης και ενός συνόλου ομοιογενών κόμβων αισθητήρων που διανέμονται τυχαία μέσα σε μια οριοθετημένη περιοχή ενδιαφέροντος. Ο σταθμός βάσης βρίσκεται σε μια απόμακρη θέση μακριά από το πεδίο των αισθητήρων. Και ο σταθμός βάσης και το σύνολο των κόμβων αισθητήρων υποτίθεται ότι είναι ακίνητοι (στάσιμοι). Περαιτέρω υποτίθεται ότι ο σταθμός βάσης είναι σε θέση να διαβιβάσει με την αρκετά υψηλή ενέργεια σε όλους τους κόμβους, λόγω της απεριόριστης παροχής ηλεκτρικού ρεύματός του. Εντούτοις, οι κόμβοι του δικτύου υποτίθεται ότι είναι ενεργειακά περιοριζόμενοι. Όλοι οι κόμβοι δικτύου ομαδοποιούνται δυναμικά σε συστάδες. Ένας από τους κόμβους μέσα σε κάθε συστάδα εκλέγεται για να είναι ο επικεφαλής κόμβος της συστάδας. Οι επικεφαλής των συστάδων που βρίσκονται αρκετά κοντά στο σταθμό βάσης είναι ικανοί για άμεση μετάδοση στο σταθμό βάσης με λογικές ενεργειακές δαπάνες. Αυτοί οι επικεφαλής κόμβοι υποτίθεται ότι είναι «ανωτέρου επιπέδου» επικεφαλής κόμβοι. Με παρόμοιο τρόπο, οι επικεφαλής κόμβοι που βρίσκονται μακριά από το σταθμό βάσης, θεωρούνται «κατωτέρου επιπέδου» επικεφαλής κόμβοι. Το σχήμα αυτό απεικονίζεται στην εικόνα 56 του [43]. Η υιοθέτηση ενός τέτοιου σχεδίου εξασφαλίζει την εξελιξιμότητα του δικτύου δηλ., η δυνατότητα των διαδικασιών δρομολόγησης να διατηρήσει την απόδοσή του απρόσβλητη από την αύξηση του μεγέθους του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται επειδή ακόμη και οι κόμβοι που βρίσκονται στις πιο απόμακρες θέσεις του τομέα δικτύων είναι σε θέση να καθοδηγήσουν τα μηνύματά τους στο σταθμό βάσης με τη δρομολόγηση multi hop μέσω άλλων γειτονικών κόμβων του χαμηλότερου επιπέδου και των κόμβων του ανώτερου επιπέδου.

Επιπλέον, αντίθετα προς άλλα ιεραρχικά πρωτόκολλα, το πρωτόκολλο SHPER διευκρινίζει ότι η εκλογή των επικεφαλής συστάδων δεν είναι τυχαία. Ακριβέστερα, ο κόμβος που εκλέγεται για να είναι επικεφαλής συστάδας μέσα σε κάθε συστάδα είναι αυτός που έχει τη μέγιστη υπολειπόμενη ενέργεια. Επιπλέον, η προτεινόμενη πολιτική επιλογής διαδρομών λαμβάνει υπόψη και την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων και την κατανάλωση ενέργειας για όλες τις πιθανές πορείες.

#### 3.5.9.1 Περιγραφή λειτουργίας πρωτοκόλλου

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου SHPER, που εξηγείται αναλυτικά στο υπόλοιπο αυτού του τμήματος, αποτελείται από δύο φάσεις, οι οποίες είναι συγκεκριμένα: η φάση έναρξης και η φάση σταθερής κατάστασης.

Στον πρώτο κύκλο της φάσης έναρξης, όλοι οι κόμβοι πρέπει να κρατήσουν τους δέκτες τους επάνω (*βήμα 1*). Αυτό είναι απαραίτητο επειδή ο σταθμός βάσης δημιουργεί ένα πρόγραμμα TDMA και ζητά από τους κόμβους να διαφημιστούν (*βήμα 2*). Το μέγεθος αυτού του προγραμματισμού είναι ίσο με τον αριθμό των υπαρχόντων κόμβων του δικτύου. Στην πραγματικότητα, είναι η μοναδική πληροφορία που ο σταθμός βάσης πρέπει να έχει για τον τομέα δικτύου.

Όταν το πρόγραμμα TDMA μεταδίδεται, όλοι οι κόμβοι, κατά τη διάρκεια των διατιθέμενων χρονοσχημάτων τους, διαβιβάζουν τα μηνύματα διαφημίσεών τους χρησιμοποιώντας την ίδια ενέργεια μετάδοσης. Κατά αυτόν τον τρόπο, κάθε φορά που διαφημίζεται ένας κόμβος, οι άλλοι κόμβοι που λαμβάνουν αυτό το μήνυμα διαφήμισης εκτιμούν την συγκριτική απόστασή τους από αυτόν τον κόμβο, σύμφωνα με τη δύναμη του σήματος διαφημίσεων που λαμβάνουν (*βήμα 3*).

Μόλις η διαδικασία διαφημίσεων κόμβων ολοκληρώνεται, ο σταθμός βάσης επιλέγει με έναν τυχαίο τρόπο μερικούς από τους κόμβους από τους οποίους έχει λάβει ένα μήνυμα

διαφημίσεων για να είναι οι υψηλού επιπέδου επικεφαλής συστάδων. Ομοίως, ο σταθμός βάσης εκλέγει μερικούς από τους κόμβους από τους οποίους δεν έχει λάβει οποιοδήποτε μήνυμα διαφημίσεων για να είναι τα χαμηλού επιπέδου κεφάλια συστάδων. Ο γενικός αριθμός κόμβων που ορίζονται για να είναι επικεφαλής συστάδων θεωρείται ότι έχει προκαθοριστεί (βήμα 4).

Μετά από αυτό, ο σταθμός βάσης μεταδίδει τις ταυτότητες (IDs) των πρόσφατα εκλεγμένων επικεφαλής συστάδων. Μεταδίδει επίσης τις τιμές των μαλακών και σκληρών κατώτατων ορίων (βήμα 5). Η χρήση αυτών των κατώτατων ορίων εξηγείται λεπτομερώς αργότερα.

Έπειτα, κάθε ένας μη επικεφαλής κόμβος επιλέγει για τον τρέχοντα κύκλο να συμμετέχει στη συστάδα του επικεφαλής του οποίου το μήνυμα διαφημίσεων είχε παραλήφθει πριν με τη μεγαλύτερη δύναμη σήματος (βήμα 6).

Δεδομένου ότι οι χαμηλότερου επιπέδου επικεφαλής κόμβοι συστάδων δεν μπορούν να διαβιβάσουν άμεσα στο σταθμό βάσης, είναι απαραίτητο για αυτούς να καθοδηγήσουν τα μηνύματά τους μέσω μιας πορείας που αποτελείται από έναν ανώτερο επικεφαλής κόμβο συστάδων επιπέδων και ενδεχομένως άλλους χαμηλότερου επιπέδου επικεφαλής συστάδων που βρίσκονται πιο κοντά στο ανώτερο επίπεδο του δικτύου. Κατά αυτόν τον τρόπο εντούτοις, υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές πορείες που μπορούν να ακολουθηθούν.

Σύμφωνα με το αλγόριθμο SHPER κάθε μονοπάτι  $p = (c_1, c_2, \dots, c_n)$  ανάμεσα σε έναν χαμηλότερου επιπέδου επικεφαλής κόμβο  $c_1$  και το σταθμό βάσης  $c_n$  εκτείνονται  $n - 2$  ενδιάμεσοι επικεφαλής κόμβοι  $c_2, \dots, c_{n-1}$ , που ορίζονται με μια αντίστοιχη τιμή του δείκτη δρομολόγησης Routing Index  $RI(p)$  που φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση (6):

$$RI(p) = \sum_{i=2}^{n-1} E_{r_i} - \sum_{i=1}^{n-1} E(c_i, c_{i+1}) \quad (8)$$

όπου  $E_{r_i}$  δείχνει την υπολειπόμενη ενέργεια του επικεφαλής κόμβου  $c_i$  και  $E(c_i, c_{i+1})$  δείχνει την ενέργεια που καταναλώνεται για ένα μήνυμα που καθοδηγείται μεταξύ δύο διαδοχικών επικεφαλής κόμβων  $c_i$  συστάδων και  $c_{i+1}$ .

Εάν το  $A$  είναι το σύνολο όλων των πιθανών πορειών  $p_i$  που μπορούν να ακολουθηθούν για τη μετάδοση των μηνυμάτων ενός χαμηλότερου επιπέδου επικεφαλής συστάδας στο σταθμό βάσης, κατόπιν η πορεία  $p_k$  που επιλέγεται είναι αυτή που ικανοποιεί την ιδιότητα που δίνεται στην εξίσωση (7):

$$p_k = \min \left\{ RI(p_l) : l \in A \right\} \quad (9)$$

Με τη χρησιμοποίηση των εξισώσεων (6) και (7) ο κάθε χαμηλότερου επιπέδου επικεφαλής συστάδας καθορίζει τη πιο ενεργειακά αποδοτική πορεία για να καθοδηγήσει τα μηνύματά του στο σταθμό βάσης και επιλέγει την ανωτέρου επιπέδου συστάδα για να ανήκει (βήμα 7).

Αφότου έχει αποφασίσει κάθε κόμβος σε ποια συστάδα ανήκει, ενημερώνει τον αντίστοιχο επικεφαλής συστάδας του ότι πρόκειται να είναι μέλος της συστάδας του. Κάθε κόμβος διαβιβάζει αυτές τις πληροφορίες πίσω στο αντίστοιχο κεφάλι συστάδων του χρησιμοποιώντας ένα CSMA MAC πρωτόκολλο (βήμα 8). Γι' αυτό, οι επικεφαλής κόμβοι συστάδων πρέπει να κρατήσουν τους δέκτες τους επάνω κατά τη διάρκεια αυτού του συγκεκριμένου βήματος.

Κάθε επικεφαλής συστάδας λαμβάνει κατά αυτόν τον τρόπο όλα τα μηνύματα από τους κόμβους που θέλουν να περιληφθούν στη συστάδα του και δημιουργεί, σύμφωνα με την ποσότητά τους, ένα πρόγραμμα TDMA των αντίστοιχων τιμών (βήμα 9).

Κατόπιν επικεφαλής συστάδας μεταδίδει αυτό το πρόγραμμα πίσω στους κόμβους της συστάδας του, προκειμένου να ενημερωθεί κάθε κόμβος πότε μπορεί να διαβιβάσει (βήμα 10).

Έπειτα, η μετάδοση στοιχείων μπορεί να αρχίσει. Κατά συνέπεια, κατά τη διάρκεια του διατιθέμενου χρόνου μετάδοσής του, κάθε κόμβος στέλνει στον επικεφαλής της συστάδας του τα ποσοτικά στοιχεία σχετικά με τα ανιχνεύσιμα γεγονότα. Με τέτοιο τρόπο παρόμοιο με αυτόν που προτείνεται στον TEEN τα σκληρά και μαλακά κατώτατα όρια χρησιμοποιούνται στο πρωτόκολλο SHPER επίσης. Κατά συνέπεια, τα στοιχεία διαβιβάζονται από έναν κόμβο στον

επικεφαλής της συστάδας του μέσα στην αντίστοιχη σχισμή χρόνου του μόνο όταν ανιχνεύεται η παρουσία ενός ανιχνεύσιμου γεγονότος. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν αυτός ο κόμβος μετρά μια αξία της ανιχνεύσιμης ιδιότητας που είναι ίση ή μεγαλύτερη από το σκληρό κατώτατο όριο ή όταν αυτή η αξία αλλάζει από ένα ποσό ίσο ή μεγαλύτερο από το μαλακό κατώτατο όριο. Μαζί με τα στοιχεία σχετικά με τις ανιχνεύσιμες ιδιότητες ο κόμβος διαβιβάζει την τρέχουσα αξία της υπολειπόμενης ενέργειάς του. Ο πομπός κάθε μη επικεφαλής κόμβου συστάδας μπορεί να είναι κλειστό έως ότου έρχεται ο διατιθέμενος χρόνος μετάδοσης του κόμβου, ελαχιστοποιώντας κατά συνέπεια την ενεργειακή κατανάλωση σε αυτούς τους κόμβους (βήμα 11).

Κάθε επικεφαλής συστάδας συλλέγει τα στοιχεία που διαβιβάζονται σε αυτόν από τους κόμβους της συστάδας του (βήμα 12). Όταν όλα τα στοιχεία παραληφθούν, κάθε επικεφαλής συστάδας εκτελεί τις λειτουργίες επεξεργασίας σήματος για να αθροίσει τα στοιχεία που έχει λάβει μαζί με τα στοιχεία του σε ένα ενιαίο σύνθετο μήνυμα. Αυτό το μήνυμα περιέχει την ταυτότητα του κόμβου που έχει την υψηλότερη υπολειπόμενη ενέργεια μεταξύ των κόμβων συστάδων, μαζί με την υπερβολικότερη (π.χ., μέγιστος) αξία της ανιχνευόμενης μεταβλητής και την ταυτότητα του κόμβου που την έχει ανιχνεύσει (βήμα 13).

Αφότου έχει δημιουργήσει κάθε επικεφαλής συστάδας το συνολικό μήνυμά του, περιμένει μέχρι τη σχισμή χρόνου του προκειμένου να διαβιβάσει αυτό το συνολικό μήνυμα στο σταθμό βάσης είτε άμεσα, εάν αυτό είναι δυνατό, ή μέσω των ενδιάμεσων ανωτέρων επιπέδων επικεφαλής συστάδας σύμφωνα με την πορεία που προτείνεται με την χρήση των εξισώσεων (1) και (2) (βήμα 14).

Έπειτα, ο σταθμός βάσης συλλέγει όλα τα μηνύματα που διαβιβάζονται σε αυτόν (βήμα 15).

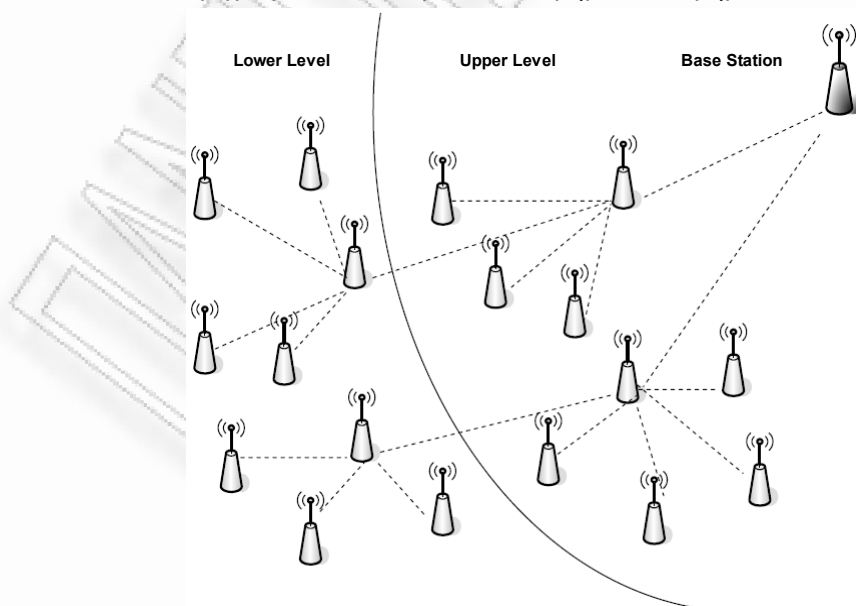
Αφότου ολοκληρώνεται αυτό το βήμα, η φάση έναρξης τελειώνει και η φάση σταθερής κατάστασης αρχίζει.

Ως εκ τούτου, ο σταθμός βάσης καθορίζει τους νέους επικεφαλής συστάδων με τη χρησιμοποίηση των στοιχείων των λαμβανόμενων μηνυμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο κόμβος που έχει την υψηλότερη υπολειπόμενη ενέργεια σε κάθε συστάδα εκλέγεται για να είναι ο νέος επικεφαλής κόμβος της συστάδας. Επιπλέον, καθορίζονται οι νέες τιμές των μαλακών και σκληρών κατώτατων ορίων (βήμα 16).

Μετά από αυτό, όλοι οι κόμβοι ανοίγουν τους δέκτες τους (βήμα 17).

Τέλος, ο σταθμός βάσης μεταδίδει τα ids των νέων επικεφαλής συστάδων μαζί με τις τιμές των κατώτατων ορίων (βήμα 18).

Στη συνέχεια, κάθε ένας μη επικεφαλής κόμβος επιλέγει τη συστάδα που σκοπεύει να ανήκει. Η φάση κατάστασης συνεχίζει περαιτέρω ως συνεχώς επαναλαμβανόμενη εκτέλεση των διαδικασιών που περιγράφονται ανωτέρω από το βήμα 6 στο βήμα 18.

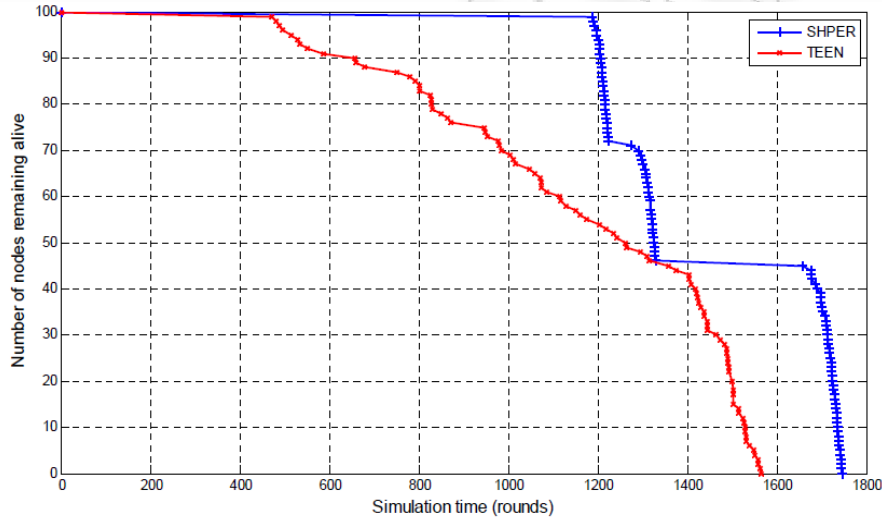


Εικόνα 56: Γραφική απεικόνιση πρωτοκόλλου SHPER [43]

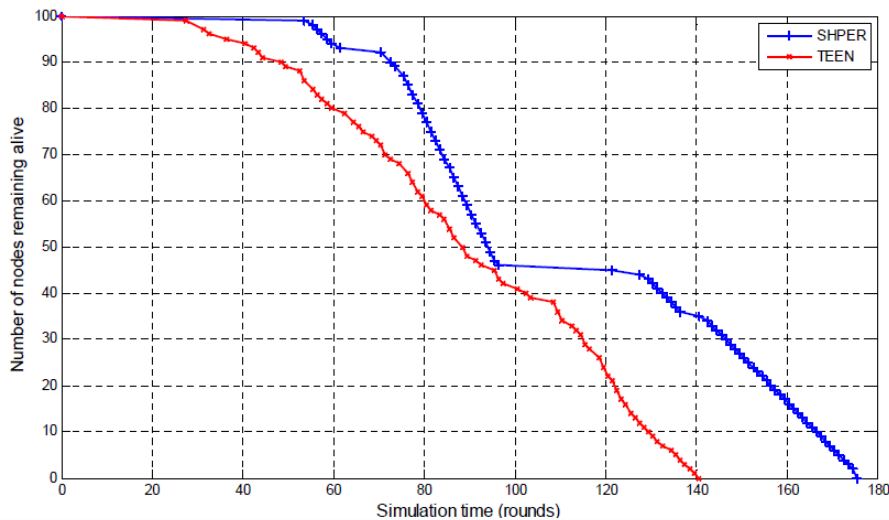
### 3.5.9.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

Στο [43], παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από 360 δοκιμές προσομοίωσης. Σε αυτές τις δοκιμές η απόδοση του πρωτοκόλλου SHPER ερευνήθηκε σε σχέση με την απόδοση του πρωτοκόλλου TEEN, σε διαφορετικές τοπολογίες δικτύου και σε διάφορες τιμές της αρχικής ενέργειας των κόμβων και σε διάφορες θέσεις του σταθμού βάσης. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός κόμβων που παραμένουν σε λειτουργία με την πάροδο του χρόνου προσομοιώθηκε και για τα δύο πρωτόκολλα για τις περιπτώσεις ότι η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του τομέα του δικτύου είναι είτε 100μ., είτε 200μ. είτε 300μ.

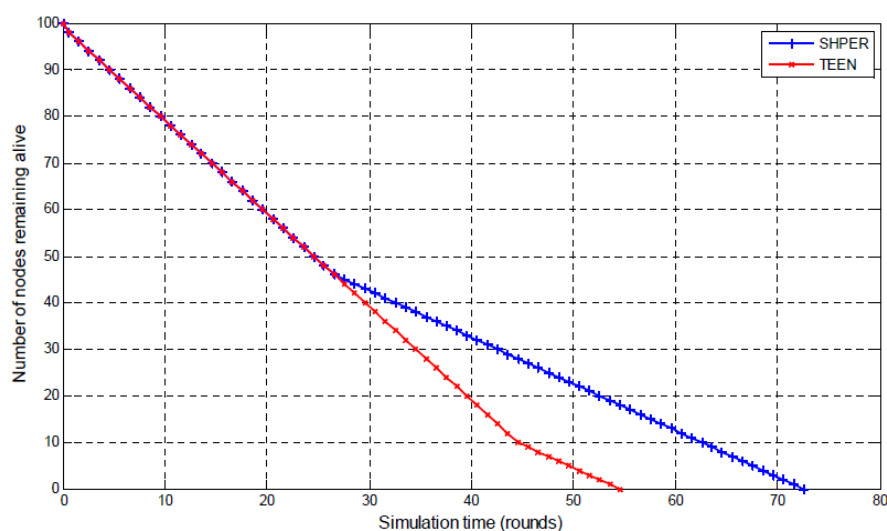
Επιπλέον, τα μέσα ποσοστά της αύξησης του χρόνου απενεργοποίησης του πρώτου κόμβου, της αύξησης του χρόνου απενεργοποίησης του τελευταίου κόμβου και της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας που έγινε με τη χρήση του SHPER αντί του TEEN, υπολογίστηκε με τη χρησιμοποίηση του Central Limit Theorem, με διαστήματα εμπιστοσύνης 95%. Στις σχετικές εικόνες, οι ανώτερες, χαμηλότερες και κεντρικές γραμμές δείχνουν τον ανώτερο συνδεδεμένο, χαμηλότερη συνδεδεμένη και το κέντρο των διαστημάτων εμπιστοσύνης αντίστοιχα. Στο πρώτο μισό των δοκιμών προσομοίωσης, όλοι οι κόμβοι θεωρήθηκαν ότι έχουν την αρχική τους ενέργεια  $E_i(0)$  στο 0.5 J. Τα σχετικά αποτελέσματα προσομοίωσης σχετικά με τον αριθμό κόμβων που παραμένουν ενεργοί με την πάροδο του χρόνου επιδεικνύονται γραφικά στις εικόνες 53-55.



