

University of Macedonia  
Master in Information Systems  
Computer Networks  
Professor: A. A. Economides

# Classification and Comparison of Energy-Efficient Routing Algorithms in Wireless Networks

---

*Zinovia I. Alepidou*

*(mis131)*

Thessaloniki, 9-1-2014

Πανεπιστήμιο Μακεδονίας  
ΔΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα  
Δίκτυα Υπολογιστών  
Καθηγητής: Α.Α. Οικονομίδης

# Ταξινόμηση και Σύγκριση Ενεργειακά Αποδοτικών Αλγόριθμων Δρομολόγησης σε Ασύρματα Δίκτυα

---

*Ζηνοβία Ι. Αλεπίδου*

*(mis131)*

## Summary

Wireless networks comprise a fast developing research area with a vast spectrum of applications. In this paper we present energy efficient routing algorithms that intend to decrease the energy consumption, especially in case of ad-hoc and wireless sensor networks. The greatest challenge manifesting itself in the design of wireless ad-hoc networks is the limited availability of the energy resources. These resources are quite significantly limited in wireless networks than in wired networks. Hence, because energy efficiency is critical to energy constrained networks, energy saving becomes one of the main aims of routing algorithms. Energy efficiency is a key aspect in wireless sensor networks, as well, as it has a major impact on improving the load balancing and increasing the network lifetime. Thus, the research of the wireless sensor networks has garnered increasing attention, given its technical importance in widespread applications, such as monitoring and surveillance in the military, civil industries, home automation and traffic control fields. A number of research efforts have been paid to study how to design energy-efficient routing algorithms while guaranteeing the desired Quality-of-Service requirements. Some of these algorithms are classified and compared in the following chapters.

## Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν μία αναπτυσσόμενη περιοχή έρευνας με ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών. Στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζουμε ενεργειακά αποδοτικούς αλγόριθμους δρομολόγησης που στοχεύουν στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ειδικά στις περιπτώσεις των ασύρματων ad-hoc δικτύων και των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Η μεγαλύτερη πρόκληση στη φάση του σχεδιασμού ενός ασύρματου δικτύου είναι η περιορισμένη διαθέσιμη ενέργεια που μπορεί να υποστηρίξει την λειτουργία του. Οι πηγές τροφοδοσίας στα ασύρματα δίκτυα είναι σαφώς λιγότερες σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα. Για το λόγο αυτό, επειδή η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στα δίκτυα που στερούνται ενεργειακών πόρων, η εξοικονόμηση ενέργειας ανάγεται σε έναν από τους κύριους στόχους στους αλγόριθμους δρομολόγησης. Η ενεργειακή αποδοτικότητα έχει ιδιαίτερη σημασία και στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την βελτίωση του κατανομής του όγκου των δεδομένων στους κόμβους του δικτύου και την αύξηση του χρόνου της βιωσιμότητάς του. Συνεπώς, η έρευνα γύρω από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον, καθώς τα δίκτυα αυτά συναντώνται σε πληθώρα εφαρμογών όπως στην παρακολούθηση και την ανίχνευση εισβολέων σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις, στην αστική βιομηχανία, σε οικιακούς αυτοματισμούς και στον έλεγχο της οδικής κυκλοφορίας. Μεγάλα χρηματικά ποσά έχουν δαπανηθεί προκειμένου να αναπτυχθούν ενεργειακά αποδοτικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης που ταυτόχρονα πληρούν τα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Κάποιοι από αυτούς τους αλγόριθμους ταξινομούνται και συγκρίνονται στα παρακάτω κεφάλαια.

## Table of Contents

1.	Introduction .....	5
2.	Energy Efficient Routing Algorithms .....	6
	Ad-hoc Networks .....	8
	Wireless Sensor Networks .....	10
3.	Conclusion .....	14
	References .....	15

## Πίνακας Περιεχομένων

1.	Εισαγωγή.....	5
2.	Ενεργειακά Αποδοτικοί Αλγόριθμοι Δρομολόγησης .....	6
	Ad-hoc Δίκτυα .....	8
	Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων .....	10
3.	Συμπεράσματα .....	14
	Βιβλιογραφία .....	15

## 1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την επιστημονική κοινότητα παρουσιάζουν τα κινητά ασύρματα δίκτυα (mobile wireless networks). Τα δίκτυα αυτά απαρτίζονται από κινητούς κόμβους, οι οποίοι δεν συνδέονται απευθείας μεταξύ τους μέσω κάποιου υλικού αγωγού. Σε αντίθεση με τα κλασικά ενσύρματα δίκτυα, περιορισμοί όπως η κινητικότητα των κόμβων, το κοινό κανάλι μετάδοσης, το πρόβλημα των κρυμμένων και εκτεθειμένων τερματικών (hidden and exposed terminal problem) [25], [24], καθώς και η προκαθορισμένη διαθεσιμότητα πόρων, όπως το εύρος ζώνης (bandwidth) και η ενέργεια τροφοδότησης των κόμβων μειώνουν το φάσμα εφαρμογών των ασύρματων κινητών δικτύων.