Εικόνα 57: Συγκριτική δοκιμή των κόμβων που παραμένουν ενεργοί στο SHPER και TEEN [ $E_i(0)=0.5$  J,  $D=100m$ ] [43]



Εικόνα 58: Συγκριτική δοκιμή των κόμβων που παραμένουν ενεργοί στο SHPER και TEEN [ $E_i(0)=0.5$  J,  $D=200m$ ] [43]



**Εικόνα 59: Συγκριτική δοκιμή των κόμβων που παραμένουν ενεργοί στο SHPER και TEEN [Eri(0)= 0.5 J, D=300m ] [43]**

Η μείωση των κόμβων με την πάροδο του χρόνου είναι ένα χαρακτηριστικό μέτρο της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Οι δοκιμές προσομοίωσης δείχνουν ότι το πρωτόκολλο SHPER είναι ιδιαίτερα καλύτερο από το πρωτόκολλο TEEN στην καθυστέρηση του χρόνου της μείωσης κόμβων, άσχετα με την απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και των κόμβων.

Ακριβέστερα, το σύνολο των κόμβων παραμένουν ενεργοί, για μια περίοδο που είναι αρκετά μεγαλύτερη στο SHPER απ' ό τι στο TEEN όταν ο σταθμός βάσης βρίσκεται σχετικά κοντά στον τομέα WSN. Μετά από αυτήν την αρχική περίοδο, κατά τη διάρκεια της οποίας το ενεργειακό φορτίο μοιράζεται μεταξύ των όλων κόμβων, οι φθαρμένοι κόμβοι αρχίζουν να μειώνονται έως ότου επιτυγχάνεται ένα νέο επίπεδο αντίστασης δηλ., η δρομολόγηση εκτελείται από άλλα σύνολα κόμβων που ανήκουν σε άλλα επίπεδα της ιεραρχίας του δικτύου. Αυτό συνεχίζει έως ότου μειωθούν όλοι οι κόμβοι. Εντούτοις, η γενική διάρκεια ζωής του δικτύου παρατείνεται όταν συγκρίνεται με τον TEEN. Καθώς η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του τομέα δικτύου αυξάνεται, οι κόμβοι εξαντλούνται γρηγορότερα αλλά λόγω της περισσότερης ενεργειακής αποδοτικής δρομολόγησης του SHPER η διατήρηση της ενέργειας γίνεται εμφανέστερη.

Μια αναλυτικότερη περιγραφή των αποτελεσμάτων της χρήσης των δύο πρωτοκόλλων σε σύγκριση μπορεί να παραχθεί με την εστίαση στο χρόνο μείωσης του πρώτου κόμβου, τον χρόνο μείωσης του τελευταίου κόμβου και τη μέση κατανάλωση ενέργειας. Ο πίνακας 3 συνοψίζει αριθμητικά τα αποτελέσματα προσομοίωσης σχετικά με αυτές τις τρεις μετρικές στην περίπτωση της ομοιόμορφης ενεργειακής διανομής.

Απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και WSN πεδίου (m)	Χρόνος που ο πρώτος κόμβος πεθαίνει (%)	Χρόνος που ο τελευταίος κόμβος πεθαίνει (%)	Μέση κατανάλωση ενέργειας (%)
100	+148,09	+9,90	-8,89
200	+126,73	+20,53	-16,69
300	0	+33,09	-24,60

**Πίνακας 3: Ποσοστιαία μεταβολή της απόδοσης του WSN με τη χρήση του SHPER σε σύγκριση με το TEEN σε σχέση με την απόσταση του σταθμού βάσης από το πεδίο όταν η αρχική ενέργεια των κόμβων είναι 0,5J.**

Πολλά ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης WSN είναι βασισμένα στην υπόθεση μιας ίσης ενεργειακής διατήρησης για όλους τους κόμβους. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη ότι η μη ομοιόμορφη ενεργειακή κατανομή είναι η κανονική περίπτωση στις πραγματικές εφαρμογές, αυτή η βασική υπόθεση είναι προφανώς μη πρακτική. Ο πίνακας 4 καθιστά σαφές ότι η αύξηση σχετικά με όλη τη μετρική ενεργειακή απόδοση που παρέχεται από το πρωτόκολλο SHPER γίνεται ακόμα μεγαλύτερη στην περίπτωση της μη ομοιόμορφης ενεργειακής κατανομής των κόμβων. Κατά συνέπεια, όσο ανομοιόμορφα κατανεμημένη είναι η ενεργειακή κατανομή σε ένα WSN τόσο ευεργετικότερη γίνεται η χρήση του SHPER. Πραγματικά, αυτό είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα του SHPER δεδομένου ότι ο αλγόριθμός του είναι ρεαλιστικότερος και αποτελεσματικός. Αυτό ενισχύει την πεποίθηση ότι ο SHPER είναι πράγματι σε θέση να εφαρμοστεί στο πραγματικό περιβάλλον δοκιμών στο μέλλον.

Επομένως, ο SHPER επιτυγχάνει και την αξιοπρόσεκτη διατήρηση ενέργειας και την αυξανόμενη εξελιξιμότητα μέσω ενεργειακά αποδοτικής multipath δρομολόγησης. Κατά συνέπεια, πετυχαίνει τον κύριο στόχο, στον οποίο η πλειοψηφία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης στοχεύει στα WSNs, ο οποίος είναι η μείωση της κατανάλωσης ισχύος.

Πραγματικά, υπάρχουν μερικά σχήματα τα οποία εξετάζουν και την ενεργειακή αποδοτικότητα και ή την ασφάλεια ή την ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS). Στην αρχική ανάπτυξη του πρωτοκόλλου SHPER, καμία άλλη απόδοση δικτύου μετρική εκτός από τη ενεργειακή αποδοτικότητα δεν έχει ληφθεί υπόψη. Εντούτοις, αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί. Ο Kandris και λοιποί [43], έχει προτείνει ένα υβριδικό σχέδιο για τη ενέργεια και την αντιληπτή ενήμερη δρομολόγηση QoS περιεχομένου πολυμέσων πάνω από ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πολυμέσων. Αυτό το πρωτόκολλο περιλαμβάνει τα πλεονεκτήματα και της ενεργειακής αποδοτικής δρομολόγησης και του προγραμματισμού πακέτου video συντελώντας έτσι στην αυξανόμενη αποδοτικότητα από την άποψη της κατανάλωσης ισχύος μαζί με τη λαμβανόμενη τηλεοπτική διαστρέβλωση.

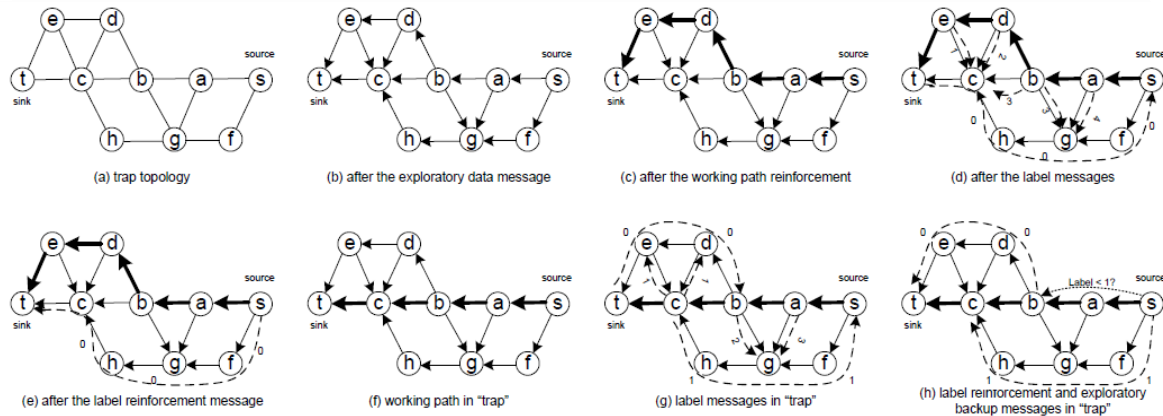
### **3.6 Πρωτόκολλα πολλαπλών διαδρομών (Multipath protocols)**

#### **3.6.1 Πολλαπλή δρομολόγηση βασισμένη σε ετικέτα – LMR**

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων και δουλεύουν σε μικρό εύρος δεδομένων. Επομένως, η ανάθεση μοναδικών ενιαίων IDs μπορεί να είναι εξαιρετικά δαπανηρό σε όρους εύρους ζώνης και κατανάλωσης ενέργειας. Το πρωτόκολλο LMR [27] είναι σχεδιασμένο να χρησιμοποιεί μόνο την τοπική πληροφορία για να βρει τις διαδρομές που έχουν χαλάσει ή τα κενά προκειμένου να προστατεύσει τη διαδρομή που δουλεύει. Με μία πλημμύρα το LMR μπορεί να βρει τα αποσυνδεδεμένα μονοπάτια ή τμήματα για να προστατεύσει την διαδρομή που δουλεύει. Τα πλημμυρισμένα overhead μειώνονται από τα σχετικά σχέδια που χρησιμοποιούνται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που βρίσκονται πίσω από αυτά, π.χ., τις πληροφορίες θέσης ή τα εναποθηκευμένα στοιχεία στο Directed Diffusion [44]. Το LMR μπορεί να λειτουργήσει με τα διαφορετικά δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, πχ, το SPIN και το Directed Diffusion [44]. Για σαφήνεια, το παρουσιάζουμε με το Directed Diffusion και υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει καμία κινητικότητα.

Η πολλαπλών διαδρομών δρομολόγηση έχει μελετηθεί ευρέως στα ενσύρματα δίκτυα [45], και μια από τις δυσκολίες, που προκύπτει επίσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, είναι η τοπολογία παγίδων [46]. Σε μια τοπολογία παγίδων, η λειτουργούσα πορεία μπορεί να εμποδίσει όλο τις πιθανές αποσυνδεδεμένες πορείες. Παραδείγματος χάριν, η λειτουργούσα πορεία s-α-β-γ-τ στην εικόνα 60a δεν έχει αποσυνδεδεμένη εφεδρική πορεία, αν και δύο αποσυνδεδεμένες πορείες υπάρχουν μεταξύ του s και του τ. Υπάρχουν δύο λύσεις. Η μία είναι να καθοδηγηθεί η εργασία και οι πορείες επιστροφής ταυτόχρονα. Αυτό είναι πολύ δύσκολο σε ένα δίκτυο χωρίς ενιαία ταυτότητα. Η δεύτερη είναι να επιλέξει τα πολλαπλά μερικώς αποσυνδεδεμένα τμήματα πορειών για να προστατεύσει τη λειτουργούσα πορεία και αυτή είναι η λύση που χρησιμοποιούμε στο LMR.





Εικόνα 60: Απεικόνιση των διαφορετικών οπτικών του LMR [27]

### 3.6.1.1 Ετικέτες (Label)

Στο Directed Diffusion [44], ο κόμβος προορισμού μεταδίδει τις ιδιότητες για τα στοιχεία, καλώντας έναν ενδιαφερόμενο. Οι ενδιαμέσοι κόμβοι δημιουργούν μια κλίση που κατευθύνεται στον κόμβο από τον οποίο το ενδιαφέρον παραλαμβάνεται. Αφότου λαμβάνει η πηγή το ενδιαφέρον, στέλνει ένα διερευνητικό μήνυμα στοιχείων σε κάθε γείτονα για τον οποίο έχει μια κλίση σε ένα χαμηλό ποσοστό στοιχείων όπως φαίνεται στην εικόνα 60b. Καθώς ο κόμβος προορισμού αρχίζει να λαμβάνει τα διερευνητικά στοιχεία, ενισχύει έναν ιδιαίτερο γείτονα με την αποστολή ενός θετικού μηνύματος ενίσχυσης προκειμένου «να τραβηχτούν» τα στοιχεία σε ένα υψηλότερο ποσοστό στοιχείων όπως φαίνεται στην εικόνα 60c. Ομοίως, ένα αρνητικό μήνυμα ενίσχυσης χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει μια σύνδεση από μια πορεία. Οι πολλαπλάσιες πορείες μπορούν να ενισχυθούν. Αλλά αυτό είναι διαφορετικό από την πολλαπλών διαδρομών δρομολόγηση εμείς μελετά. Αρχικά, δεν υπάρχει κανένας τρόπος που μπορούμε να εγγυηθούμε ότι για κάθε αποτυχία κόμβων έχουμε μια εναλλάσσομαι πορεία για να τον προστατεύσουμε. Αφετέρου, απαιτώντας κάθε κόμβο λάβετε τα στοιχεία από δύο ή περισσότεροι προς τα πάνω κόμβοι μπορούν να οδηγήσουν στα απαγορευτικά υψηλά συνολικά γενικά έξοδα.

Στο LMR, αφότου ενισχύουν οι κόμβοι στη λειτουργούσα πορεία μια από τις συνδέσεις τους ως σύνδεση για να διαμορφώσουν μια λειτουργούσα πορεία, μεταδίδουν broadcast ένα μήνυμα ετικετών στους υπόλοιπους γείτονές τους. Και τα μηνύματα ενίσχυσης και τα μηνύματα ετικέτας παίρνουν έναν ακέραιο αριθμό, που καλείται “ετικέτα”. Η αξία της ετικέτας αυξάνεται κατά 1 από κάθε λειτουργούντα κόμβο που μεταδίδει broadcast έπειτα ένα νέο μήνυμα ετικέτας. Κάθε λειτουργών κόμβος πρέπει να θυμηθεί αυτήν την τιμή ως ετικέτα κόμβου του. Τα μηνύματα ετικετών διαβιβάζονται προς την πηγή κατά μήκος όλων των πορειών μέσω των οποίων περνούν τα διερευνητικά μηνύματα δεδομένων. Ένας κόμβος που λαμβάνει δύο ή περισσότερα μηνύματα ετικετών θα διαβιβάσει αυτό με τη μικρότερη αξία ετικέτας μόνο. Η ιδέα είναι να κατασταθεί το μήνυμα ετικέτας από τον κόμβο πιο κοντά στον κόμβο προορισμού να πάει όσο το δυνατόν περισσότερο μακριά έτσι ώστε οι χωριστές πορείες να είναι δυνατόν να βρεθούν. Οι λειτουργώντα κόμβοι δεν διαβιβάζουν τα μηνύματα ετικέτας από οποιουσδήποτε άλλους κόμβους. Κάθε κόμβος πρέπει να θυμηθεί όλες τις ετικέτες που έχει δει και τους σχετικούς γείτονες που προέρχονται. Εάν ένας κόμβος λαμβάνει πολλαπλά μηνύματα ετικετών με την ίδια τιμή ετικέτας από διαφορετικούς γείτονες, μόνο ο πρώτος καταγράφεται για να βρει μια κοντύτερη εφεδρική πορεία. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται στην εικόνα 60d.

### 3.6.1.2 Αλγόριθμος Backoff

Για να αποφύγουν την υπερβολική πλημμύρα μηνυμάτων ετικέτας, οι κόμβοι πρέπει να διαβιβάσουν το μικρότερο μήνυμα ετικέτας μόνο. Επομένως, ένας αλγόριθμος backoff είναι απαραίτητος για να αυξήσει την πιθανότητα ότι οι κόμβοι λαμβάνουν το μικρότερο μήνυμα ετικέτας προτού να αρχίσουν να προωθούν. Ένα νέο μήνυμα ετικέτας πρέπει να καθυστερήσει αρκετό καιρό έτσι ώστε ένα μήνυμα ετικέτας με μια μικρότερη ετικέτα να μπορεί να υπερβεί αυτόν τον λειτουργούντα κόμβο. Τότε το μικρότερο μήνυμα ετικέτας θα φθάσει σε κάθε κόμβο

πριν από το μεγαλύτερο εάν υπάρχουν πορείες. Εντούτοις, εάν η καθυστέρηση δεν είναι αρκετά μεγάλη, το μεγαλύτερο μήνυμα ετικέτας μπορεί να φθάσει στον κόμβο πρώτα ακόμη και με την καθυστέρηση. Εάν η καθυστέρηση είναι αρκετά μεγάλη για ένα μήνυμα για να καλύψει το ολόκληρο δίκτυο, μπορούμε να εγγυηθούμε ότι όλοι οι κόμβοι λαμβάνουν τη μικρότερη ετικέτα πρώτα, αλλά η καθυστέρηση οργάνωσης των εφεδρικών πορειών μπορεί να είναι μακροχρόνια. Έτσι μια ανταλλαγή είναι απαραίτητη.

Στο LMR, εάν χρησιμοποιείται η καθυστέρηση  $t_d$ , ο λειτουργών κόμβος με ετικέτα  $w_i$  πρέπει να μεταδώσει ραδιοφωνικά ένα νέο μήνυμα ετικέτας μετά από μια καθυστέρηση backoff που παρουσιάζεται ως εξής,

$$T_i = w_i \times t_d \quad (10)$$

όπου  $i=0,1,\dots$ , είναι ο λειτουργών κόμβος ο οποίος έχει ένα νέο μήνυμα ετικέτας να στείλει και 0 είναι ο κόμβος προορισμού. Ένας άλλος τρόπος για να δημιουργηθεί ένα νέο μήνυμα είναι να κάνεις κάθε λειτουργών κόμβο να αυξήσει την ετικέτα κατά 1 ανεξάρτητα εάν είναι απαραίτητο ή όχι να μεταδώσει ένα νέο μήνυμα ετικέτας. Με αυτόν τον τρόπο η ετικέτα κόμβου  $w_i=i$  και

$$T_i = i \times t_d \quad (11)$$

### 3.6.1.3 Ενίσχυση ετικετών

Αφότου λαμβάνει η πηγή ένα μήνυμα ετικέτας, μπορεί αμέσως να αρχίσει τη διαδικασία ενίσχυσης ετικετών, δεδομένου ότι ο αλγόριθμος backoff επιτυγχάνει να φθάσει πρώτα το μικρότερο μήνυμα ετικέτας. Μια μικρότερη ετικέτα σημαίνει ότι έχουμε ένα χωρισμένο τμήμα πορειών σε έναν λειτουργών κόμβο κοντά στον κόμβο προορισμού. Εάν μια ετικέτα 0 παραλαμβάνεται, αυτή σημαίνει ότι βρίσκουμε μια χωριστή εφεδρική πορεία. Η πηγή στέλνει έπειτα ένα μήνυμα ενίσχυσης ετικετών στον κόμβο που δημιούργησε την ετικέτα. Η ενίσχυση συνεχίζεται με εκείνο τον κόμβο ελέγχοντας τη μνήμη για να δει από ποιον κόμβο προήλθε αυτή η ετικέτα και ενισχύει έπειτα εκείνον τον κόμβο. Η διαδικασία είναι μια διαδικασία ενίσχυσης της κατευθυνόμενης διάχυσης έως ότου βρίσκεται ο κόμβος προορισμού, με αποτέλεσμα δύο χωριστές πορείες (εικόνα 60e). Εάν η ετικέτα που λαμβάνεται από την πηγή δεν είναι 0, αυτό σημαίνει ότι μπορεί να έχει πέσει σε «παγίδα» όπως φαίνεται στην εικόνα 60f. Τα μηνύματα ετικετών σε αυτή την περίπτωση φαίνονται στην εικόνα 60g. Πέραν από την ενίσχυση ενός τμήματος πορείας η πηγή πρέπει να στείλει ένα επιπλέον μήνυμα κατά μήκος της λειτουργούσας πορείας που ονομάζεται εφεδρικό διερευνητικό μήνυμα. Αυτό το μήνυμα παίρνει την ετικέτα της λαμβανόμενης πηγής. Οποιοσδήποτε λειτουργών κόμβος που λαμβάνει αυτό το μήνυμα, του οποίου η ετικέτα κόμβου είναι μεγαλύτερη από αυτήν την ετικέτα είτε αρχίζει ένα νέο εφεδρικό τμήμα πορειών ή το διαβιβάζει. Το νέο εφεδρικό τμήμα πορειών πρέπει να έχει μια ετικέτα μικρότερη από αυτό της λαμβανόμενης πηγής έτσι ώστε περισσότεροι λειτουργών κόμβοι μπορούν να προστατευθούν. Εάν η ετικέτα αυτού του νέου τμήματος δεν είναι 0, ένα νέο εφεδρικό διερευνητικό μήνυμα αρχίζει με τη νέα ετικέτα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου είτε ενισχύεται ένα εφεδρικό τμήμα με ετικέτα 0, ή κανένα νέο τμήμα με μικρότερες ετικέτες δεν μπορεί να βρεθεί. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στην εικόνα 60h.

Αφού η εφεδρική πορεία έχει δημιουργηθεί, το LMR μπορεί να επαναληφθεί για να βρεθεί μια τρίτη πορεία. Το LMR μπορεί κατ' επανάληψη να βρει τις  $n$  πορείες, συμπεριφέροντας στις πρώτες  $n-1$  πορείες ως λειτουργούσες πορείες.

### 3.6.2 Ιεραρχική πολλαπλή δρομολόγηση – HMRP

Το HMRP (Hierarchy-Based Multipath Routing Protocol) [47] έχει πολλές πορείες (διαδοχικά επιλεγμένες σε κάθε μετάδοση) για να διαδώσει τα πακέτα δεδομένων στον κόμβο προορισμού. Ο μηχανισμός συνάθροισης δεδομένων εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο εκτός από τους κόμβους φύλλα μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας στα δίκτυα. Το προτεινόμενο σύστημα σχεδιάστηκε σύμφωνα με τους ακόλουθους στόχους:

#### Εξελιξιμότητα

Η περιοχή ανίχνευσης μπορεί να περιλάβει εκατοντάδες, χιλιάδες ή ακόμα και περισσότερους, κόμβους αισθητήρων. Το HMRP θα μπορούσε να είναι κατάλληλο για μια μικρή

ή μεγάλη περιοχή ανίχνευσης, δεδομένου ότι τα επιπλέον έξοδα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων αισθητήρων είναι πολύ χαμηλά.

#### Απλότητα

Οι αισθητήρες έχουν περιορισμένη ικανότητα υπολογισμού και περιορισμένους πόρους μνήμης. Επομένως, αυτή η προσέγγιση προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό διαδικασιών που εκτελούνται, και τις καταστάσεις που διατηρούνται σε κάθε κόμβο. Συγκεκριμένα, κάθε αισθητήρας πρέπει μόνο να διατηρήσει τον πίνακα πληροφοριών των υποψηφίων γονέων του για να καθορίσει την πορεία δρομολόγησης.

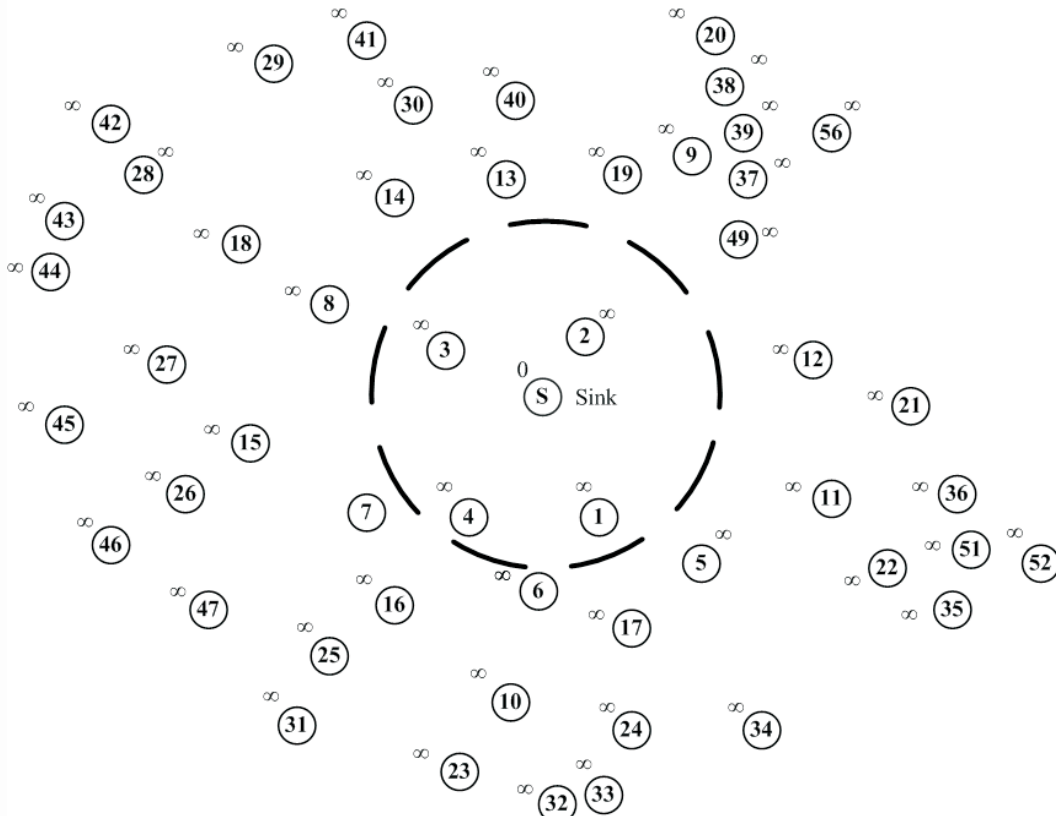
#### Διάρκεια ζωής συστήματος

Αυτά τα δίκτυα πρέπει να λειτουργήσουν για όσο το δυνατό περισσότερο, επειδή η επαναφόρτιση της μπαταρίας των κόμβων μπορεί να είναι δύσκολη ή αδύνατη. Επομένως, η συνάθροιση στοιχείων και η ισορροπημένη ενεργειακά δρομολόγηση υιοθετούνται για να μειώσουν τον αριθμό μηνυμάτων στο δίκτυο και να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής του.

Στο HMRP, το δίκτυο αισθητήρων κατασκευάζεται ως ένα δίκτυο με επίπεδα καταρχάς. Με βάση το επίπεδο, κάθε κόμβος θα βρει τους υποψηφίους γονείς του για να διαβιβάσει τα ανιχνεύσιμα δεδομένα στον κόμβο προορισμού. Με τη χρησιμοποίηση αυτών των υποψηφίων γονέων, ο κόμβος μπορεί να στείλει τα δεδομένα μέσω διαφορετικής πορείας κάθε φορά. Με άλλα λόγια, οι υποψήφιοι γονείς θα αναλάβουν εκ περιτροπής να είναι ο κόμβος δρομολόγησης του αισθητήριου κόμβου. Το σχέδιο αυτό μπορεί να διασκορπίσει την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο αποδοτικότερα και να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

### **3.6.2.1 Περιβάλλον δικτύου και υποθέσεις**

Η εικόνα 61 παρουσιάζει ένα παράδειγμα του περιβάλλοντος του συστήματος. Οι κόμβοι αισθητήρων διανέμονται τυχαία στον τομέα ανίχνευσης. Εξετάζεται ένα δίκτυο που αποτελείται από έναν μικρό αριθμό κόμβων προορισμού και πολλούς ασύρματους αισθητήριους κόμβους σε μια περιοχή ενδιαφέροντος. Οι κόμβοι αισθητήρων υποτίθεται ότι καθορίστηκαν για τη διάρκεια ζωής τους, και η ταυτότητα (προσδιοριστικό) των κόμβων καθορίζεται a priori. Επιπλέον, αυτοί οι κόμβοι αισθητήρων έχουν περιορισμένη δύναμη επεξεργασίας, και αποθήκευσης, ενώ οι κόμβοι προορισμού έχουν ισχυρούς πόρους για να εκτελέσουν οποιαδήποτε εργασία ή να επικοινωνήσουν με τους κόμβους αισθητήρων. Μόλις αναπτυχθούν οι κόμβοι, παραμένουν στις θέσεις τους για την ανίχνευση των στόχων. Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να λάβουν μηνύματα από άλλους κόμβους. Ο κόμβος προορισμού αρχίζει με την τιμή βήματος «0», ενώ άλλοι κόμβοι αισθητήρων είναι «∞». Το HMRP είναι ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο δρομολόγησης που μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να παρατείνει τη διάρκεια ζωής στα δίκτυα αισθητήρων.



Εικόνα 61: Παράδειγμα του περιβάλλοντος του δικτύου αισθητήρων [47]

Το HMRP δημιουργεί μια πλήρη διαδρομή από τον κόμβο πηγής στον κόμβο προορισμού γρήγορα, και προετοιμάζει την πορεία πολλών διαδρομών για να ισορροπήσει την ενέργεια κάθε κόμβου. Το HMRP επιτρέπει στους ενδιαμέσους κόμβους να συναθροίσουν όλα τα λαμβανόμενα πακέτα κατά τη διάρκεια μιας σύντομης χρονικής περιόδου και διαβιβάζει μόνο ένα συναθροισμένο πακέτο στον επόμενο κόμβο.

Το HMRP είναι βασισμένο στην ιεραρχική αρχιτεκτονική δέντρων, στην οποία οι κόμβοι νεροχύτες χρησιμεύουν ως κόμβοι ρίζα. Κάθε κόμβος αισθητήρων πρέπει να είναι μέλος της αρχιτεκτονικής, δηλ., ένας εσωτερικός ή κόμβος φύλλο, για να επικοινωνήσει με τον κόμβο προορισμού. Το HMRP έχει δύο φάσεις, φάση κατασκευής στρώματος (Layer Construction Phase – LCP) και φάση διάδοσης στοιχείων (Data Dissemination Phase – DDP).

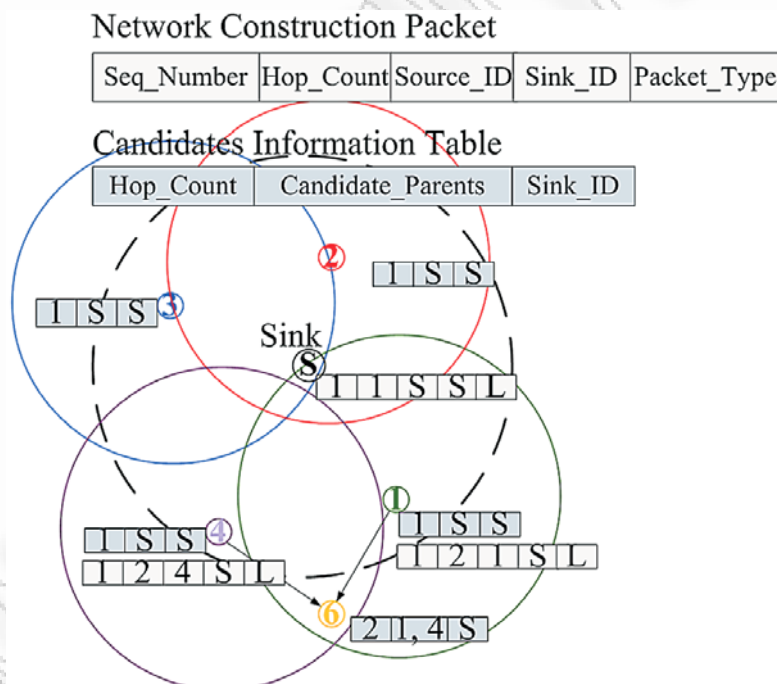
### 3.6.2.2 Φάση κατασκευής στρώματος (Layer Construction Phase – LCP)

Το HMRP διαμορφώνει τις ιεραρχικές σχέσεις με ένα πακέτο κατασκευής δικτύου (network construction packet – NCP), το οποίο επιτρέπει στους κόμβους να διαμορφώσουν αυτόνομες σχέσεις χωρίς οποιοδήποτε συγκεντρωτικό έλεγχο. Το NCP format είναι <Seq\_Number, Hop\_Count, Source\_ID, Sink\_ID, Packet\_Type>. Ο τομέας Seq\_Number είναι μια ακολουθία πακέτων. Ο τομέας Hop\_Count είναι ο αριθμός βημάτων από τον κόμβο προορισμού, έτσι οι κόμβοι που μπορούν να λάβουν το σήμα του κόμβου προορισμού ορίζονται ως οι κόμβοι ένας-βήματος. Το Source\_ID δείχνει την ταυτότητα του κόμβου από τον οποίο προήλθε το πακέτο στρώματος. Επειδή το HMRP υποστηρίζει πολλαπλούς νεροχύτες, το Sink\_ID προσδιορίζει ποιος κόμβος προορισμού μεταδίδει το πακέτο στρώματος. Ο τομέας Packet\_Type διευκρινίζει τον τύπο του πακέτου. Οι κατάλογοι τύπων πακέτου είναι ταξινομημένοι ή κατηγοριοποιημένοι σε δύο τύπους, οι οποίοι είναι το πακέτο αιτήματος κατασκευής στρώματος (LCREQ) πακέτο (L) και πακέτο αιτήματος υποψηφίων γονέων (CPREQ) πακέτο (C).

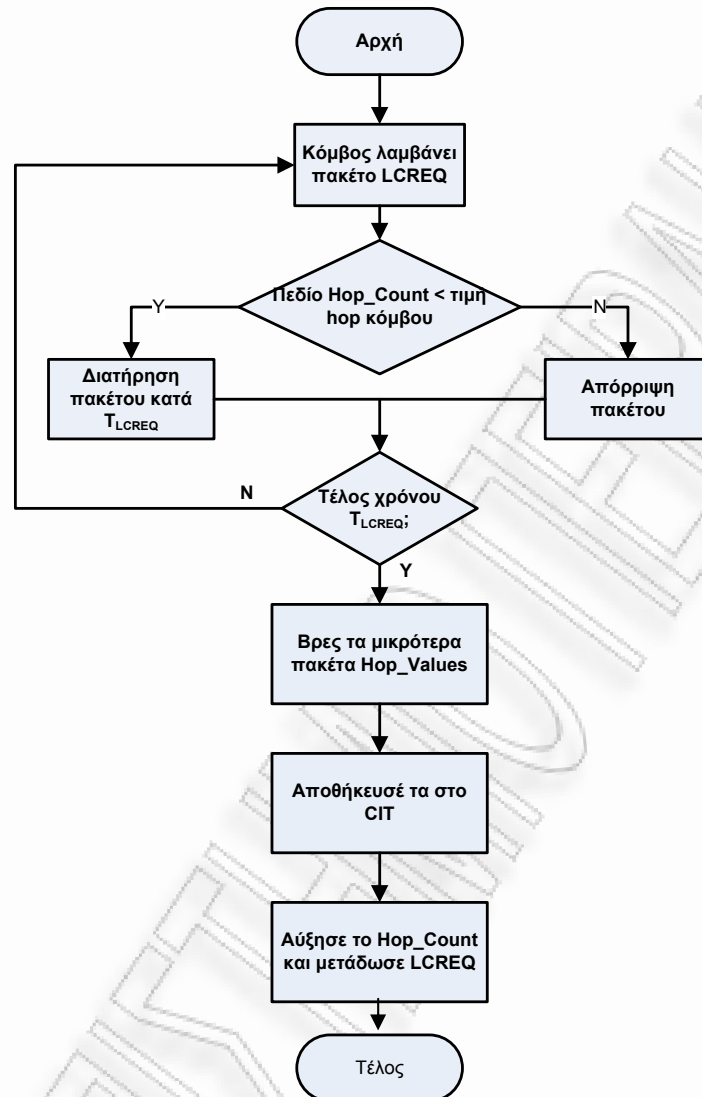
Οι σημαντικότερες δραστηριότητες σε αυτήν την φάση είναι οργάνωση ιεραρχίας, δημιουργία πίνακα πληροφοριών υποψηφίων και σχηματισμός πορειών δρομολόγησης για κάθε κόμβο. Ο κόμβος προορισμού (S) αρχικά αυξάνει το πεδίο Hop\_Count κατά ένα και

μεταδίδει το πακέτο LCREQ για να ανακαλύψει τους κόμβους ενός βήματος, δηλ., ο κόμβος προορισμού μεταδίδει το LCREQ πακέτο <1, 1, S, S, L> στους κοντινούς κόμβους του, που φαίνονται στο σχήμα 3. Ένας κόμβος που δεν συνδέεται ακόμα με το στρώμα καθορίζει τον(τους) υποψήφιους γονείς του από το λαμβανόμενο πακέτο LCREQ με την αναμονή ενός μικρού χρονικού διαστήματος ( $T_{LCREQ}$ ) για να ληφθούν ένας ή περισσότεροι υποψήφιοι γονείς και τους καταγράφει στον πίνακα πληροφοριών υποψηφίων του (CIT).

Στην εικόνα 62 του [47], ο κόμβος 1 ελέγχει το Packet\_Type ενός λαμβανόμενου πακέτου (που μπορεί να προέλθει από διαφορετικούς κόμβους προορισμού ή άλλους κόμβους). Εάν η αξία του πεδίου Packet\_Type είναι L, τότε είναι ένα πακέτο LCREQ. Ο κόμβος θα συγκρίνει το πεδίο Hop\_Count με την τιμή του βήματός του. Εάν το πεδίο Hop\_Count είναι μικρότερο από την τιμή του βήματός του, τότε κρατά το πακέτο κατά τη διάρκεια  $T_{LCREQ}$ , π.χ., η αξία του πεδίου Hop\_Count είναι 1, που είναι λιγότερο από την αξία βήματος  $\infty$  του κόμβου 1 και επομένως κρατάει το πακέτο. Εάν ο χρόνος  $T_{LCREQ}$  τελειώσει, ο κόμβος 1 αρχίζει να επιλέγει τα πακέτα με τις χαμηλότερες τιμές Hop\_Count ως υποψηφίους γονείς του και καταγράφει τις πληροφορίες πακέτων στον πίνακα πληροφοριών υποψηφίων του (CIT). Ο κόμβος 1 έπειτα αυξάνει την τιμή του πεδίου Hop\_Count του πακέτου LCREQ κατά 1 και το αναμεταδίδει. Ο κόμβος 6 λαμβάνει τα πακέτα δύο στρωμάτων από τους κόμβους 1 και 4 με την ίδια τιμή του πεδίου Hop\_Count. Ως εκ τούτου, οι υποψήφιοι γονείς είναι και οι δύο κόμβοι 1 και 4. Επιπλέον, ο κόμβος 1 λαμβάνει ένα πακέτο LCREQ από τον κόμβο 4, αλλά η τιμή βήματος του κόμβου 1 είναι ίση με το πεδίο Hop\_Count. Επομένως, ο κόμβος 1 αγνοεί το πακέτο LCREQ. Η εικόνα 63 του [47] παρουσιάζει τη ροή όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο. Κάθε κόμβος συνεχίζει το πακέτο LCREQ έως ότου κατασκευάζεται το στρώμα του δικτύου.



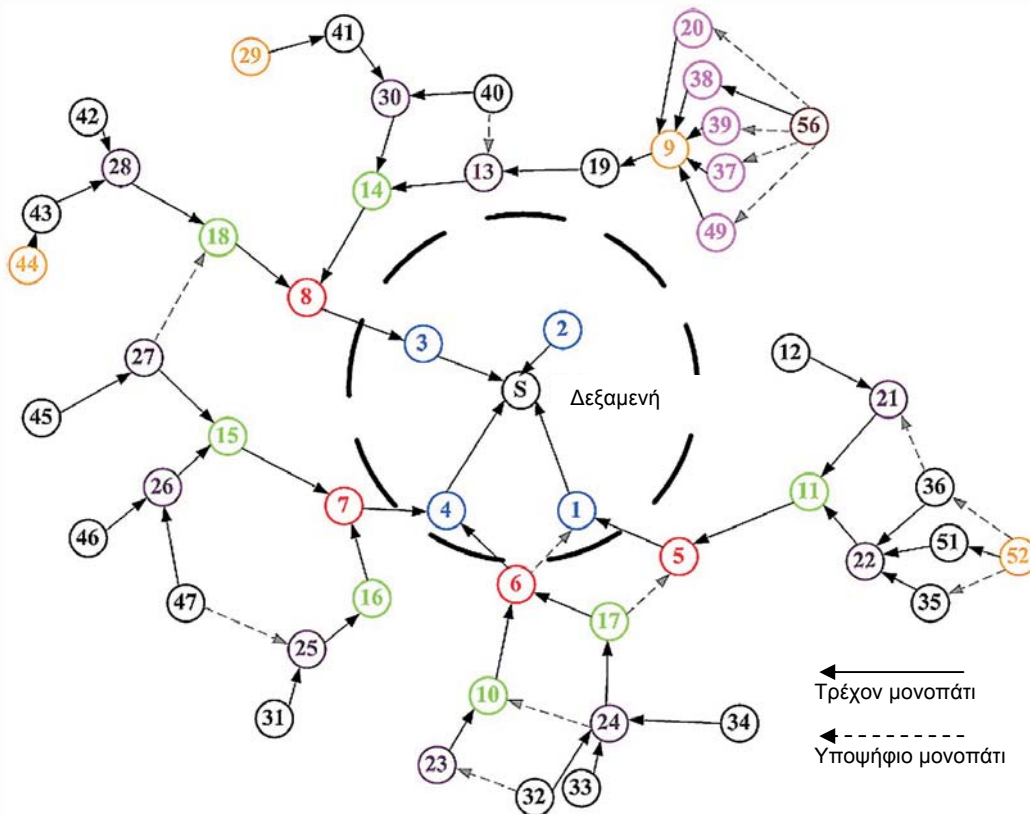
Εικόνα 62: Πλημμύρα κατασκευής στρώματος [47]



Εικόνα 63: Μια ροή όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο LCREQ [47]

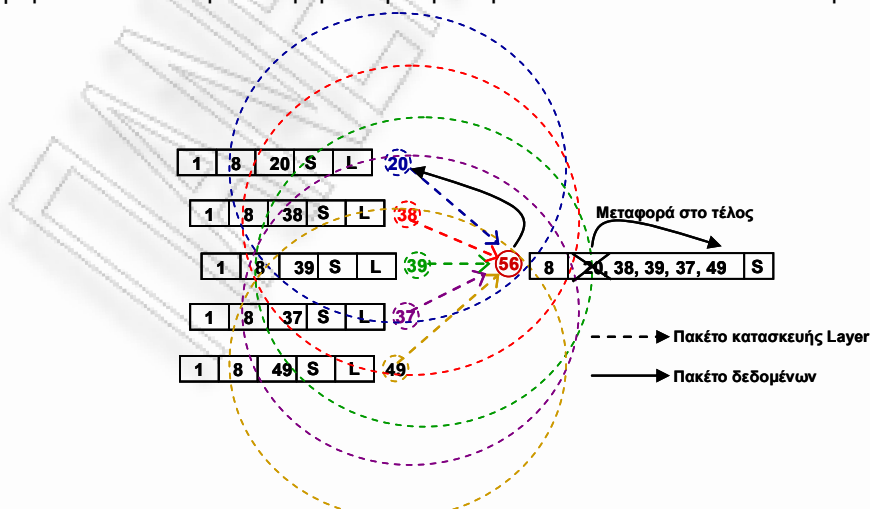
### 3.6.2.3 Φάση διάδοσης στοιχείων (Data Dissemination Phase – DDP)

Αφότου ολοκληρώνεται η πρώτη φάση, το δίκτυο κατασκευάζεται όπως φαίνεται στο σχήμα 64 [47]. Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να διαδίδουν τα ανιχνεύσιμα δεδομένα στον κόμβο προορισμού μέσω του γονέα κόμβου. Το σχήμα των πεδίων είναι το ακόλουθο: <Seq\_Number, Source\_ID, Dest\_ID, Sink\_ID, Data\_Len, Payload>. Το πεδίο Seq\_Number είναι ένας αριθμός ακολουθίας του πακέτου. Τα πεδία Source\_ID, Dest\_ID, και Sink\_ID είναι αντίστοιχα ο κόμβος πηγής του πακέτου, ο κόμβος προορισμού στον οποίο το πακέτο προωθείται, και ο κόμβος προορισμού που ζητά το πακέτο δεδομένων. Ο τομέας Data\_Len δείχνει το μήκος του πακέτου, και ο τομέας Payload χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των δεδομένων. Μια επιβεβαίωση λήψης πακέτου δεδομένων (Received Data Acknowledge – RDACK) στέλνεται όταν διαβιβάζεται επιτυχώς το πακέτο δεδομένων στο γονέα. Ο γονέας κόμβος απαντά έπειτα με αυτό το πακέτο για να ειδοποιήσει τον κόμβο πηγή, και διαβιβάζει το πακέτο δεδομένων στον επόμενο κόμβο. Ο κόμβος X επιλέγει μια εγγραφή (με το γονέα p) με βάση το Round Robin Scheduling (RRS) στον πίνακα CIT όταν επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο δεδομένων σε έναν κόμβο προορισμού. Ο γονέας p απαντά με ένα πακέτο RDACK για να επιβεβαιώσει ότι η μετάδοση είναι επιτυχής μόλις λάβει το πακέτο στοιχείων. Ο κόμβος κινεί έπειτα την εγγραφή αυτή του πίνακα CIT προς την τελευταία θέση και μεταφέρει το πακέτο δεδομένων στην επόμενη εγγραφή. Εάν καμία απάντηση RDACK δεν λαμβάνεται από τον p κατά τη διάρκεια ενός χρόνου  $T_{RDACK}$  (αυτή τη φορά είναι πολύ κοντός), τότε ο κόμβος X διαγράφει την εγγραφή με το γονέα p από τον CIT.