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την βιωσιμότητα των ασύρματων δικτύων. Σε πολλές περιπτώσεις, όπως τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSNs) που αναφέρονται στη συνέχεια, οι κόμβοι του δικτύου τροφοδοτούνται από μπαταρίες, συνεπώς η ενεργειακή απόδοση των αλγορίθμων δρομολόγησης επηρεάζει την συνδεσιμότητα ολόκληρου του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, ακόμα και στις περιπτώσεις όπου οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι με πηγές αδιάλειπτης ηλεκτρικής τροφοδότησης (π.χ. πρίζες), εξαιτίας παρεμβολών είναι πιθανό να δαπανούνται μεγάλα ποσά ενέργειας, ώστε να διατηρηθεί η αναγκαία ισχύς των μεταδιδόμενων σημάτων προκειμένου να μην μειωθεί η συνολική απόδοση του δικτύου. Έτσι, εύκολα διαπιστώνουμε ότι η ενεργειακή απόδοση σε ένα ασύρματο δίκτυο συνδέεται άμεσα με το προσδόκιμο χρόνο ζωής του δικτύου, όπως και με τον όγκο των δεδομένων που διακινούνται.

Τα ασύρματα ad-hoc δίκτυα προσφέρουν μια ποικιλία υπηρεσιών εκπληρώνοντας κάθε φορά διαφορετικά κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας (Quality-of-Service QoS). Δεδομένου ότι οι δύο κύριοι πόροι των ασύρματων δικτύων, δηλαδή το εύρος ζώνης και η ενέργεια έχουν περιορισμένη διαθεσιμότητα, η πρόκληση είναι ο σχεδιασμός των δικτύων να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε η αναμενόμενη ποιότητα υπηρεσίας να προσφέρεται στους χρήστες χρησιμοποιώντας τους παραπάνω πόρους με τον πλέον αποδοτικό τρόπο.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελέτης όσον αφορά τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Πρόκειται για μία τεχνολογία δικτύου με μεγάλο φάσμα εφαρμογών, όπως τα συστήματα προειδοποίησης καταστροφών, παρακολούθησης περιβαλλοντικών συνθηκών, υγείας, προστασίας, παρακολούθησης, ανίχνευσης εισβολέων, καθώς και τα αμυντικά συστήματα αναγνώρισης. Σε αυτά τα συστήματα υπάρχουν συγκεκριμένοι κόμβοι, οι οποίοι ονομάζονται κόμβοι αναμετάδοσης (relay nodes) και είναι υπεύθυνοι για την μετάδοση των δεδομένων που συγκεντρώνουν στους σταθμούς βάσεις (base stations), ώστε να γίνει η τελική τους επεξεργασία. Μειώνοντας, λοιπόν, την κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους αναμετάδοσης επεκτείνουμε την διάρκεια ζωής και την γεωγραφική κάλυψη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

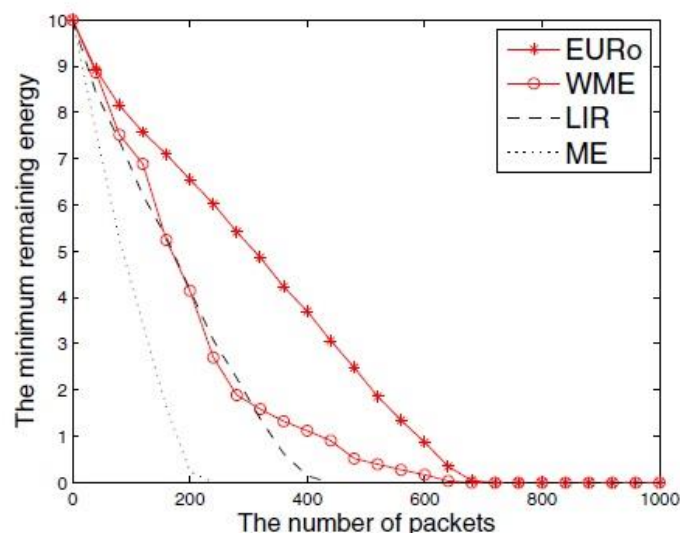
Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιοι ενεργειακά αποδοτικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης που επικρατούν αυτή τη στιγμή στη βιβλιογραφία. Επιπλέον, γίνεται μια προσπάθεια οι αλγόριθμοι αυτοί να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους και να συγκριθούν, ώστε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα για την συνολική τους απόδοση.