Εικόνα 64: Αποτέλεσμα κατασκευής στρώματος δικτύου [47]

Παραδείγματος χάριν, στην εικόνα 65 [47], ο κόμβος 56, με πέντε υποψήφιους γονείς, 20, 38, 39, 37 και 49, επιλέγει διαδοχικά μια εγγραφή από το CIT. Ο κόμβος 56 αρχικά διαδίδει τα πακέτα δεδομένων στον γονέα κόμβο 20. Εάν ο κόμβος 20 απαντά με ένα πακέτο RDACK, έπειτα ο κόμβος 56 κινεί την εγγραφή του κόμβου 20 προς την τελευταία θέση του CIT. Αντίθετα, εάν ο κόμβος 20 δεν απαντά με ένα πακέτο RDACK, τότε αφαιρείται από τον CIT, δεδομένου ότι η ενέργειά του μπορεί να έχει τελειώσει, ή είναι σπασμένος και το πακέτο δεδομένων δεν μπορεί να μεταφερθεί μέσω αυτού του κόμβου αργότερα. Κάθε κόμβος εκτελεί την ίδια διαδικασία με τον κόμβο 56 έως ότου φθάνει το πακέτο δεδομένων στον κόμβο προορισμού. Το πακέτο δεδομένων μπορεί να διαβιβαστεί στον κόμβο προορισμού μέσω πολλών πορειών. Η διάρκεια ζωής του δικτύου μπορεί να επεκταθεί εάν ο κόμβος αισθητήρων χρησιμοποιεί πάντα μια διαφορετική πορεία για να στείλει τα πακέτα δεδομένων.

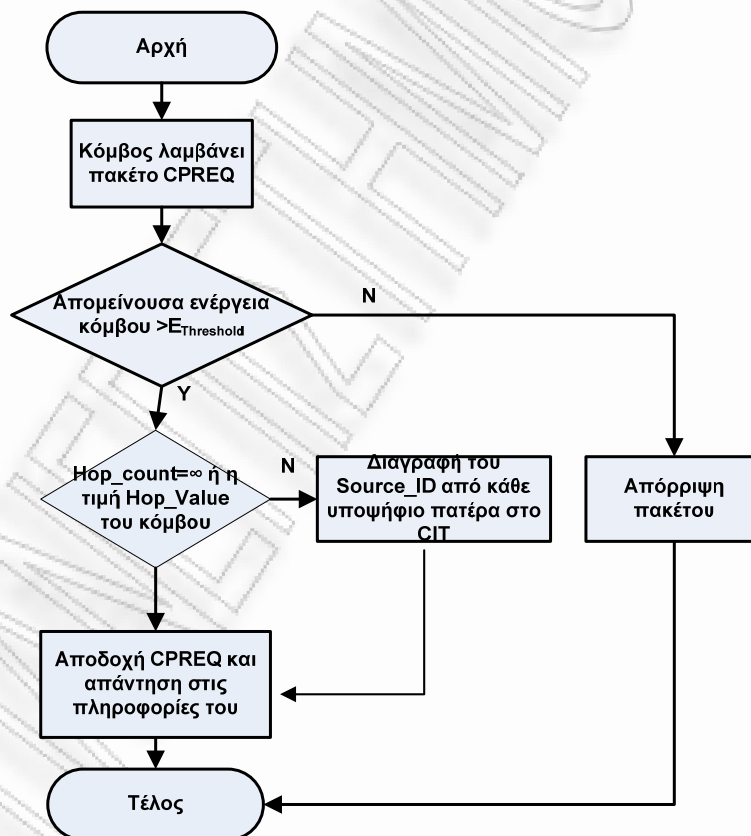


Εικόνα 65: Φάση διάδοσης στοιχείων [47]

### 3.6.2.4 Συντήρηση στρώματος δικτύου

Επιπλέον, ο νέος κόμβος που συνδέεται στο δίκτυο ανακαλύπτει έναν γονέα χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό επανεύρεσης ως εξής. Στην εικόνα 66, ο κόμβος μεταδίδει ένα NCP με την τιμή βήματος του και Packet\_Type την τιμή C (που σημαίνει αίτημα υποψήφιου γονέα, CPREQ) στους γειτονικούς κόμβους του για να τους ενημερώσει για την ύπαρξή του. Όποιος γειτονικός κόμβος λαμβάνει αυτό το μήνυμα ελέγχει ότι η υπολειπόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το  $E_{Threshold}$  (50% της αρχικής ενέργειας). Αυτό το κατώτατο όριο εξαρτάται από τη διαφορετική εφαρμογή του δικτύου. Εάν ένας γειτονικός κόμβος έχει ικανοποιητική ενέργεια, τότε επιθεωρεί το πεδίο Hop\_Count για να προσδιορίσει το πακέτο αίτηματος. Εάν το αίτημα προέρχεται από έναν νέο κόμβο (τιμή πεδίου Hop\_Count να είναι "∞") τότε ο γειτονικός κόμβος αποδέχεται την αίτηση και απαντά με ένα πακέτο LCREQ στο κόμβο που αιτείται. Διαφορετικά ο γειτονικός κόμβος ελέγχει εάν το Hop\_Count του κόμβου αίτησης είναι ίσο με το Hop\_Value του + 1. Εάν «ναι» τότε ο γειτονικός κόμβος αποδέχεται την αίτηση και απαντά με ένα πακέτο LCREQ στο κόμβο που αιτείται. Εάν «όχι» τότε διαγράφει το Source\_ID αυτού του αιτήματος από τον CIT του και απαντά με ένα LCREQ πακέτο στον κόμβο αίτησης.

Συγκεκριμένα, αυτό το πακέτο LCREQ είναι ίδιο με αυτό που περιγράφεται με στην παράγραφο 1, εκτός από το ότι αποστέλλεται μοναδικά και όχι broadcast. Εάν ο κόμβος αίτησης δεν λαμβάνει οποιοδήποτε πακέτο LCREQ αφού μεταδώσει το πακέτο CPREQ, τότε είτε κανένας κόμβος δεν υπάρχει μέσα στη περιοχή εκπομπής του, ή κανένας από τους γειτονικούς κόμβους του δεν έχει συνδεθεί ακόμα με το στρώμα δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κόμβος αίτησης αναμεταδίδει περιοδικά το πακέτο αίτησης CPREQ και αναμένει ένα εισερχόμενο πακέτο LCREQ αφού κάποιος από τους γείτονές του έχει συνδεθεί με το δίκτυο.

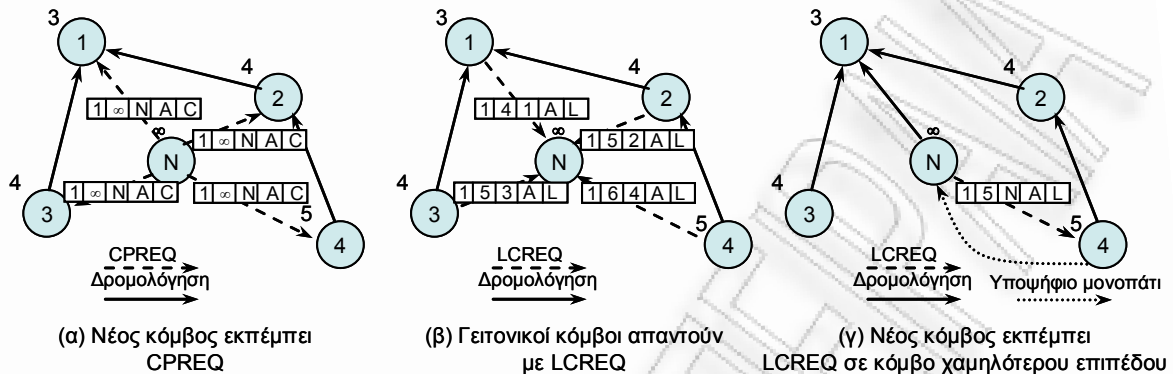


Εικόνα 66: Ενέργειες κατά την λήψη πακέτου CPREQ [47]

Όταν ο κόμβος αίτησης λαμβάνει ένα πακέτο LCREQ από τους γειτονικούς κόμβους του, επιλέγει το πακέτο με τη χαμηλότερη τιμή πεδίου Hop\_Count ως υποψήφιο γονέα του. Εάν  $Hop\_Count = Hop\_Value + 1$ , τότε ο υποψήφιος γονέας είναι αδερφικός κόμβος του. Διαφορετικά, ο υποψήφιος γονέας πρέπει να είναι σίγουρος για τους κόμβους παιδιά του. Στην



εικόνα 67, αφότου έχει θέσει ένας νέος κόμβος τους υποψήφιους γονείς του, τότε ελέγχει τα άλλα λαμβανόμενα πακέτα LCREQ για να καθορίσει εάν το πεδίο Hop\_Count είναι ίσο με το Hop\_Value του + 2, τότε στέλνει το LCREQ για να γίνει ο υποψήφιος γονέας τους.



Εικόνα 67: Συντήρηση στρώματος δικτύου [47]

### 3.6.2.5 Συγχώνευση δεδομένων

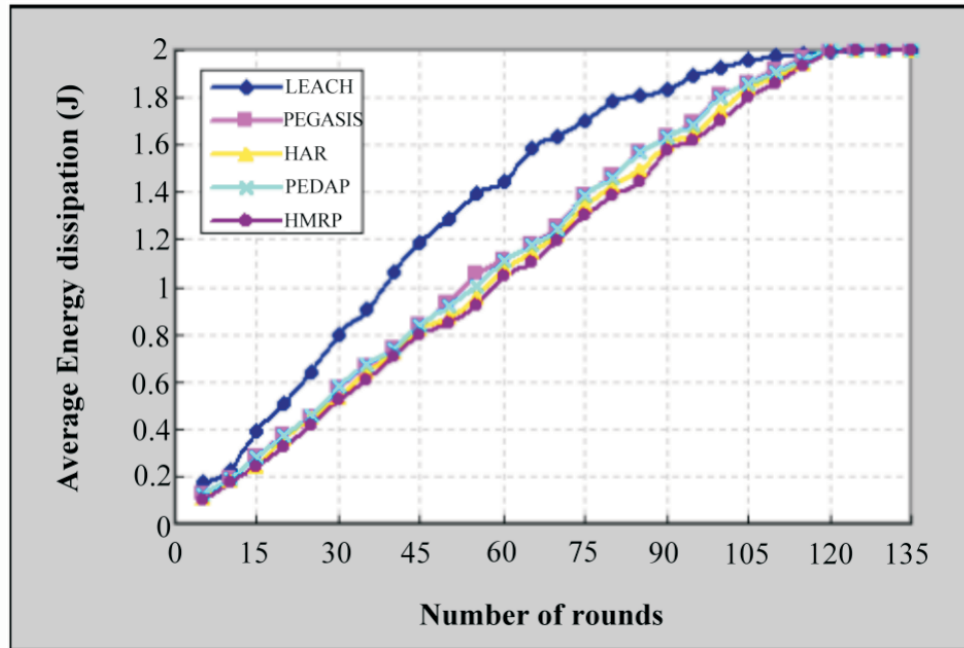
Προκειμένου να σωθεί περισσότερη ενέργεια ολόκληρου του δικτύου, προσθέτουμε επίσης το μηχανισμό συνάθροισης δεδομένων στον HMRP. Όλοι οι κόμβοι θα αθροίσουν τα δεδομένα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου  $T_{Aggregation}$  εκτός από τον κόμβο που αισθάνθηκε το γεγονός και παράγαγε τα δεδομένα. Όταν ένας κόμβος λαμβάνει τα πακέτα δεδομένων από τους διαφορετικούς κόμβους χαμηλότερου επιπέδου του, θα ταξινομήσει το πακέτο από το πεδίο Sink\_ID του πακέτου.

Μετά από αυτό, ο κόμβος μπορεί να αθροίσει τα πακέτα με τη συγχώνευση του πεδίου Payload (δεδομένα) και την τροποποίηση των άλλων πεδίων τους. Ως εκ τούτου, οι κόμβοι δεν χρειάζεται να εκτελέσουν πολλούς υπολογισμούς για τη συνάθροιση δεδομένων. Τέλος, μόνο ένα πακέτο μεταφέρεται στον κόμβο προορισμού σε μια πορεία δρομολόγησης. Και όταν ο κόμβος προορισμού λαμβάνει αυτό το πακέτο, πρέπει να ανακαλύψει τις χρήσιμες πληροφορίες από το πακέτο.

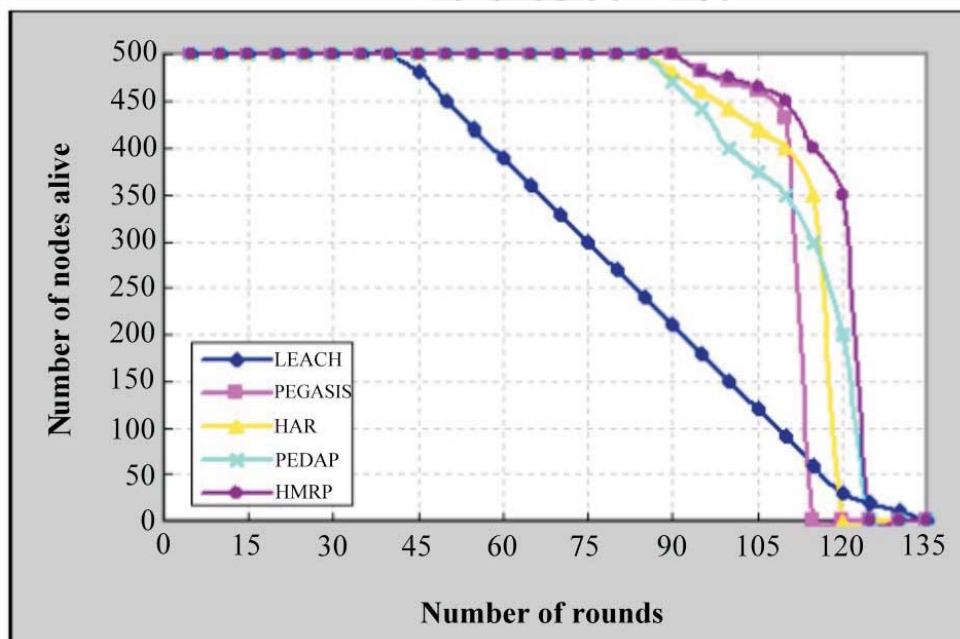
### 3.6.2.6 Πλεονεκτήματα του HMRP

Το HMRP υιοθετεί την ιεραρχική έννοια για να κατασκευάσει ολόκληρο το δίκτυο αισθητήρων. Κάθε κόμβος (συμπεριλαμβανομένου του κόμβου προορισμού) αρκεί να μεταδώσει ραδιοφωνικά το πακέτο κατασκευής στρώματος μία φορά και να διατηρήσει τον CIT του. Όταν ο κόμβος διαδίδει το πακέτο δεδομένων, πρέπει μόνο να ξέρει σε ποιον κόμβο γονέα να μεταφέρει, χωρίς για να διατηρήσει ολόκληρες τις πληροφορίες πορείων.

Αυτό μπορεί να μειώσει τα επιπλέον έξοδα του κόμβου. Αν και το HMRP πρέπει να υπολογίσει κάποιες πληροφορίες για να καταγράψει στον CIT του κόμβου, αλλά η ενεργειακή δαπάνη είναι λιγότερη από τη μετάδοση και την λήψη. Επιπλέον, το HMRP υποστηρίζει τη διαβίβαση δεδομένων πολλαπλών διαδρομών και όχι τη χρήση σταθερής πορείας. Η κατανάλωση ενέργειας θα διανεμηθεί και η διάρκεια ζωής του δικτύου θα παραταθεί. Τέλος, το HMRP μπορεί να υποστηρίξει την κατάσταση πολλαπλών κόμβων προορισμού.



Εικόνα 68: Διάρκεια ζωής δικτύου HMRP σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα [47]



Εικόνα 69: Μέση κατανάλωση ενέργειας δικτύου HMRP σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα [47]

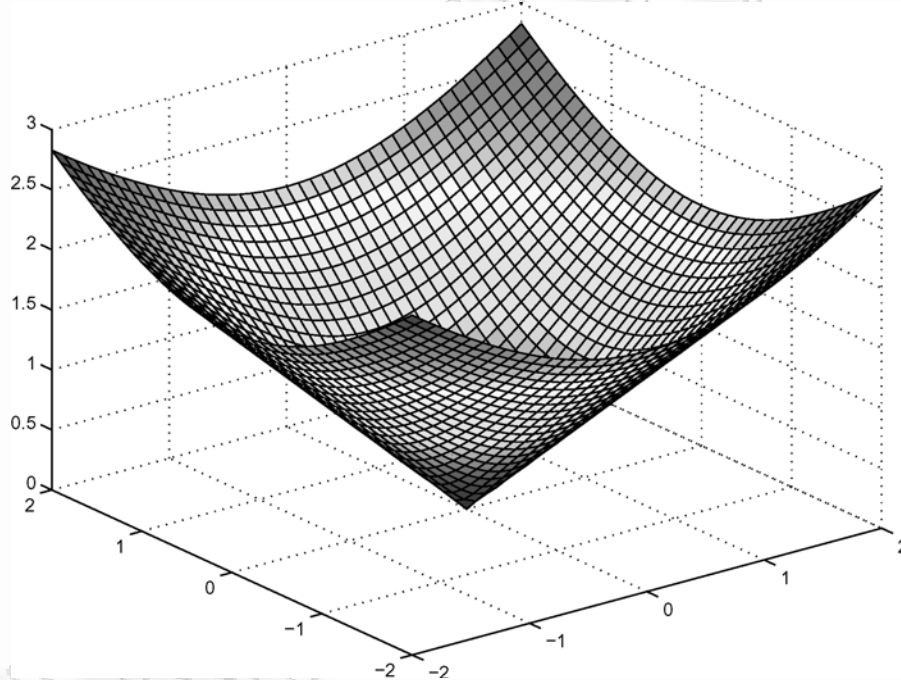
### 3.6.3 Broadcast μετάδοση με κλίση (GRADient Broadcast - GRAB)

Το σχέδιο GRAB [48] εκμεταλλεύεται το πλεονέκτημα της μεγάλης κλίμακας. Επιτυγχάνει την ευρωστία του συστήματος με τη στήριξη στις συλλογικές προσπάθειες από τους πολλαπλούς αισθητήρες χωρίς εξάρτηση σε κανέναν μεμονωμένο. Ένα πακέτο διαβιβάζεται πάνω από πολλαπλές πορείες, το οποίο βελτιώνει την αξιοπιστία. Η παρεμβολή τέτοιων πορειών παρέχει την ανοχή των αποτυχιών κόμβων ή των λαθών συνδέσεων κατά μήκος οποιασδήποτε μεμονωμένης πορείας, αυξάνοντας κατά συνέπεια σημαντικά την ευρωστία παράδοσης δεδομένων. Δεδομένου ότι κάθε δέκτης αποφασίζει εάν πρέπει να διαβιβάσει ένα πακέτο, ο αποστολέας δεν πρέπει να τηρήσει πληροφορίες για ποιο γείτονα να διαβιβάσει τα στοιχεία. Η αποβολή της εν λόγω κατάστασης πορειών αφαιρεί επίσης το overhead και την πολυπλοκότητα

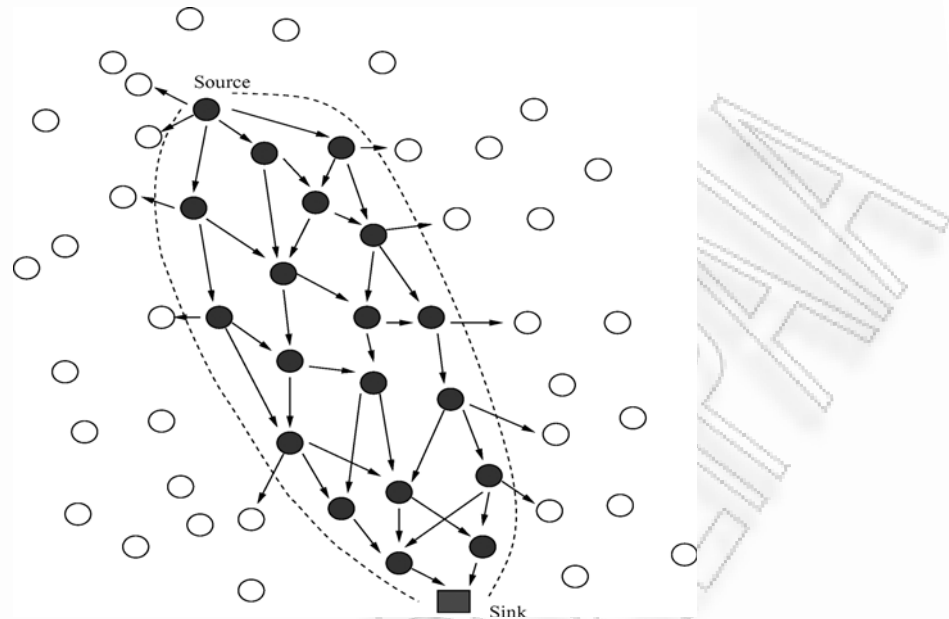
στην επισκευή των πορειών για τους αποτυχημένους κόμβους ή τις σπασμένες συνδέσεις. Ένα πακέτο ταξιδεύει απλά μέσω οποιωνδήποτε λειτουργούντων κόμβων για να φθάσει στον κόμβο προορισμού. Η πίστωση παρέχει ένα εξόγκωμα ελέγχου για να συντονίσει το βαθμό ευρωστίας και το συνολικό κόστος.

### 3.6.3.1 Επισκόπηση πρωτοκόλλου

Στο [48] θεωρείται το ακόλουθο μοντέλο δικτύου αισθητήρων (όπως φαίνεται στην εικόνα 71): Οι μεγάλοι αριθμοί μικρών, στάσιμων κόμβων αισθητήρων επεκτείνονται πάνω σε έναν τομέα. Ο χρήστης συλλέγει τα ανιχνεύσιμα δεδομένα μέσω ενός στάσιμου κόμβου προορισμού (στο κατώτατο σημείο της εικόνας) που επικοινωνεί με το δίκτυο. Κάθε ερέθισμα ανιχνεύεται από τους πολλαπλούς κοντινούς κόμβους αισθητήρων και ένας από αυτούς παράγει τις εκθέσεις ως πηγή (στην πάνω αριστερή γωνία). Λόγω της περιορισμένης ακτίνας εκπομπής, οι εκθέσεις διαβιβάζονται πάνω από πολλούς ενδιάμεσους κόμβους πριν φθάσουν στον κόμβο προορισμού. Οι κόμβοι μπορούν να συντονίσουν την ένταση εκπομπής τους για να ελέγξουν πόσο μακριά μπορεί να φθάσει η μετάδοση. Τέτοιες ρυθμίσεις έντασης διατηρούν ενέργεια και μειώνουν τις συγκρούσεις όποτε είναι δυνατόν. Οι κόμβοι χρησιμοποιούν CSMA/CA MAC πρωτόκολλο για να επικοινωνήσουν, η οποία είναι λιγότερο αξιόπιστη από το 802.11DCF που έχει την ανταλλαγή RTS/CTS/ACK. Οι εξωτερικοί θόρυβοι και οι διαταραχές μπορούν περαιτέρω να επιδεινώσουν την ποιότητα του καναλιού. Λόγω του σκληρού περιβάλλοντος, οι κόμβοι αισθητήρων υφίστανται τις απρόβλεπτες, και ενδεχομένως συχνές αποτυχίες.



Εικόνα 70: Το σχήμα του πεδίου κόστους είναι σαν χοάνη με τον κόμβο προορισμού να βρίσκεται στο κάτω μέρος. Τα πακέτα ακολουθούν μειωμένο πεδίο κόστους για να φτάσουν στον κόμβο προορισμού [48]



**Εικόνα 71: Το πλέγμα αποστολής αρχίζει από μια πηγή και τελειώνει στον κόμβο προορισμού. Οι μαύροι κόμβοι διαβιβάζουν το πακέτο στον κόμβο προορισμού συλλογικά. Παρατηρήστε ότι μερικοί κόμβοι έξω από το πλέγμα λαμβάνουν επίσης το πακέτο αλλά δεν το διαβιβάζουν. [48]**

Στο [48] χρησιμοποιείται ένα παράδειγμα ενός κόμβου προορισμού και ενός γεγονότος για να επεξηγηθεί πώς το GRAB λειτουργεί. Για να συλλέξει τις εκθέσεις δεδομένων, ο κόμβος προορισμού χιτίζει αρχικά ένα πεδίο δαπανών με τη διάδοση των πακέτων διαφημίσεων (ADV) στο δίκτυο. Το κόστος σε έναν κόμβο είναι η ελάχιστη ενέργεια overhead για να διαβιβάσει ένα πακέτο από αυτόν τον κόμβο στον κόμβο προορισμού κατά μήκος μιας πορείας. Υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος μπορεί να υπολογίσει το κόστος αποστολής δεδομένων στους κοντινούς γείτονες (π.χ., βασισμένο στο λόγο σήματος προς θόρυβο των μεταδόσεων των γειτόνων). Τα κόστη όλων των κόμβων στο δίκτυο διαμορφώνουν το πεδίο κόστους. Εάν φανταζόμαστε ότι κάθε κόμβος αντιστοιχίζεται σε ένα ύψος ανάλογο προς το κόστος του, ολόκληρο το πεδίο κόστους θα μοιάζει με μια χοάνη (δείτε την εικόνα 70). Οι κόμβοι «πιο κοντά» στον κόμβο προορισμού έχουν τις μικρότερες δαπάνες και είναι «χαμηλότεροι», ενώ εκείνοι «μακρύτερα» έχουν τις μεγαλύτερες δαπάνες και είναι «υψηλότεροι».

Το πεδίο κόστους δίνει τη συνολική κατεύθυνση προς τον κόμβο προορισμού σιωπηρά. Όταν ένας κόμβος διαβιβάζει ένα πακέτο, δεν υποδεικνύει ποιοι κόμβοι είναι το επόμενο βήμα. Περιλαμβάνει απλά το κόστος του στο πακέτο. Μόνο οι γείτονες με τις μικρότερες δαπάνες μπορούν να συνεχίσουν το πακέτο. Οι γείτονες με τις υψηλότερες ή ίσες δαπάνες ρίχνουν σιωπηλά το πακέτο επειδή είναι στη «λανθασμένη» κατεύθυνση. Κατά συνέπεια τα πακέτα ταξιδεύουν σε ένα πεδίο κόστους όπως το νερό ρέει κάτω στο κατώτατο σημείο μιας χοάνης. Ακολουθούν την κατεύθυνση του μειωμένου κόστους για να φθάσουν στο κατώτατο σημείο του τομέα δαπανών, ο οποίος είναι ο κόμβος προορισμού. Οι πολλαπλάσιες πορείες του μειωμένου κόστους υπάρχουν παρεμβάλλοντας και διαμορφώνοντας ένα πλέγμα προώθησης.

Η εκλογή μιας πηγής ακολουθεί τον ίδιο μηχανισμό. Θέλουμε μόνο έναν κόμβο για να παράγει την έκθεση δεδομένου ότι θα ήταν απώλεια πόρων εάν κάθε κόμβος που ανιχνεύει το ερέθισμα στέλνει μια έκθεση. Το ερέθισμα δημιουργεί ένα πεδίο έντασης σημάτων ανίχνευσης, το «σχήμα» του οποίου είναι παρόμοιο με αυτό του πεδίου κόστους. Κάθε κόμβος μεταδίδει broadcast ένα μήνυμα που δείχνει την ένταση του σήματός του (με κάποια τυχαία καθυστέρηση για να αποφεύγει τη σύγκρουση). Ένας κόμβος αναμεταδίδει την ένταση του σήματός του όποτε ακούει το μήνυμα ενός γείτονα με ένα πιο αδύνατο σήμα, αλλά σταματά να μεταδίδει όταν ακούει ένα ισχυρότερο σήμα. Με αυτόν τον τρόπο, τα μηνύματα κυλούν προς το κέντρο του πεδίου έντασης σημάτων. Τελικά ο κόμβος με το ισχυρότερο σήμα παράγει μια έκθεση. Αυτός ο κόμβος ονομάζεται «κέντρο του ερεθίσματος» (Center of Stimulus – CoS).

Το CoS και η προώθηση δεδομένων χρησιμοποιούν την ίδια ιδέα του πεδίου κλίσης όπου η ένταση μιας ιδιότητας ποικίλλει με την απόσταση. Οι διαφορές είναι: Το πεδίο έντασης

σημάτων υπάρχει ήδη στο φυσικό κόσμο, ενώ το πεδίο κόστους είναι ένα αντικείμενο που δημιουργείται από τον κόμβο προορισμού. Οι κόμβοι μακριά από το ερέθισμα έχουν πιο αδύνατα σήματα, αλλά οι κόμβοι μακριά από τον κόμβο προορισμού έχουν μεγαλύτερα κόσθη. Όταν ένα ερέθισμα ανιχνεύεται, τα δεδομένα προέρχονται από όλες τις κατευθύνσεις στο κέντρο, αλλά για την προώθηση, προέρχονται μόνο από την κατεύθυνση της πηγής.

Δεδομένου ότι συνήθως περισσότερο από αρκετές πορείες μειωμένου κόστους υπάρχουν, θέλουμε να περιορίσουμε το «πλάτος» του πλέγματος προώθησης. Διαφορετικά το πακέτο θα ακολουθούσε κάθε πιθανή πορεία μειωμένου κόστους, δημιουργώντας υπερβολικό πλεονασμό και σπαταλώντας πόρους. Για να ελέγξει το «πλάτος», μια πηγή ορίζει μια πίστωση  $a$  στα πακέτα που στέλνει. Η πίστωση είναι κάποιος πρόσθετος προϋπολογισμός που μπορεί να καταναλωθεί για να διαβιβαστεί το πακέτο. Το ποσό της πίστωσης και το κόστος της πηγής (δηλ.,  $a + C_{\text{source}}$ ) είναι ο συνολικός προϋπολογισμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σταλεί ένα πακέτο στον κόμβο προορισμού κατά μήκος μιας πορείας. Ένα πακέτο μπορεί να πάρει οποιαδήποτε πορεία που απαιτεί ένα κόστος λιγότερο ή ίσο, αλλά όχι πέρα από το συνολικό προϋπολογισμό.

Το ποσό πίστωσης ελέγχει τον πλεονασμό του πλέγματος ευέλικτα. Εάν δεν υπάρχει καμία πίστωση, το πακέτο μπορεί μόνο να διαβιβαστεί κατά μήκος της μόνης ελάχιστης πορείας κόστους της πηγής. Όταν προστίθεται περισσότερη πίστωση για να αυξήσει τον προϋπολογισμό, περισσότερες πορείες είναι διαθέσιμες για να παραδώσουν το πακέτο. Τέτοιες πορείες συνδυάζονται με την ελάχιστη πορεία δαπανών και διαμορφώνουν το πλέγμα προώθησης δυναμικά μέσω της συνδυασμένης επίδρασης του πεδίου κόστους και της πιστωτικής αξίας που φέρονται σε κάθε πακέτο (δείτε την εικόνα 71 για παράδειγμα).

Ένα τελικό θέμα που πρέπει να θιχθεί πριν παρουσιαστεί το σχέδιο είναι ο αριθμός πηγών και κόμβων προορισμού που το σχέδιο GRAB μπορεί να υποστηρίξει. Για να απλοποιηθεί η παρουσίαση χρησιμοποιείται ένα παράδειγμα μιας στάσιμης πηγής (CoS) και ενός στάσιμου κόμβου προορισμού. Εντούτοις επισημαίνεται ότι το σχέδιο GRAB υποστηρίζει προώθηση δεδομένων από πολλαπλά, κινητά ερεθίσματα επίσης.

Όταν ένα ερέθισμα, όπως μια δεξαμενή, κινείται προς μια άλλη θέση, ένας διαφορετικός αισθητήρας CoS εκλέγεται για να παράγει την έκθεση. Ο παλαιός κόμβος CoS σταματά αυτόματα επειδή δεν βρίσκεται πλέον στο κέντρο του ερεθίσματος. Η περίπτωση των πολλαπλών ερεθισμάτων λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο. Οι ακριβείς λεπτομέρειες δεν παρουσιάζονται σε αυτό το έγγραφο, το οποίο εστιάζει στη σίγουρη αποστολή δεδομένων.

### 3.6.3.2 Δημιουργία και διατήρηση του πεδίου κόστους

Το πεδίο κόστους μπορεί να χτιστεί με τον ακόλουθο απλό τρόπο. Ένας κόμβος προορισμού μεταδίδει broadcast ένα πακέτο διαφημίσεων (ADV) αναγγέλλοντας ένα κόστος 0. Κάθε κόμβος έχει αρχικά ένα κόστος  $\infty$ . Κατά την ακοή ενός πακέτου ADV που περιέχει το κόστος του αποστολέα, ο κόμβος υπολογίζει το κόστος του με την προσθήκη του κόστους συνδέσεως μεταξύ αυτού και του αποστολέα στο διαφημισμένο κόστος του αποστολέα.

Συγκρίνει αυτό το κόστος με το προηγούμενως καταγεγραμμένο και θέτει το νέο κόστος ως μικρότερο των δύο. Όταν λαμβάνει ένα κόστος μικρότερο από το παλαιό, μεταδίδει broadcast ένα πακέτο ADV που περιέχει το νέο κόστος. Ο «κυματισμός» των πακέτων ADV από τον κόμβο προορισμού χτίζει εξωτερικά το πεδίο κόστους για τον κόμβο αυτόν.

Το πρόβλημα με την ανωτέρω μέθοδο είναι υπερβολικά μηνύματα ADV, τα οποία αποτρέπουν την κλιμάκωση στους μεγάλους αριθμούς κόμβων. Προτού να εγκαταστήσει ένας κόμβος το ελάχιστο κόστος, μπορεί να ακούσει πολλά πακέτα ADV, κάθε ένα από τα οποία οδηγεί σε ένα μικρότερο κόστος από το προηγούμενο. Κατά συνέπεια ο κόμβος μεταδίδει broadcast πολλά πακέτα ADV. Για να χτίσουμε το πεδίο κόστους κατά τρόπο κλιμακωτό, προτείναμε έναν αλγόριθμο αναμονής στο [49] και αποδείξαμε ότι εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος μεταδίδει broadcast μόνο μια φορά, και με το ελάχιστο κόστος του.

Το κόστος ενός κόμβου εξαρτάται από την τοπολογία. Οι αλλαγές τοπολογίας καθώς οι κόμβοι αποτυγχάνουν, εξαντλούν την ενέργεια, ή νέοι κόμβοι επεκτείνονται. Το αρχικά χτισμένο πεδίο κόστους γίνεται έτσι ανακριβής. Αν και το GRAB πρωτόκολλο είναι ιδιαίτερα γερό ενάντια στις ανακριβείες στο πεδίο κόστους, το πεδίο κόστους πρέπει να ανανεώνεται εγκαίρως για να κρατήσει την αποστολή αποδοτική.

Για να αποφευχθούν τα overhead της περιοδικής ανανέωσης, επιλέγεται ένα σχέδιο που καθοδηγείται από το γεγονός. Ο κόμβος προορισμού κρατά ένα σχεδιάγραμμα για την πρόσφατη ιστορία των αναφορών δεδομένων από την πηγή. Περιλαμβάνει την αναλογία επιτυχίας (τα πακέτα είναι διαδοχικά αριθμημένα ώστε ένας κόμβος προορισμού μπορεί να υπολογίσει την αναλογία επιτυχίας), ο μέσος καταναλωμένος προϋπολογισμός και ο μέσος αριθμός αντιγράφων που παραλαμβάνονται ανά πακέτο για τις πρόσφατες εκθέσεις. Μόλις παραληφθεί ένα νέο πακέτο, ο κόμβος προορισμού συγκρίνει τις παραμέτρους του πακέτου με τις προηγούμενες που λήφθηκαν. Εάν μια παράμετρος διαφέρει από τις προηγούμενες κατά ένα ορισμένο κατώτατο όριο, ο κόμβος προορισμού μεταδίδει broadcast ένα νέο πακέτο ADV για να επανοικοδομήσει το πεδίο κόστους. Περισσότερες λεπτομέρειες είναι σε μια τεχνική έκθεση [50].

Η λογική πίσω από τη ανανέωση που καθοδηγείται από το γεγονός είναι ότι οι αλλαγές τοπολογίας φέρνουν παραλλαγές στην παράδοση δεδομένων. Με τον έλεγχο ορισμένων παραμέτρων που απεικονίζουν την ποιότητα της παράδοσης στοιχείων, μπορούμε να πούμε το ποσό αλλαγής που έχει συμβεί. Μόνο οι σημαντικές αλλαγές που κάνουν την παράδοση στοιχείων να επιδεινωθεί πέρα από τα αποδεκτά επίπεδα προκαλούν τις ανανεώσεις. Ο ίδιος ο αλγόριθμος προώθησης είναι αρκετά γερός να αντισταθεί τη σημαντική ποσότητα των αλλαγών.

Προτού προχωρήσουμε παρακάτω στη παρουσίαση του αλγόριθμου προώθησης όπως αναφέρεται στο [48], θέλουμε να επισημάνουμε ότι το [49] λύνει μόνο το πρόβλημα του πεδίου κόστους. Δεν εξετάζει τη σίγουρη παράδοση στοιχείων με τους αναξιόπιστους κόμβους αισθητήρων.

### 3.6.3.3 Πλέγμα προώθησης βασισμένο στην πίστωση

Αφού χτιστεί το πεδίο κόστους, μια πηγή στέλνει μια έκθεση που φέρνει μια «πίστωση». Σε κάθε βήμα μόνο οι κόμβοι που έχουν δαπάνες μικρότερες από τον αποστολέα μπορούν να διαβιβάσουν το πακέτο. Για να εξασφαλίσουμε ένα γερό πλέγμα αποστολής, πρέπει να αντιμετωπίσουμε τρία ζητήματα.

Κατ' αρχάς, πώς να επεκταθεί γρήγορα το πλέγμα σε ένα ικανοποιητικό πλάτος αρχίζοντας από την πηγή. Για να είναι γερό, το πλέγμα πρέπει να είναι αρκετά ευρύ για να περιέχει ικανοποιητικούς παράλληλους κόμβους (πορείες). Όταν υπάρχουν αποτυχιές κόμβων ή απώλειες πακέτων, ένα ικανοποιητικό πλάτος εξασφαλίζει ότι μερικοί κόμβοι μπορούν ακόμα να παραδώσουν τα πακέτα επιτυχώς στον επόμενο βήμα. Δεδομένου ότι υπάρχει μόνο ένας κόμβος (η πηγή) στο πρώτο βήμα, πρέπει να επεκτείνουμε γρήγορα το πλέγμα σε ένα ικανοποιητικό πλάτος. Διαφορετικά, η παράδοση μπορεί να αποτύχει προτού να αυξηθεί αρκετά το εύρος του πλέγματος.

Δεύτερον, μετά από την καθιέρωση ενός ικανοποιητικού πλάτους του πλέγματος, πώς να διατηρηθεί. Δεδομένου ότι ένας κόμβος μπορεί να αποτύχει απροσδόκητα ή μπορεί να μην λάβει το πακέτο, ο αριθμός παράλληλων κόμβων που διαβιβάζουν ένα πακέτο τείνει να μειωθεί από το ένα βήμα στο επόμενο. Εάν δεν λαμβάνεται κανένα μέτρο για να αντιδράσει σε αυτήν την τάση, το πλέγμα μπορεί αργότερα να στενέψει προς τα κάτω.

Τέλος, πώς να αποτρέψει τα πακέτα να ταξιδέψουν κατά μήκος μερικών λοξών πορειών ή την παρέκκλιση πάρα πολύ από την κατεύθυνση του κόμβου προορισμού. Για οποιοδήποτε αποστολέα, κατά προσέγγιση οι μισοί από τους γείτονές του έχουν τις μικρότερες δαπάνες. Εάν όλες αυτές οι κατευθύνσεις των μειωμένων κοστών ακολουθηθούν, η αποστολή θα μπορούσε να διασκορπιστεί σε μια περιοχή, στην οποία πολλά πακέτα εκτρέπονται σημαντικά από την κατεύθυνση του κόμβου προορισμού. Θέλουμε να σταματήσουμε τα πακέτα από την ακολουθία τέτοιων πορειών.

### 3.6.3.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

- Σίγουρη μεταφορά δεδομένων.
- Εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας δίκτυων αισθητήρων
- Δυνατότητα ύπαρξης πολλαπλών κόμβων προορισμού.

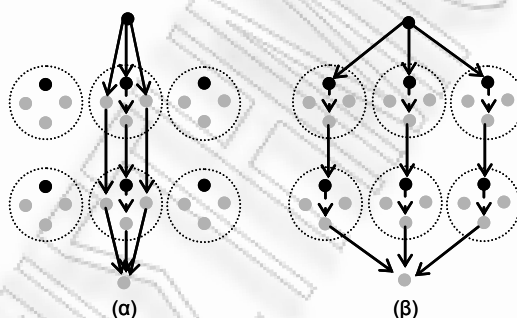
### Μειονεκτήματα

- Αδυναμία ύπαρξης κινητού κόμβου προορισμού, λόγω κατανάλωσης ενέργειας για την επαναδημιουργία του πεδίου κόστους.
- Χρήση πρωτοκόλλου CSMA/CA που είναι λιγότερο αξιόπιστο από π.χ. το 802.11 DCF που χρησιμοποιεί το Directed Diffusion

### 3.6.4 Ο αλγόριθμος CBMPR (Cluster based Multi-path Routing Algorithm)

Η cluster-based multi-path δρομολόγηση (CBMPR) [51] συνδυάζει αποτελεσματικά την βασισμένη σε συστάδα δρομολόγηση και την πολλαπλών διαδρομών δρομολόγηση. Το CBMPR χρησιμοποιεί το δίκτυο συστάδων για να βρει τις πολλαπλές πορείες που παρέχουν ανεξάρτητες πορείες. Η εικόνα 72 του [51] συγκρίνει ένα παράδειγμα της συμβατικής πολλαπλών διαδρομών δρομολόγησης και του CBMPR. Η εικόνα 72(b) παρουσιάζει ένα παράδειγμα των πολλαπλών πορειών που θα υποστούν τη λιγότερη παρέμβαση με την επιλογή των πορειών δρομολόγησης μέσω των διαφορετικών συστάδων.

Το κύριο πλεονέκτημα CBMPR σε σχέση με τη συμβατική multi path δρομολόγηση είναι η λιγότερη παρέμβαση. Ένα άλλο ισχυρό σημείο του CBMPR είναι η απλότητά του. Κάθε πορεία στο CBMPR περνά ακριβώς μέσω των επικεφαλής των συστάδων, με συνέπεια μια απλή δρομολόγηση βήμα-προς-βήμα επιπέδου συστάδων. Αυτό καθιστά το CBMPR κατάλληλο και απλό μειώνοντας το φορτίο του υπολογισμού της παρέμβασης που απαιτείται σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο.



Εικόνα 72: (α) Πολλαπλά μονοπάτια που δημιουργούνται με τα συμβατικά πρωτόκολλα πολλαπλής δρομολόγησης (β) Πολλαπλά μονοπάτια με CBMPR. [51]

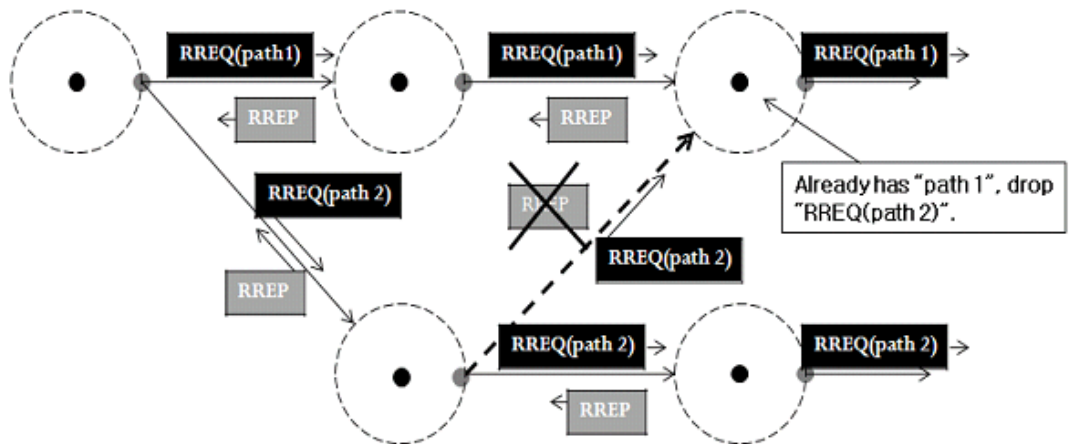
#### 3.6.4.1 Ο αλγόριθμος pathID

Ακόμα κι αν το CBMPR μπορεί να μετριάσει αποτελεσματικά το πρόβλημα παρέμβασης, τα προβλήματα ένωσης πορειών μπορούν να εμφανιστούν επειδή η ένωση πορειών μπορεί να δημιουργηθεί εύκολα επιλέγοντας τη σύνδεση συστάδα-με-συστάδα.

Σαν λύση για να αποφεύγει το πρόβλημα της ένωσης πορειών, ένας κόμβος προορισμού καταγράφει και συγκρίνει τη διεύθυνση των ενδιάμεσων κόμβων που απαριθμούνται στο RREQ (Root Request). Κάθε κόμβος που αναμεταδίδει το RREQ στον προορισμό καταγράφεται στον κατάλογο κόμβων στο RREP. Όταν ο προορισμός λαμβάνει ένα διπλό RREQ, θα συγκρίνει τον κατάλογο κόμβου στο RREQ. Μόνο όταν ο προορισμός ελέγχει ότι δεν υπάρχει καμία πορεία που ενώνεται μεταξύ των πολλαπλών πορειών στέλνει ένα RREP πίσω στην πηγή. Διαφορετικά, το λαμβανόμενο RREQ αναγνωρίζεται ως αίτημα διαδρομών με ένωση πορειών και θα απορριφθεί [52].

Στο [51] προτείνεται ένας «αλγόριθμος pathID» για να αποφευχθεί αποτελεσματικά η ένωση πορειών. Για τη δρομολόγηση μεταξύ των συστάδων, η πηγή περιλαμβάνει ένα pathID σε RREQ και το πλημμυρίζει για την ανακάλυψη διαδρομών. Για τη δρομολόγηση μέσα στη συστάδα με το πρωτόκολλο δρομολόγησης link state, ο κόμβος gateway που έλαβε το RREQ διαφημίζει το pathID σε άλλα μέλη με τη συμπερίληψη του στο πακέτο link state, κατόπιν το pathID θα αποθηκευτεί σε κάθε κόμβο μέλος της τρέχουσας συστάδας. Στη λήψη ενός νέου

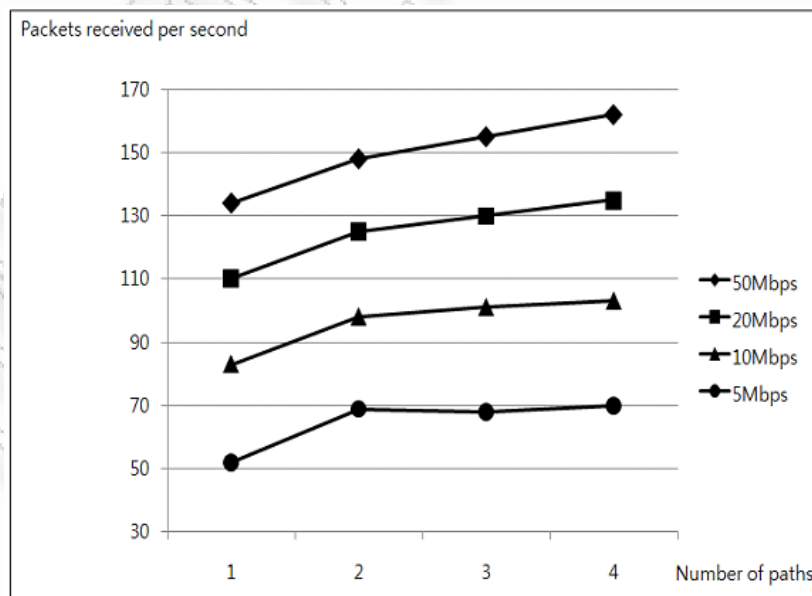
RREQ, η διεύθυνση προέλευσης και τα pathIDs συγκρίνονται με τις αποθηκευμένες πληροφορίες στον πίνακα δρομολόγησης του κόμβου. Εάν το νέο RREQ βρει μια εγγραφή που έχει ίδια διεύθυνση προέλευσης και διαφορετικό pathID στον πίνακα, τότε το αίτημα θα παράγει την ένωση πορειών, και πρέπει να απορριφθεί. Αυτή η διαδικασία εξηγείται στην εικόνα 73 του [51].



Εικόνα 73: Αλγόριθμος PathID. Το PathID ενσωματώνεται στο RREQ για να αποφευχθεί η ένωση πορειών [51]

### 3.6.4.2 Επίδοση του CBMPR

Στο [51] προσομοιώνεται το CBMPR για να ερευνηθεί πώς επιλέγονται τα πολλαπλά δρομολόγια των επικεφαλής συστάδων. Στην προσομοίωση, υποτίθεται ότι κάθε συστάδα έχει τέσσερις κόμβους. Σε κάθε συστάδα, οι επικεφαλής κόμβοι και πύλες συστάδων ορίζονται για την επικοινωνία συστάδας. Χρησιμοποιήθηκε η στατική δρομολόγηση και επιλέχθηκαν οι πορείες με το χέρι σύμφωνα με το CBMPR. Κάθε πορεία περνά τρεις συστάδες μέσω των επικεφαλής συστάδων. Το εύρος ζώνης συνδέσεων τίθεται 5, 10, 20 και 50Mbps. Οι κόμβοι τοποθετήθηκαν σε μια 1200m X 1200m περιοχή και πακέτα CBR 1024 bytes παράγονται με ένα διάστημα 5ms. Το αποτέλεσμα προσομοίωσης παρουσιάζονται στην εικόνα 74 αντίστοιχα.



Εικόνα 74: Απόδοση του CBMPR [52]



Με το εύρος ζώνης 20Mbps και 50Mbps, η ρυθμοαπόδοση αυξάνει περίπου 5~8% για κάθε πρόσθετη πορεία, φθάνοντας τελικά στην αύξηση 20~24% με τέσσερις πορείες. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ίδιο με την περίπτωση της επικοινωνίας χωρίς οποιαδήποτε παρέμβαση. Από αυτό το αποτέλεσμα, μπορεί να ειπωθεί ότι το CBMPR επιλέγει σχεδόν τις ελεύθερες παρεμβάσεις πορείες από την πηγή στον προορισμό. Επίσης διαπιστώνεται ότι η ρυθμοαπόδοση μεγιστοποιείται όταν υπάρχουν δύο πορείες εάν το εύρος ζώνης είναι 5 Mbps, και η προσθήκη περισσότερων πορειών δεν βελτιώνει την απόδοση. Με το εύρος ζώνης 10Mbps, η αύξηση της ρυθμοαπόδοσης είναι αργή όταν προστίθεται η 3η και 4η πορεία. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της συμφόρησης λόγω της παρέμβασης διά-πορειών στον κόμβο πηγής και προορισμού όπου οι πορείες πρέπει να συγχωνευθούν. Το σημείο κορεσμού αυξάνεται όταν αυξάνεται το εύρος ζώνης.

### 3.6.4.3 Συμπεράσματα

Οι περισσότερες από τις έρευνες μεταφοράς πολλαπλών διαδρομών στρέφονται στο συνδεδεμένο με καλώδιο δίκτυο. Τα συνδεδεμένα με καλώδιο δίκτυα δεν έχουν καμία παρέμβαση μεταξύ κάθε πορείας και η αποδοτικότητα των πολλαπλών πορειών είναι μεγάλη. Για την πολλαπλών διαδρομών μετάδοση πάνω από τα ασύρματα πολύ-βηματικά δίκτυα, η αποδοτικότητα εξαρτάται από την παρέμβαση μεταξύ των πορειών. Η κυκλοφορία ενοχλείται από την παρέμβαση των RTS/CTS και πάσχει από τη συμφόρηση στα σημεία ένωσης των πορειών. Προσομοιώσαμε το CBMPR και ανακαλύψαμε στη βελτίωσή του.

Επίσης διαπιστώνεται ότι CBMPR μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη λιγότερη πολυπλοκότητα έναντι των συμβατικών πολλαπλών διαδρομών σχεδίων δρομολόγησης που απαιτεί συνήθως την μέτρηση της δύναμης των σημάτων παρέμβασης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°

### ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα προταθεί ένα νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης που ανήκει στην κατηγορία των ιεραρχικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Προορίζεται για τα αντιδραστικά δίκτυα αισθητήρων (reactive sensor networks) όπου η λειτουργία τους στηρίζεται στην αποστολή δεδομένων από τους κόμβους όχι συνεχώς αλλά μόνο μετά την ανίχνευση ενός γεγονότος. Επίσης δεδομένου ότι τα δίκτυα αισθητήρων είναι πυκνά η ανίχνευση του γεγονότος γίνεται από πολλούς κόμβους και υπάρχει δυνατότητα να μειωθεί ο πλεονασμός πριν την αποστολή των δεδομένων στον επικεφαλής συστάδας, όπως γίνεται συνήθως με τα υπάρχοντα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Σε όλα τα ιεραρχικά πρωτόκολλα που αναφέρθηκαν παραπάνω για τα δίκτυα αισθητήρων οι αλγόριθμοι δημιουργούσαν συστάδες και οι μη επικεφαλής κόμβοι προωθούσαν τα δεδομένα στον επικεφαλής της συστάδας τους όπου και γινόταν η συνάθροιση των δεδομένων πριν αποσταλούν στο σταθμό βάσης. Λαμβάνοντας όμως υπόψη ότι κατά την δημιουργία ενός γεγονότος (event) στο δίκτυο, αυτό θα ανιχνευτεί από όλους τους πλησιέστερους κόμβους και θα μπορούσε να γίνει συγχώνευση των δεδομένων με αυτά των γειτονικών κόμβων πριν αποσταλούν στον επικεφαλής της συστάδας.

Παρακάτω αναφέρονται κάποιες παραδοχές που λαμβάνονται υπόψη και το πρωτόκολλο στηρίζει την λειτουργία του.

α. Η πολυ-βηματική επικοινωνία μέσα στη συστάδα με ταυτόχρονη συγχώνευση δεδομένων αυξάνει την ομοιόμορφη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας.

Στα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης οι κόμβοι που δεν είναι επικεφαλής συστάδων ομαδοποιούνται σε συστάδες και στέλνουν τα δεδομένα στους επικεφαλής τους άμεσα. Αυτό γίνεται διότι η απόσταση μεταξύ των επικεφαλής συστάδων και των κόμβων τους είναι μικρή. Τι γίνεται όμως στην περίπτωση που το δίκτυο είναι μεγάλο σε εύρος περιοχής και οι κόμβοι αρχίζουν να σβήνουν σταδιακά; Στην περίπτωση αυτή ακόμα και η επικοινωνία μέσα στις συστάδες θα είναι αρκετά δαπανηρή. Για να εξαλειφθεί το φαινόμενο της αποστολής σε μεγάλη απόσταση, στο προτεινόμενο πρωτόκολλο η επικοινωνία που δημιουργείται μεταξύ του επικεφαλής μιας συστάδας και των κόμβων της συστάδας του είναι πολυ-βηματική. Αρχικά όταν το δίκτυο βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία με όλους τους κόμβους ενεργούς η πολυ-βηματική επικοινωνία μέσα στα πλαίσια της συστάδας δεν είναι και τόσο αναγκαία και ούτε μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους. Αυτό όμως που γίνεται είναι μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας μιας και όλοι οι κόμβοι αποστέλλουν σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους.

β. Η πολυ-βηματική επικοινωνία σε μια συστάδα θα αυξήσει την καθυστέρηση σε μικρό βαθμό μιας και ο αριθμός των κόμβων είναι μικρός.

Απ' την άλλη μια πολυ-βηματική επικοινωνία στα πλαίσια της συστάδας θα αυξήσει την καθυστέρηση γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του δικτύου μιας και η μετάδοση των δεδομένων γίνεται ασύρματα. Παρόλα αυτά επειδή η επικοινωνία στα πλαίσια της συστάδας γίνεται μεταξύ των κόμβων της συστάδας και ο αριθμός αυτός είναι συνήθως μικρός η καθυστέρηση αυτή που τυχόν θα δημιουργηθεί δεν είναι τόσο σημαντική.

γ. Η πολυ-βηματική επικοινωνία μέσα στη συστάδα μειώνει την ακτίνα εκπομπής των κόμβων και επίσης την πιθανότητα παρεμβολής, κάνοντας εφικτή τη χρήση CSMA/CA MAC πρωτοκόλλου.

Η πολυ-βηματική επικοινωνία σε μια συστάδα πραγματοποιείται για να μειωθεί η απόσταση αποστολής των δεδομένων και κατά συνέπεια η ενέργεια που καταναλώνεται για την αποστολή. Αυτό επιτυγχάνεται διότι η ενέργεια που απαιτείται για την αποστολή σε μια απόσταση είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης αυτής. Παράλληλα με την μείωση της απόστασης αποστολής των δεδομένων έχουμε και μείωση της απόστασης που ο πομπός του κόμβου μπορεί να αποστείλει τα σήματα. Μια τέτοια μείωση συνεπάγεται ότι και τα επίπεδα παρεμβολής, μιας και το μέσο μετάδοσης όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι ο αέρας, θα μειωθούν για τους κόμβους που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Μείωση της

παρεμβολής έχει σαν συνέπεια ακόμα και ένα απλό πρωτόκολλο CSMA/CA να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία. Αυτό επιτρέπει τη χρησιμοποίηση κόμβων με χαμηλό κόστος σε σχέση π.χ. με κόμβους που διαθέτουν CDMA και είναι πιο ακριβοί.

Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι το πρωτόκολλο είναι παθητικού τύπου, που σημαίνει ότι οι κόμβοι δεν αποστέλλουν συνέχεια δεδομένα αλλά μόνο όταν παρουσιαστεί ένα φαινόμενο στην περιοχή τους, η χρήση του πρωτοκόλλου CSMA/CA είναι εφικτή και δεν πρόκειται να υπάρχει μεγάλη απώλεια στα δεδομένα ή καθυστέρηση στην εκπομπή.

δ. Η πολυ-βηματική επικοινωνία μέσα στη συστάδα σε ένα πρωτόκολλο που υποστηρίζει αποστολή δεδομένων χωρίς τη χρήση TDMA αλλά με τη χρησιμοποίηση CSMA/CA MAC πρωτοκόλλου μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση.

Από την αρχή αναφέρθηκε ότι το πρωτόκολλο αυτό προορίζεται για τα reactive sensor networks (αντιδραστικά δίκτυα αισθητήρων). Αυτό σημαίνει ότι κατά την λειτουργία του δικτύου η αποστολή δεδομένων δεν γίνεται συνεχώς αλλά μόνο κατά την ανίχνευση κάποιου event και επομένως οι κόμβοι δεν έχουν να στείλουν συνεχώς δεδομένα. Στην περίπτωση αυτή η χρησιμοποίηση ενός προγράμματος TDMA δεν ενδείκνυται. Αντίθετα η χρήση ενός πρωτοκόλλου CSMA/CA μπορεί να αποτελεί μια καλή λύση. Με το πρωτόκολλο αυτό μειώνεται η καθυστέρηση που μπορεί να προκαλέσει το πρόγραμμα TDMA. Όταν ένας κόμβος έχει δεδομένα να στείλει δεν περιμένει να έρθει η σειρά του αλλά απλώς ελέγχει το μέσο εάν είναι ελεύθερο και αποστέλλει τα δεδομένα. Επειδή οι αποστάσεις αποστολής είναι μικρές η κατάληψη του μέσου από έναν κόμβο είναι μικρή. Επομένως δεν απαιτείται η μακροχρόνια αναμονή για αποστολή.

ε. Η multi-path επικοινωνία μέσα στη συστάδα εξασφαλίζει καλύτερη QoS για το πρωτόκολλο.

Ένας από τους λόγους που υπάρχει η multi-path επικοινωνία είναι για να μπορεί να προσφέρει καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών για το πρωτόκολλο. Με την multi-path επικοινωνία που δημιουργείται κατά την αρχική δημιουργία των διαδρομών εξασφαλίζεται η άμεση ανταπόκριση σε τυχόν βλάβες που θα παρουσιαστούν καθώς και η εναλλαγή των διαδρομών αποστολής δεδομένων για την καλύτερη κατανομή της ενέργειας.

## 4.1 Βήματα αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει 3 φάσεις, παρόμοιες περίπου με τις φάσεις των LEACH και TEEN. Περιλαμβάνει τη Φάση Διαφήμισης (Advertisement Phase), τη Φάση Οργάνωσης Συστάδων (Cluster Set-Up Phase) και τη Μετάδοση Δεδομένων (Data Transmission).

### 4.1.1 Φάση Διαφήμισης (Advertisement Phase)

Στη φάση διαφήμισης επιλέγονται οι επικεφαλής συστάδας, μεταδίδονται τα μηνύματα διαφήμισης και οι μη επικεφαλής κόμβοι επιλέγουν σε ποια συστάδα θα ανήκουν με βάση την δύναμη των σημάτων διαφήμισης.

Κάθε κόμβος αποφασίζει να γίνει επικεφαλής συστάδας βασισμένος στο προτεινόμενο ποσοστό των επικεφαλής συστάδας για το δίκτυο (που καθορίζεται a priori) και τον αριθμό των περιπτώσεων που ο κόμβος είναι επικεφαλής συστάδας μέχρι τώρα. Η παρούσα απόφαση λαμβάνεται από τον κόμβο  $n$  επιλέγοντας έναν τυχαίο αριθμό μεταξύ 0 και 1. Εάν ο αριθμός είναι λιγότερο από ένα κατώτατο όριο  $T(n)$ , ο κόμβος γίνεται ένα επικεφαλής συστάδας για τον τρέχοντα κύκλο. Το κατώτατο όριο τίθεται ως:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (\text{rmod } \frac{1}{p})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

όπου  $P$  = το επιθυμητό ποσοστό των επικεφαλής συστάδας (π.χ.  $P=5\%$ ),  $r$  = ο τρέχων γύρος, και  $G$  είναι το σύνολο των κόμβων που δεν έχουν γίνει επικεφαλής συστάδας τους τελευταίους  $1/P$  γύρους. Χρησιμοποιώντας αυτό το κατώτατο όριο, κάθε κόμβος θα είναι επικεφαλής

συστάδας κάποτε μέσα στους 1/P κύκλους. Κατά τη διάρκεια του γύρου 0 ( $r = 0$ ), κάθε κόμβος έχει μια πιθανότητα  $P$  να γίνει επικεφαλής συστάδας. Οι κόμβοι που είναι επικεφαλής συστάδας στο γύρο 0 δεν μπορούν να είναι επικεφαλής συστάδας για τους επόμενους 1/P γύρους. Κατά συνέπεια η πιθανότητα οι υπόλοιποι κόμβοι να είναι επικεφαλής συστάδας πρέπει να αυξηθεί, δεδομένου ότι υπάρχουν λιγότεροι κόμβοι που είναι επιλέξιμοι για να γίνουν επικεφαλής συστάδας. Η επιλογή των επικεφαλής συστάδων μπορεί να λάβει υπόψη και την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων, όπως συμβαίνει και σε νεότερες εκδόσεις του πρωτοκόλλου LEACH. Στη περίπτωση μας λαμβάνουμε τον επικεφαλής συστάδας με βάση το αρχικό LEACH μόνο και μόνο ως μέτρο σύγκρισης για το νέο πρωτόκολλο.

Κάθε κόμβος που έχει εκλεχτεί ως επικεφαλής συστάδας για τον τρέχοντα κύκλο μεταδίδει ένα μήνυμα διαφημίσεως στους υπόλοιπους κόμβους. Για αυτήν την φάση «διαφημίσεως των επικεφαλής συστάδας», οι επικεφαλής συστάδας χρησιμοποιούν ένα CSMA/CA MAC πρωτόκολλο και όλοι οι επικεφαλής συστάδας μεταδίδουν τη διαφήμισή τους χρησιμοποιώντας την μέγιστη ενέργεια. Οι μη επικεφαλής συστάδας κόμβοι έχουν τους δέκτες τους ανοιχτούς κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης οργάνωσης για να ακούσουν τις διαφημίσεις όλων των επικεφαλής συστάδας κόμβων.

Αφότου αυτή η φάση ολοκληρωθεί, κάθε μη επικεφαλής συστάδας κόμβος αποφασίζει τη συστάδα στην οποία ανήκει για αυτόν τον κύκλο. Η παρούσα απόφαση είναι βασισμένη στη λαμβανόμενη δύναμη των σημάτων διαφήμισης. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν συμμετρικά κανάλια διάδοσης, η διαφήμιση του επικεφαλής συστάδας που ακούγεται με τη μεγαλύτερη δύναμη σήματος είναι ο επικεφαλής συστάδας με τον οποίο το ελάχιστο ποσό ενέργειας απαιτείται για την επικοινωνία. Στην περίπτωση ισοπαλιών, ένας τυχαίος επικεφαλής συστάδας επιλέγεται.

#### 4.1.2 Φάση οργάνωσης συστάδων (Cluster Set-Up Phase)

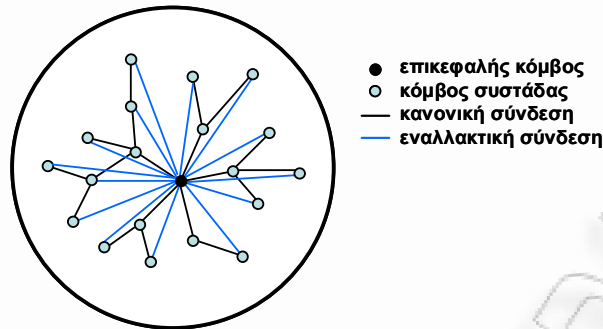
Αφού αποφασίσει κάθε κόμβος σε ποια συστάδα θα ανήκει ενημερώνει τον επικεφαλής συστάδας του χρησιμοποιώντας ένα CSMA/CA MAC πρωτόκολλο. Κατά την διάρκεια της φάσης αυτής όλοι οι επικεφαλής συστάδας πρέπει να έχουν τους δέκτες τους ανοιχτούς.

Κατά την διάρκεια της ενημέρωσης αυτής κάθε κόμβος αποστέλλει και την ένταση λήψης του επικεφαλής του, ώστε οι λοιποί γειτονικοί κόμβοι να ενημερωθούν για την ποιότητα επικοινωνίας με τον επικεφαλής. Για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας η αποστολή αυτή γίνεται με την ελάχιστη ενέργεια αποστολής που απαιτείται για να φτάσουν τον συγκεκριμένο επικεφαλής συστάδας που επέλεξαν. Η ένταση αυτή ρυθμίζεται με βάση την ένταση του σήματος λήψης από τον συγκεκριμένο επικεφαλής.

Οι μη επικεφαλής κόμβοι που λαμβάνουν τις εντάσεις των γειτονικών κόμβων ελέγχουν ποιοι από αυτούς επικοινωνούν με τον επικεφαλής συστάδας με τη λιγότερη ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εντοπίσουν γειτονικούς κόμβους που βρίσκονται πιο κοντά στον επικεφαλής συστάδας.

Οι μακρινοί κόμβοι που εντοπίζουν κάποιους γείτονες που βρίσκονται πιο κοντά στον επικεφαλής στέλνουν ένα μήνυμα σύνδεσης στους 2 που βρίσκονται πιο κοντά από όλους τους άλλους και των οποίων η ένταση του σήματος από τον επικεφαλής είναι πιο μεγάλη. Η αποστολή αυτή γίνεται με την ελάχιστη ενέργεια αποστολής που απαιτείται. Η αποστολή του μηνύματος σύνδεσης γίνεται σε 2 κόμβους για να αποφευχθούν περιπτώσεις αδυναμίας σύνδεσης με κάποιον κόμβο. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης με κανένα από τους κοντινούς κόμβους τότε διατηρείται μόνο η σύνδεση με τον επικεφαλής. Στην εικόνα 75 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της συστάδας όπου με μαύρη γραμμή είναι η κανονική σύνδεση όπου αποστέλλονται τα δεδομένα και με μπλε γραμμή είναι η εναλλακτική σύνδεση που θα αποσταλούν τα δεδομένα σε περίπτωση απώλειας της πρώτης.

Οι γειτονικοί κόμβοι που λαμβάνουν τα μηνύματα σύνδεσης τα αξιολογούν και στέλνουν ένα μήνυμα αποδοχής σύνδεσης στους κόμβους που επιθυμούν να συνδεθούν.



Εικόνα 75: Δρομολόγηση προτεινόμενου πρωτοκόλλου

#### 4.1.3 Μετάδοση Δεδομένων (Data Transmission)

Μόλις δημιουργηθούν οι συστάδες μπορεί να αρχίσει η μετάδοση δεδομένων. Οι κόμβοι που δεν λειτουργούν ως αναμεταδότες μπορεί να έχουν κλειστά τα κυκλώματα εκπομπής μέχρις ότου να καταγραφεί ένα γεγονός και να απαιτηθεί να αποσταλούν δεδομένα. Το ποσοστό αυτό των κόμβων που παραμένει με τα κυκλώματα επικοινωνίας κλειστά σε κάθε συστάδα είναι αρκετά μεγάλο. Επίσης το ποσοστό αυτό με την πάροδο του χρόνου, όπου αρχίζουν οι κόμβοι να πεθαίνουν αυξάνεται μιας και λιγότεροι κόμβοι θα λειτουργούν ως αναμεταδότες. Οι αναμεταδότες μόλις ανιχνεύσουν ένα γεγονός στην περιοχή ανίχνευσης ανιχνεύουν το γεγονός και δεν αποστέλλουν άμεσα τα δεδομένα παρά περιμένουν ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα προκειμένου να μπορέσουν οι γειτονικοί κόμβοι που ανίχνευσαν το γεγονός να αποστείλουν τα δεδομένα. Στην συνέχεια συγχωνεύουν τα δεδομένα με τα δικά τους σε ένα ενιαίο σήμα και στη συνέχεια τα αποστέλλουν στο σταθμό βάσης. Παραδείγματος χάριν, εάν τα στοιχεία είναι ακουστικά ή σεισμικά σήματα, ο επικεφαλής συστάδας κόμβος μπορεί να διαμορφώσει τα μεμονωμένα σήματα και να παράγει ένα σύνθετο σήμα. Αυτό το σύνθετο σήμα στέλνεται στο σταθμό βάσης.

Μόλις κάποιος από τους κόμβους που λειτουργούν ως αναμεταδότες αρχίσει να χάνει την ενέργειά του και φτάνει σε κρίσιμη κατάσταση τότε ο κόμβος αυτός το μόνο που θέλει να κάνει είναι να διατηρήσει την ενέργεια του για την πιθανή αποστολή δικών του στοιχείων. Επομένως στέλνει στους κόμβους που εξυπηρετεί ως αναμεταδότες ένα μήνυμα για να προωθήσουν τα δεδομένα κατευθείαν στο σταθμό βάσης μέσω της πορείας που τηρούν ως εναλλακτική.

Αυτό είναι η σταθερή κατάσταση λειτουργίας του δικτύου. Μετά από έναν ορισμένο χρόνο, που καθορίζεται a priori, ο επόμενος γύρος αρχίζει με κάθε κόμβο να καθορίζει εάν θα είναι επικεφαλής συστάδας για αυτόν τον κύκλο και τη διαφήμιση αυτών των πληροφοριών, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.7.1.1.

## 4.2 Συνοπτική περιγραφή αλγορίθμου

1. Φάση διαφήμισης
  - α. Επιλογή κόμβων επικεφαλής συστάδας.
  - β. Μετάδοση μηνύματος διαφήμισης στους υπόλοιπους κόμβους με τη χρήση CSMA/CA πρωτοκόλλου με τη μέγιστη ισχύ.
  - γ. Λήψη των διαφημίσεων από όλους τους επικεφαλής συστάδων.
  - δ. Απόφαση σε ποια συστάδα θα ανήκουν οι κόμβοι που δεν είναι επικεφαλής.
2. Φάση οργάνωσης
  - ε. Ενημέρωση του επικεφαλής συστάδας με χρήση πρωτοκόλλου CSMA/CA και αποστολή της έντασης λήψης της διαφήμισης με την ελάχιστη ενέργεια αποστολής.
  - στ. Λήψη της ενημέρωσης αυτής και από τους γειτονικούς κόμβους.
  - ζ. Εντοπισμός των 2 κόμβων που μπορούν να λειτουργήσουν ως αναμεταδότες.

- η. Σε περίπτωση εντοπισμού αποστολή μηνύματος σύνδεσης.
  - θ. Αποδοχή των συνδέσεων και αποστολή επιβεβαίωσης.
  - ι. Καταχώρηση της σύνδεσης αυτής ως κύρια διαδρομή και της σύνδεσης με το επικεφαλής συστάδας ως εναλλακτική.
3. Μετάδοση δεδομένων
- ια. Εάν υπάρχουν δεδομένα για μετάδοση αυτά αποστέλλονται μέσω της κύριας σύνδεσης.
  - ιβ. Εάν ο κόμβος είναι ένας αναμεταδότης τότε εάν ανιχνευτεί ένα γεγονός αναμονή λήψης δεδομένων από γειτονικούς κόμβους.
  - ιγ. Εάν ο κόμβος είναι αναμεταδότης και φτάσει η ενέργειά του κάτω από ένα κατώτερο όριο αποστολή μηνύματος αλλαγής σύνδεσης στους κόμβους που εξυπηρετεί.
  - ιδ. Μετά το πέρας του χρόνου σταθερής κατάστασης εκτέλεση του αλγορίθμου από την αρχή.

Στο παράρτημα παρουσιάζεται ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου αναλυτικά με τα βήματά του.

### 4.3 Πλεονεκτήματα αλγορίθμου

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή το προτεινόμενο πρωτόκολλο προορίζεται για τα αντιδραστικά δίκτυα αισθητήρων όπου η αποστολή δεδομένων γίνεται μετά την ανίχνευση ενός γεγονότος. Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης του πρωτοκόλλου αυτού με το TEEN και παρουσίασης των πλεονεκτημάτων του. Το TEEN χρησιμοποιεί έναν παρόμοιο αλγόριθμο για την ομαδοποίηση των κόμβων και την αποστολή των δεδομένων. Επιπλέον το TEEN χρησιμοποιεί τα μαλακό και σκληρό κατώτερα όρια για να μειώσει την εκπομπή δεδομένων. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει την σύγκριση η οποία γίνεται σε θεωρητικό επίπεδο και έχει σαν σκοπό να αποδείξει βασικά, την καλύτερη ομοιόμορφη κατανάλωση ενέργειας που γίνεται στο προτεινόμενο πρωτόκολλο σε σχέση με το TEEN και κατά δεύτερο λόγο την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Τα όρια που ορίζονται στο TEEN μπορούν να εφαρμοστούν και στο νέο πρωτόκολλο με κατάλληλη προσαρμογή του αλγορίθμου.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί την πολυ-βηματική επικοινωνία μέσα στο πλαίσιο της συστάδας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώσει την απόσταση αποστολής των σημάτων σε μερικούς από τους κόμβους της συστάδας και να κατανέμει την κατανάλωση της ενέργειας ομοιόμορφα στους κόμβους.

Επίσης με την πολυ-βηματική επικοινωνία γίνεται και συνάθροιση των δεδομένων κοντά στο σημείο που παρουσιάστηκε ένα event. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αποστέλλονται οι πληροφορίες στον επικεφαλής κόμβο με μικρότερο πλεονασμό.

Δεδομένου ότι κατά την δημιουργία των συνδέσεων γίνεται ανίχνευση και εύρεση και εναλλακτικής διαδρομής σε περίπτωση που η πρώτη δεν μπορεί να εφαρμοστεί αυτό αυξάνει την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) που παρέχεται από τον αλγόριθμο. Η δημιουργία της εναλλακτικής διαδρομής δεν επιβαρύνει σε μεγάλο βαθμό με την αποστολή επιπλέον πληροφορίας στο δίκτυο. Η διαφορά από το TEEN βρίσκεται στα βήματα ε, η, θ και σε περίπτωση αλλαγής της σύνδεσης με το βήμα ιγ. Στο βήμα ε η επιπλέον αποστολή είναι η ενέργεια λήψης του σήματος του επικεφαλής και γίνεται μέσα στο σήμα που αποστέλλεται, όπως και στο TEEN. Στα βήματα η, θ και ιγ τα μηνύματα είναι πολύ μικρά και η κατανάλωση ενέργειας είναι επίσης μικρή και μπορεί να αντισταθμιστεί με την QoS που παρέχουν.

### 4.4 Πολλαπλές συστάδες

Η ανάλυση του προτεινόμενου αλγορίθμου παρουσιάστηκε για μία συστάδα. Βέβαια ο παραπάνω αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί εξίσου σε όλες τις συστάδες του δικτύου. Για την επικοινωνία μεταξύ των επικεφαλής συστάδων μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υπάρχοντες αλγόριθμοι που εφαρμόζονται στα πρωτόκολλα όπως το TEEN, με τη χρήση και εκεί πολυ-βηματική επικοινωνίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

### ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

#### 5.1 Αξιολόγηση της επίδοσης των αλγορίθμων

Παρακάτω γίνεται μια αξιολόγηση των ιεραρχικών και πολλαπλών διαδρομών πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα στοχεύουν στην ομαδοποίηση των κόμβων έτσι ώστε οι επικεφαλής κόμβοι κάθε ομάδος-συστάδας να επιφορτίζονται με το ενεργειακό βάρος της αποστολής των δεδομένων στον σταθμό βάσης αφού πρώτα πραγματοποιήσουν κάποια συνάθροιση των δεδομένων για την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας. Ο σχηματισμός των κόμβων βασίζεται τυπικά στην υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων και την απόστασή τους από το σταθμό βάσης.

Το LEACH είναι ένα από τα πρώτα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα δίκτυα αισθητήρων. Σε αυτό το πρωτόκολλο οι γεινιάζοντες κόμβοι δημιουργούν δυναμικά ομάδες με έναν κατανομημένο τρόπο. Ένας κόμβος ανά τομέα επιλέγεται τυχαία για να είναι ο επικεφαλής κόμβος της ομάδας. Η εκλογή των επικεφαλής κόμβων περιστρέφεται μεταξύ των κόμβων των τομέων και είναι βασισμένη στο καθορισμένο  $\alpha$  ριθίο προτεινόμενο ποσοστό των επικεφαλής για το δίκτυο και τον αριθμό περιπτώσεων που ένας κόμβος είναι επικεφαλής μέχρι τώρα. Η ιδέα που προτάθηκε με το LEACH ήταν έμπνευση για πολλά ιεραρχικά πρωτόκολλα αργότερα, παρόλο που κάποια πρωτόκολλα αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα. Τα πλεονεκτήματα του LEACH είναι οι μικρές αποστάσεις μετάδοσης για τους περισσότερους κόμβους, τοπικός συντονισμός και συμπίεση δεδομένων και τέλος τυχαία περιστροφική εναλλαγή των επικεφαλής. Τα μειονεκτήματα του πρωτοκόλλου είναι ότι κατά την ανάθεση των επικεφαλής συστάδων δεν λαμβάνεται υπόψη η υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων, η συμπίεση δεδομένων γίνεται με απώλειες και ότι υπάρχει καθυστέρηση λόγω της χρήσης προγράμματος TDMA. Πιο σημαντικό όμως είναι να αναφερθεί ότι οι παραδοχές που λήφθηκαν για το πρωτόκολλο και αφορούν ότι όλοι οι κόμβοι μπορούν να στείλουν με αρκετή ενέργεια για να φτάσουν τον σταθμό βάσης. Επίσης θεωρείται ότι όλοι οι κόμβοι έχουν δεδομένα για αποστολή και ότι οι κοντινοί έχουν παραπλήσια δεδομένα και ότι όλοι ξεκινούν με τα ίδια αποθέματα ενέργειας, που μπορεί να μην ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Ακόμα η επιλογή των επικεφαλής δεν είναι σίγουρο ότι θα γίνει με ομοιόμορφο τρόπο και συνεπώς οι επικεφαλής μπορεί να συγκεντρώνονται σε ένα μέρος μόνο του δικτύου.

Ένα πρωτόκολλο που θεωρείται ενισχυμένος απόγονος του LEACH είναι το PEGASIS. Σε αυτό το πρωτόκολλο οι κόμβοι δεν ομαδοποιούνται. Αντιθέτως, αλυσίδες κόμβων διαμορφώνονται με έναν άπληστο τρόπο έτσι ώστε κάθε κόμβος διαβιβάζει και λαμβάνει από έναν γείτονα και τελικά ένας κόμβος επιλέγεται για να διαβιβάσει στο σταθμό βάσης. Παρόλο που, ο PEGASIS επιτυγχάνει υψηλότερη ενεργειακή απόδοση συγκρινόμενος με τον LEACH, πάσχει όμως από ορισμένα μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η υπερβολική καθυστέρηση που προκαλείται από τους απομακρυσμένους κόμβους της αλυσίδας. Μια άλλη αδυναμία του πρωτοκόλλου έχει να κάνει με το γεγονός ότι ο ενιαίος ηγέτης μπορεί να γίνει επιβραδυντικός παράγοντας για το δίκτυο.

Το ιεραρχικό-PEGASIS είναι μια βελτίωση του PEGASIS. Επιτυγχάνει μια ξεχωριστή μείωση της καθυστέρησης που υφίσταται για τα πακέτα κατά τη διάρκεια της μετάδοσης στο σταθμό βάσης με τη διευκόλυνση των ταυτόχρονων διαβιβάσεων στοιχείων. Εντούτοις, και το PEGASIS και το ιεραρχικό-PEGASIS, όπως το LEACH, είναι βασισμένα σε μερικές μη ρεαλιστικές υποθέσεις όπως αυτή ότι όλοι οι κόμβοι έχουν το ίδιο επίπεδο ενέργειας και είναι σε θέση να επικοινωνήσουν με το σταθμό βάσης άμεσα.

Το TEEN είναι ένα άλλο ευρέως διαδεδομένο και εκτενώς χρησιμοποιημένο πρωτόκολλο. Το TEEN χρησιμοποιεί ένα ιεραρχικό σχέδιο μαζί με έναν κεντρικό μηχανισμό δεδομένων. Ακριβέστερα, με τέτοιο τρόπο ώστε παρόμοια με αυτό που υιοθετείται από το LEACH, οι παρακείμενοι κόμβοι ομαδοποιούνται δυναμικά σε ομάδες. Στην αρχή κάθε περιόδου συστάδων, κάθε νέος εκλεγμένος επικεφαλής μεταδίδει, στους κόμβους τις συστάδας του, τις

τιμές δύο, σχετικά με τα ανιχνεύσιμα χαρακτηριστικά, κατώτατα όρια. Η πρώτη είναι το αποκαλούμενο σκληρό κατώτατο όριο. Είναι η ελάχιστη τιμή του ανιχνεύσιμου χαρακτηριστικού που απαιτείται για να αναγκάσει έναν κόμβο να ενεργοποιήσει τη συσκευή αποστολής σημάτων του και να διαβιβάσει στον επικεφαλής κόμβο. Η χρήση του ελαχιστοποιεί τον αριθμό μεταδόσεων. Η δεύτερη είναι το αποκαλούμενο μαλακό κατώτατο όριο. Αντιπροσωπεύει μια μικρή αλλαγή στην τιμή του ανιχνεύσιμου χαρακτηριστικού που προτρέπει τον κόμβο για να ανοίξει τη συσκευή αποστολής σημάτων της και να διαβιβάσει. Η χρήση του μειώνει περαιτέρω τον αριθμό μεταδόσεων, για το λόγο που παρουσία ελάχιστης ή καμίας αλλαγής το ανιχνεύσιμα χαρακτηριστικά οι κόμβοι αισθητήρων δεν διαβιβάζουν. Το TEEN έχει σχεδιαστεί ώστε να αντιδράσει στις ξαφνικές αλλαγές των ανιχνεύσιμων χαρακτηριστικών. Επομένως, είναι κατάλληλο για τα δίκτυα που λειτουργούν αντιδραστικά και χρονικά κρίσιμες εφαρμογές. Δεν είναι κατάλληλος όμως για τις εφαρμογές που απαιτούν περιοδικές εκθέσεις.

Το APTEEN είναι μια επέκταση του TEEN που χρησιμοποιεί ένα ιεραρχικό σχέδιο παρόμοιο με αυτό που υιοθετείται από τον TEEN. Είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο δεδομένου ότι επιτρέπει και τους παθητικούς και τους δυναμικούς τρόπους λειτουργίας. Ακριβέστερα, στον APTEEN οι κόμβοι απαιτούνται όχι μόνο για να ανταποκριθούν αμέσως στις χρονικές κρίσιμες καταστάσεις αλλά επίσης για να στείλουν περιοδικά στοιχεία. Η περιοδικότητα και οι τιμές των κατώτατων ορίων προσαρμόζονται στις ανάγκες των χρηστών και τον τύπο της εφαρμογής.

Το SHPER είναι επίσης ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο το οποίο στοχεύει στο επίτευγμα της διατήρησης της ενέργειας μέσω της χρήσης και μιας στρατηγικής ενεργειακής αποδοτικής δρομολόγησης και ενός ενεργειακής ενημέρωσης σχεδίου επιλογής διαδρομών. Αντίθετα προς άλλα ιεραρχικά πρωτόκολλα το SHPER διευκρινίζει ότι η εκλογή των επικεφαλής συστάδων δεν είναι τυχαία. Ακριβέστερα, ο κόμβος που εκλέγεται για να είναι επικεφαλής συστάδας μέσα σε κάθε συστάδα είναι αυτός που έχει τη μέγιστη υπολειπόμενη ενέργεια. Επιπλέον, η προτεινόμενη πολιτική επιλογής διαδρομών λαμβάνει υπόψη και την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων και την κατανάλωση ενέργειας για όλες τις πιθανές πορείες.

Το HEED είναι ένα πρωτόκολλο που παρουσιάζει μια αυτόνομη κατανεμημένη προσέγγιση συγκέντρωσης με αρχικούς στόχους την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου, την κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας, την ολοκλήρωση της διαδικασίας συγκέντρωσης σε σταθερό αριθμό βημάτων, την ελαχιστοποίηση των επικεφαλίδων ελέγχου και την παραγωγή καλά κατανεμημένων επικεφαλής συστάδων. Το πλεονέκτημα του HEED σε σχέση με τα πρωτόκολλα που είχαν αναπτυχθεί μέχρι τότε είναι ότι δεν κάνει οποιεσδήποτε υποθέσεις για τη κατανομή ή την πυκνότητα των κόμβων, ή για τις ικανότητες των κόμβων, π.χ., την γνώση της θέσης τους. Συγκρίνοντας το HEED με μια γενικευμένη προσέγγιση του LEACH, το πρώτο παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Οι παράμετροι του HEED, όπως η πιθανότητα ελάχιστης επιλογής και το διάστημα λειτουργίας του δικτύου, μπορούν να συντονιστούν εύκολα για να βελτιστοποιήσουν τη χρήση των πόρων σύμφωνα με την πυκνότητα του δικτύου και τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Το PEDAP είναι ένα νέο βασισμένο σε δέντρο πρωτόκολλο συνάθροισης δεδομένων που παρατείνει τη διάρκεια ζωής του τελευταίου κόμβου στο σύστημα παρέχοντας μια καλή διάρκεια ζωής για τον πρώτο κόμβο, ενώ η ενεργειακά ενήμερη έκδοσή του επιτρέπει κοντά στη βέλτιστη διάρκεια ζωής του πρώτου κόμβου αν ελαφρώς μειωθεί η διάρκεια ζωής του τελευταίου κόμβου. Ένα άλλο πλεονέκτημα των πρωτοκόλλων αυτών είναι ότι βελτιώνουν τη διάρκεια ζωής του συστήματος ακόμα κι αν ο σταθμός βάσης είναι μέσα στον τομέα, ενώ το LEACH και το PEGASIS δεν μπορούν. Τα μειονεκτήματα του αλγόριθμου είναι ότι απαιτεί την γνώση από το σταθμό βάσης της θέσης των κόμβων, την δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας των κόμβων με το σταθμό βάσης και το γεγονός ότι ο αλγόριθμος είναι συγκεντρωτικός και τον έλεγχο τον έχει ο σταθμός βάσης. Τα παραπάνω καθιστούν τον αλγόριθμο ικανό μόνο για συγκεκριμένες περιπτώσεις εφαρμογής δεδομένου ότι η γνώση της θέσης των κόμβων από το σταθμό βάσης δεν είναι πάντοτε εφικτή, ούτε και η άμεση επικοινωνία με το σταθμό βάσης. Βέβαια στις περιπτώσεις που μπορεί να εφαρμοστεί ξεπερνάει σε επιδόσεις τόσο το LEACH όσο και το PEGASIS φθάνοντας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας στο [42], σε μια σχεδόν βέλτιστη λύση.

Το self-organizing πρωτόκολλο υποστηρίζει ετερογενείς και κινητούς ή μη αισθητήρες. Κάποιοι κόμβοι παρακολουθούν το περιβάλλον και προωθούν τα πακέτα σε μια προκαθορισμένη ομάδα κόμβων που δρουν ως δρομολογητές, οι οποίοι είναι σταθεροί και



δημιουργούν την ραχοκοκαλιά της επικοινωνίας. Κάθε κόμβος μπορεί να αποκτήσει μία ταυτότητα μέσα από την διεύθυνση του δρομολογητή στον οποίο είναι συνδεδεμένος και κάποιος μπορεί να τους απευθυνθεί συγκεκριμένα. Το κόστος της διατήρησης των πινάκων δρομολόγησης και της προσπάθειας για διατήρηση μιας ισορροπημένης ιεραρχίας δρομολόγησης είναι μικρό ενώ παράλληλα η κατανάλωση ενέργειας είναι μικρότερη από αυτή του SPIN. Παρόλα αυτά το πρωτόκολλο αυτό δεν είναι reactive και επομένως εισάγει μεγάλη πληροφορία ελέγχου και επίσης μπορεί να χρειαστεί συχνή αναδιοργάνωση ολόκληρου του δικτύου όταν υπάρχουν κάποιες εσφαλμένες συνδέσεις.

Στην κατηγορία των multipath πρωτοκόλλων έχουμε τα πρωτόκολλα που υποστηρίζουν την εναλλακτική δρομολόγηση και την πλεονάζουσα δρομολόγηση. Η εναλλακτική δρομολόγηση είναι ένα σχέδιο όπου η πηγή αναζητά μια πλήρη εναλλακτική διαδρομή μετά από μια αποτυχία ενώ η πλεονάζουσα δρομολόγηση καθιερώνει τις εναλλασσόμενες πορείες προτού να συμβεί η αποτυχία. Η προληπτική δρομολόγηση μπορεί να βελτιώσει την εναλλακτική δρομολόγηση με την ανακάλυψη μιας εναλλακτικής πορείας πριν από την διακοπή της λειτουργούσας πορείας.

Το LMR είναι ένα multipath πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί μόνο την τοπική πληροφορία για να βρει τις διαδρομές που έχουν χαλάσει ή τα κενά προκειμένου να προστατεύσει τη διαδρομή που δουλεύει. Αυτό επιτυγχάνεται με την πλημμύρα του δικτύου η οποία όμως ελέγχεται από τα συνεργαζόμενα πρωτόκολλα όπως το Directed Diffusion. Λειτουργεί με τα επίπεδα πρωτόκολλα δρομολόγησης και συγκεκριμένα αυτά που είναι στοιχείο-κεντρικά. Η λειτουργία του στηρίζεται στην εκπομπή μηνυμάτων ετικέτας τα οποία προωθούνται στο δίκτυο. Οι λειτουργούντες κόμβοι δεν διαβιβάζουν τα μηνύματα ετικετών από οποιουδήποτε άλλους κόμβους. Κάθε κόμβος πρέπει να θυμηθεί όλες τις ετικέτες που έχει δει και τους σχετικοί γείτονες από τους οποίους προέρχονται. Εάν ένας κόμβος λαμβάνει πολλαπλά μηνύματα ετικετών με την ίδια αξία ετικετών από διαφορετικούς γείτονες, μόνο ο πρώτος καταγράφεται για να βρει μια κοντύτερη εφεδρική πορεία. Οι πληροφορίες ετικετών μπορούν να μειώσουν την πλεονάζουσα πληροφορία για την δρομολόγηση και την καθυστέρηση οργάνωσης εφεδρικού μονοπατιού. Εντούτοις, για να βρει τις πιθανές εναλλακτικές πορείες, το LMR υφίσταται τα γενικά έξοδα, ένα πλημμυρισμένο μήνυμα ετικετών, και μια ετικέτα ενισχύει το μήνυμα και ένα εφεδρικό διερευνητικό μήνυμα.

Το HMRP πρωτόκολλο έχει πολλές πορείες διαδοχικά επιλεγμένες σε κάθε μετάδοση για να μεταδώσει τα δεδομένα στον κόμβο προορισμού. Στο HMRP, το δίκτυο αισθητήρων κατασκευάζεται ως ένα δίκτυο με επίπεδα. Με βάση το επίπεδο, κάθε κόμβος θα βρει τους υποψήφιους γονείς του για να διαβιβάσει τα ανιχνεύσιμα δεδομένα στον κόμβο προορισμού. Με τη χρησιμοποίηση των υποψηφίων γονέων, ο κόμβος μπορεί να στείλει τα δεδομένα μέσω διαφορετικής πορείας κάθε φορά αναλαμβάνοντας εκ περιτροπής τη δρομολόγηση με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη κατανάλωση ενέργειας και την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Ο μηχανισμός συνάθροισης δεδομένων εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο εκτός από τους κόμβους φύλλα μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο.

Το πρωτόκολλο GRAB εκμεταλλεύεται το πλεονέκτημα της μεγάλης κλίμακας. Επιτυγχάνει την ευρωστία του συστήματος με τη στήριξη στις συλλογικές προσπάθειες από τους πολλαπλούς αισθητήρες χωρίς εξάρτηση σε καμία μεμονωμένη. Ένα πακέτο διαβιβάζεται πάνω από πολλαπλές πορείες, το οποίο βελτιώνει την αξιοπιστία. Η παρεμβολή τέτοιων πορειών παρέχει την ανοχή των αποτυχιών κόμβων ή των λαθών συνδέσεων κατά μήκος οποιασδήποτε μεμονωμένης πορείας, κατά συνέπεια αυξάνοντας σημαντικά την ευρωστία παράδοσης δεδομένων. Δεδομένου ότι κάθε δέκτης αποφασίζει εάν πρέπει να διαβιβάσει ένα πακέτο, ο αποστολέας δεν πρέπει να τηρήσει πληροφορίες για ποιο γείτονα να διαβιβάσει τα στοιχεία. Η αποβολή της εν λόγω κατάστασης πορειών αφαιρεί επίσης το overhead και την πολυπλοκότητα στην επισκευή των πορειών για τους αποτυχημένους κόμβους ή τις σπασμένες συνδέσεις. Ένα πακέτο ταξιδεύει απλά μέσω οποιωνδήποτε λειτουργούντων κόμβων για να φθάσει στον κόμβο προορισμού. Η πίστωση παρέχει ένα εξόγκωμα ελέγχου για να συντονίσει το βαθμό ευρωστίας και το συνολικό κόστος.

Το CBMPR πρωτόκολλο σε σχέση με τη συμβατική multipath δρομολόγηση παρουσιάζει λιγότερη παρέμβαση. Ένα άλλο ισχυρό σημείο του CBMPR είναι η απλότητά του. Κάθε πορεία στο CBMPR περνά ακριβώς μέσω των επικεφαλής των συστάδων, με συνέπεια μια απλή δρομολόγηση βήμα-προς-βήμα επιπέδου συστάδων. Αυτό καθιστά το CBMPR κατάλληλο και

απλό μειώνοντας το φορτίο του υπολογισμού της παρέμβασης που απαιτείται σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο.

Το προτεινόμενο πρωτόκολλο που παρουσιάστηκε σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιεί τόσο την ιεραρχική δρομολόγηση όσο και την multipath δρομολόγηση και συγκεκριμένα την εναλλακτική δρομολόγηση που υλοποιείται στην περίπτωση διακοπής της κύριας δρομολόγησης. Η επιβάρυνση που γίνεται από το επιπλέον overhead είναι μικρή και μπορεί να αντισταθμιστεί από τα οφέλη της εναλλακτικής πορείας. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να εφαρμοστεί και στα άλλα πρωτόκολλα ιεραρχικής δρομολόγησης αυξάνοντας την αξιοπιστία τους και πιθανώς τις επιδόσεις τους.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα πρωτόκολλα που εξετάστηκαν παραπάνω με τα χαρακτηριστικά τους.

Αλγόριθμος Χαρακτηριστικά	LEACH	PEGASIS	Hierarchical PEGASIS	TEEN	APTEEN	HEED	PEDAP	Self- organizing	SHPER	LMR	HMRP	GRAB	CBMPR	ΠΡΟΤΕΙ- ΝΟΜΕΝΟ
<b>Μέθοδος ομαδοποίησης</b>	Συστάδες	Αλυσίδα	Αλυσίδα	Συστάδες	Συστάδες	Συστάδες	Δένδρο	Συστάδες	Συστάδες	Αλυσίδα	Δένδρο	-	Συστάδες	Συστάδες
<b>Πολλαπλές διαδρομές</b>	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
<b>Συνάθροιση δεδομένων</b>	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι
<b>Κινητικότητα κόμβων</b>	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
<b>Επικάλυψη συστάδων</b>	Όχι	-	-	Όχι	Όχι	Όχι	-	Όχι	Όχι	-	-	-	Όχι	Όχι
<b>Ανοχή σε σφάλματα</b>	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
<b>Query – based</b>	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
<b>Πλεονάζουσα πληροφορία</b>	Μικρή	Μικρή	Μικρή	Μεσαία	Μεσαία	Μικρή	Μεσαία	Μικρή	Μικρή	Μεγάλη	Μικρή Τοπική	Μεγάλη	Μεσαία	Μικρή
<b>Μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας</b>	Εναλλαγή συστάδων	Εναλλαγή του επικεφαλής	Εναλλαγή του επικεφαλής	Εναλλαγή συστάδων, όρια	Εναλλαγή συστάδων, όρια	Καλή επιλογή επικεφαλής	Ελάχιστο δέντρο ανάπτυξης	Κόμβοι δρομολογητές	Εναλλαγή συστάδων	Δρομολόγηση	Ελάχιστο δέντρο ανάπτυξης	Πεδίο δαπανών	Multi hop Αποφυγή παρεμβολών	Multi hop Εναλλαγή συστάδων
<b>TDMA</b>	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
<b>Κατανεμημένος</b>	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι
<b>Ενεργητικός</b>	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Υβριδικό	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι

## 5.2 Συμπεράσματα

Στην παραπάνω εργασία έγινε μια ανασκόπηση στα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης των δικτύων αισθητήρων όσον αφορά τη δομή του δικτύου και τα πολλαπλών διαδρομών όσον αφορά την τεχνική δρομολόγησης. τα οποία παρουσιάζουν μια ιδιομορφία σε σχέση με τα αντίστοιχα πρωτόκολλα των ad-hoc δικτύων. Η ιδιομορφία τους έγκειται σε παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την σωστή λειτουργία των δικτύων αυτών. Τέτοιοι παράγοντες όπως η ανοχή σε σφάλματα, η επεκτασιμότητα, το κόστος παραγωγής, οι περιορισμοί του υλικού, το περιβάλλον ανάπτυξης, η κατανάλωση ενέργειας κλπ., λαμβάνονται υπόψη για την δημιουργία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν την πολλαπλών διαδρομών δρομολόγηση.

Επίσης, παρουσιάστηκε ένας νέος αλγόριθμος δρομολόγησης που ανήκει στην κατηγορία των ιεραρχικών πρωτοκόλλων αλλά ταυτόχρονα διαθέτει και δυνατότητες πολλαπλής δρομολόγησης αυξάνοντας έτσι την ευελιξία του δικτύου και την καλύτερη κατανομή των πόρων του.

Γενικά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων βρίσκονται ακόμα στην αρχή της εξέλιξής τους και έχουν μεγάλο ακόμα ερευνητικό πεδίο μπροστά τους. Πέραν της βέλτιστης κατανομής της ενέργειας που παίζει σημαντικό ρόλο στην βιωσιμότητα του δικτύου υπάρχουν και άλλοι παράγοντες όπως η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών, η δυνατότητα ανάκαμψης μετά από βλάβη, η ασφάλεια των δεδομένων κλπ, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη περισσότερο έτσι ώστε να αναπτυχθούν πρωτόκολλα δρομολόγησης με καλύτερες υπηρεσίες και για μια μεγαλύτερη γκάμα εφαρμογών.

**BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] G.J Pottie and W.J Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors", Communications of Theach, vol.43, no.5, May 2000, pp.51-58.
- [2] "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols", Mobicom'98, Dallas, Texas, Oct. 1998, pp.85-97.
- [3] C. Schurgers, M.B. Srivastava, "Energy efficient routing in wireless sensor networks", The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, McLean, VA, 2001.
- [4] Pearlman, M., Haas, Z., "Improving the Performance of Query-Based Routing Protocols through 'Diversity-Injection'", WCNC'99, New Orleans, LA, Sept. 1999, pp. 1546-1550.
- [5] L. Subramanian, R.H. Katz, "An architecture for building self configurable systems", Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Boston, MA, Aug. 2000.
- [6] F. Ye et al., "A two-tier data dissemination model for large scale wireless sensor networks", Proceedings of Mobicom '02, Atlanta, GA, Sept., 2002.
- [7] S. Tilak et al., "A taxonomy of wireless micro sensors or network models", Mobile Computing and Communications Review, vol. 6, no.2, 2002, pp.28-36.
- [8] M. Younis, M. Youssef, K. Arisha, "Energy-aware routing in cluster-based sensor networks", Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS2002), Fort Worth, TX, Oct. 2002.
- [9] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, "TEEN: a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks", Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, Apr. 2001.
- [10] J. Al-Karaki, A. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey", IEEE Wireless Communications, Dec 2004, pp.6-28.
- [11] W. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks", Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99), Seattle, WA, Aug. 1999, pp.174 - 185.
- [12] D. Braginsky, D. Estrin, "Rumor routing algorithm for sensor networks", Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, Oct 2002.
- [13] C. Schurgers, M.B. Srivastava, "Energy efficient routing in wireless sensor networks", The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, McLean, VA, 2001.
- [14] M. Chu, H. Haussecker, F. Zhao, "Scalable information driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks", The International Journal of High Performance Computing Applications, vol.16 no.3, 2002 pp. 293 - 313.
- [15] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks", Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii, Jan. 2000, pp. 3005-14.
- [16] Stephanie Lindsey, Cauligi S. Raghvendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information System", Aerospace Conference Proceedings, IEEE, vol. 3, 2002.
- [17] S. Lindsey, C.S. Raghavendra, K. Sivalingam, "Data gathering in sensor networks using the energy\*delay metric", Proceedings of the IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, Apr. 2001.
- [18] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, "TEEN: a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks", Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, Apr. 2001.
- [19] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, "APTEEN: a hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks", Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile computing, Ft. Lauderdale, FL, Apr. 2002.

- [20] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing", Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01), Rome, Italy, Jul 2001.
- [21] V. Rodoplu, T.H. Ming, "Minimum energy mobile wireless networks", IEEE Journal of Selected Areas in Communications vol.17, no.8, 1999, pp.1333–1344.
- [22] L. Li, J. Y Halpern, "Minimum energy mobile wireless networks revisited", Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'01), Helsinki, Finland, Jun 2001.
- [23] G. Finn, "Routing and addressing problems in large metropolitan-scale internetworks", University of Southern California, Tech. Rep. ISI Research Report ISI, 198,7 pp.87- 180.
- [24] S. Chakrabarti and A. Mishra, "Qos issues in ad hoc wireless networks", IEEE Communications Magazine, Feb. 2002.
- [25] D. Johnson, "Routing in ad hoc networks of mobile hosts", Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, Dec. 1995.
- [26] D. Johnson and D. Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks", 1996.
- [27] X. Hou, D. Tipper, J. Kabara "Label-based Multipath Routing (LMR) in Wireless Sensor Networks".
- [28] C. E. Perkins and E. M. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing," Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999.
- [29] T. Goff, N. B. Abu-ghazaleh, d. S. Phatak, and R. Kahvecioglu, "Preemptive routing in ad hoc networks", Proceeding Of ACM SIGMOBILE, Jul. 2001.
- [30] M. Spohn and J. Garcia-Luna-Aceves, "Neighborhood aware source routing", Proceeding Of ACM MOBIHOC, 2001.
- [31] K. Sohrabi and J. Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network," IEEE Pers. Commun., vol.7, no.5, 2000, pp. 16–27.
- [32] T. He et al., "SPEED: A Stateless Protocol for Real-time Communication in Sensor Networks," Proc. Int'l. Conf. Distrib. Comp. Sys., Providence, RI, May 2003.
- [33] Fan Xiangning, Song Yulin. "Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network", 2007.
- [34] V. Loscri, G. Morabito and S. Marano. "A Two-Level Hierarchy for Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy", Vehicular Technology Conference, 2005.
- [35] Dissertation, Hang Zhou, Zhe Jiang and Mo Xiaoyan, "Study and Design on Cluster Routing Protocols of Wireless Sensor Networks", 2006.
- [36] W. B. Heinzelman et al., "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks", IEEE Transactions on wireless communications, 2002.
- [37] M. Bani Yassein, A. Al-zou'bi, Y. Khamayseh, W. Mardini "Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network (VLEACH)" International Journal of Digital Content Technology and its Applications vol.3,no.2, Jun. 2009.
- [38] Sung-Min Jung, Young-Ju Han, Tai-Myoung Chung, "The Concentric Clustering Scheme for Efficient Energy Consumption in the Pegasus", The 9th International Conference on Advanced Communication Technology, vol. 1, Feb. 2007, pp. 260-265.
- [39] Jung-Eun Lee, Keecheon Kim, "Diamond-Shaped Routing Method for Reliable Data Transmission in Wireless Sensor Networks", IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications, 2008, pp.799-801.
- [40] Nahdia Tabassum, Quazi Ehsanul Kabir Mamun and Yoshiyori Urano, "COSEN: A Chain Oriented Sensor Network for Efficient Data Collection", Third International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG'06), 2006, pp. 262-267.
- [41] O. Younis and S. Fahmy, "Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: a hybrid, energy-efficient approach", IEEE Infocom 2004, Hong Kong, Mar. 2004.
- [42] Hüseyin Özgür Tan and Ibrahim Körpeoglu, "Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks", Proc. ACM Conf. on SIGMOD, San Diego, CA, 2003, vol. 32, pp. 66 – 71.
- [43] D. Kandris, P. Tsioumas, A. Tzes, G. Nikolakopoulos, D. Vergados "Power Conservation through Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks", Sensors, Sep 2009, pp.7320-7342.
- [44] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks", Proceeding Of ACM MOBICOM, 2000.
- [45] J. W. Surballe, "Disjoint paths in a network, networks," no. 4, 1974, pp. 125–145.

- [46] W. D. Grover, "Distributed Restoration of the Transport Network", Telecommunications Networks Management in the 21st Century, Techniques, Standards, Technologies and Applications. IEEE Press, 1994.
- [47] Y-H. Wang, C-H. Tsai and H-J. Mao "HMRP: Hierarchy-Based Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", Tamkang Journal of Science and Engineering, vol.9, no.3, 2006, pp. 255 – 264.
- [48] F. YE, G. ZHONG, S. LU, L. ZHANG, "GRAdient Broadcast: A Robust Data Delivery Protocol for Large Scale Sensor Networks in Wireless Networks" vol.11, 2005, 285–298.
- [49] F.Ye,A. Chen, S. Lu and L. Zhang, "A scalable solution to minimum cost forwarding in large scale sensor networks", The Tenth International Conference on Computer Communications and Networks, 2001.
- [50] F. Ye, S. Lu and L. Zhang, "GRAdient broadcast: A robust, long-lived large sensor network" (2001) <http://irl.cs.ucla.edu/papers/grabtech-report.ps>.
- [51] J. Zhang, C. K. Jeong, G. Y. Lee, H. J. Kim, "Cluster-based Multi-path Routing Algorithm for Multi-hop Wireless Network", International Journal of Future Generation Communication and Networking.
- [52] Chuan-Ching Sue and Ren-Jie Chiou, "Hybrid Multipath Routing in Mobile ad hoc Networks", IEEE 12th Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, 2006.

## ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ INTERNET

- [1i] [http://research.cens.ucla.edu/projects/2006/Systems\\_Infrastructure/Mote/default.htm](http://research.cens.ucla.edu/projects/2006/Systems_Infrastructure/Mote/default.htm)
- [2i] [http://csc.lsu.edu/sensor\\_web/facilities.html](http://csc.lsu.edu/sensor_web/facilities.html)
- [3i] [www.physorg.com/news161427981.html](http://www.physorg.com/news161427981.html)
- [4i] [http://www.pirellilabs.com/web/material\\_innovation/network\\_application/distributed\\_sensors\\_network/traffic\\_sensors/default.page](http://www.pirellilabs.com/web/material_innovation/network_application/distributed_sensors_network/traffic_sensors/default.page)
- [5i] [http://www.ece.osu.edu/~ekici/res\\_wmsn.html](http://www.ece.osu.edu/~ekici/res_wmsn.html)
- [6i] <http://fiji.eecs.harvard.edu/Volcano>
- [7i] <http://blog.xbow.com/xblog/2007/10/worlds-largest-.html>
- [8i] [esd.sci.univr.it/pages/it/tutorial-MICRO41.html](http://esd.sci.univr.it/pages/it/tutorial-MICRO41.html)
- [9i] <http://webhosting.devshed.com/c/a/Web-Hosting-Articles/Wireless-Sensor-Networks-pt-1-Introduction/1/>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ



**Ψευδοκώδικας αλγορίθμου****//Φάση Διαφήμισης**

P = το επιθυμητό ποσοστό των επικεφαλής συστάδας (π.χ. P=5%)

r = ο τρέχον γύρος

G = σύνολο των κόμβων που δεν έχουν γίνει επικεφαλής συστάδας τους τελευταίους 1/P γύρους

A[k][i] = Λαμβανόμενη δύναμη των σημάτων διαφήμισης που στέλνει ο κόμβος k στον κόμβο i

ΑΡΧΗ

ΓΙΑ I ΑΠΟ 1 ΜΕΧΡΙ G

ΑΝ  $T(n) < P/(1-P*(r \bmod 1/P))$  ΤΟΤΕ

Κόμβος A = κόμβος επικεφαλής συστάδας

ΣΤΕΙΛΕ ΜΗΝΥΜΑ ΔΙΑΦΗΜΙΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΙΠΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΜΕ

ΤΗ ΧΡΗΣΗ CSMA/CA();

ΤΕΛΟΣ\_ΑΝ

ΤΕΛΟΣ\_ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ

ΑΝ Κόμβος A = Μη Επικεφαλής Συστάδας ΤΟΤΕ

ΑΝ  $A[k][i] \geq A[n][i]$  ΤΟΤΕ

ο Κόμβος A είναι στην συστάδα με κόμβο επικεφαλής τον k

ΑΛΛΙΩΣ

ο Κόμβος A είναι στην συστάδα με κόμβο επικεφαλής τον n

ΤΕΛΟΣ\_ΑΝ

ΤΕΛΟΣ\_ΑΝ

**//Φάση Οργάνωσης**

ΕΝΗΜΕΡΩΣΕ το A[k][i];

ΓΙΑ I ΑΠΟ 1 ΜΕΧΡΙ N

ΓΙΑ I ΑΠΟ 1 ΜΕΧΡΙ 2

ΑΝ k = Μη Επικεφαλής Συστάδας και  $A[k][i] > A[n][i]$

Κόμβος k = κόμβος που μπορεί να λειτουργήσει σας αναμεταδότης

ΤΕΛΟΣ\_ΑΝ

ΤΕΛΟΣ\_ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ

ΤΕΛΟΣ\_ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ

**//Μετάδοση Δεδομένων**

ΑΠΟΣΤΟΛΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ();

ΑΝ n = κόμβος αναμεταδότης ΤΟΤΕ

εάν ανιχνευτεί ένα γεγονός αναμονή λήψης δεδομένων από γειτονικούς κόμβους

ΤΕΛΟΣ\_ΑΝ

ΑΝ n = κόμβος αναμεταδότης και  $A[n][i] < A[k][i]$

Αλλαγή σύνδεσης στους κόμβους που εξυπηρετεί

ΤΕΛΟΣ\_ΑΝ

ΤΕΛΟΣ\_ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