## 2. Ενεργειακά Αποδοτικοί Αλγόριθμοι Δρομολόγησης

Το θέμα της εξοικονόμησης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα απασχολεί ιδιαίτερος την επιστημονική κοινότητα. Συνεχής έρευνα και εκτενείς δημοσιεύσεις προσπαθούν να καλύψουν το κενό που υπάρχει, όσον αφορά το χάσμα ανάμεσα στην απόδοση των σύγχρονων αλγορίθμων δρομολόγησης και την ενεργειακή τους κατανάλωση. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στα Ad-hoc δίκτυα και ειδικότερα στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, τα οποία αναλύονται στην συνέχεια της παρούσας αναφοράς.

Αρχικά, στο [10] οι S. Kwon και N. Shroff διαπιστώνουν πόσο σημαντική είναι η κατανάλωση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα και προτείνουν έναν αλγόριθμο δρομολόγησης ο οποίος λαμβάνει υπόψη τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά των ασύρματων συστημάτων: την παρεμβολή (interference), την εναπομένουσα ενέργεια (residual energy), την ισχύ μετάδοσης (transmission power) και την αναπλήρωση ενέργειας (energy replenishment). Με βάση τους παραπάνω παράγοντες, αναπτύσσεται ένας ενεργειακά αποδοτικός και εύκολα υλοποιήσιμος αλγόριθμος, ο οποίος μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα με το περιβάλλον όπου εφαρμόζεται. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται EURo (Energy-efficient Unified Routing algorithm) και λειτουργεί ως εξής: κάθε κόμβος εξετάζει δύο παραμέτρους πριν εξυπηρετήσει την εισερχόμενη ροή, την ενέργεια της μπαταρίας συνυπολογίζοντας και την διαθέσιμη αναπλήρωση ενέργειας, καθώς και την ισχύ της μετάδοσης. Αν κρίνει με βάση αυτά τα κριτήρια ότι δεν μπορεί να εξυπηρετήσει την εισερχόμενη ροή, την απορρίπτει.

Η επιρροή των παραγόντων αυτών στην ενεργειακή απόδοση των ασύρματων δικτύων έχει μελετηθεί και στο παρελθόν. Οι μελέτες αυτές, όμως, περιορίστηκαν στην μεμονωμένη επίδραση κάθε παράγοντα στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Για παράδειγμα, στα [9] και [15] αναπτύσσονται ενεργειακά αποδοτικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης, οι οποίοι αναζητούν τις διαδρομές εκείνες σε ένα ασύρματο δίκτυο με την μικρότερη δαπάνη ενέργειας (Minimum Energy – ME routes). Δεν λαμβάνονται, όμως, υπόψη για τον εντοπισμό τους οι παρεμβολές με άλλες συνδέσεις του δικτύου, ούτε η ενέργεια των μπαταριών που τροφοδοτούν το δίκτυο. Αντίστοιχα, οι αλγόριθμοι Least-Interference Routing (LIR) [20], [28] σχεδιάστηκαν ώστε να ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές που προκαλούνται από μια μετάδοση, ενώ ο αλγόριθμος Weighted Minimum Energy (WME) [12] αδιαφορεί για τις παρεμβολές μεταξύ των ενεργών συνδέσεων.



Εικόνα 1: Η ελάχιστη εναπομένουσα ενέργεια σε

σχέση με τον αριθμό των εισερχόμενων πακέτων όταν υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ των ενεργών συνδέσεων

Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται η ελάχιστη ενέργεια των κόμβων του δικτύου μετά από κάθε μετάδοση. Είναι φανερό ότι ο EURo είναι ο πιο αποδοτικός αλγόριθμος, καθώς συνυπολογίζει τόσο τις παρεμβολές ανάμεσα στις ενεργές συνδέσεις, όσο και την εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων.

Σε μια άλλη εργασία [22], οι συγγραφείς συγκρίνουν και αξιολογούν αλγόριθμους δρομολόγησης που χρησιμοποιούν έναν μηχανισμό συνεργατικής επικοινωνίας (Cooperative Communication), ο οποίος εκμεταλλεύεται την χωρική ποικιλομορφία με σκοπό την βελτίωση της ασύρματης μετάδοσης. Η συνεργατική επικοινωνία βασίζεται στα συστήματα Multi-Input-Multi-Output (MIMO) [27], τα οποία χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραιές τόσο στον δέκτη όσο και στον πομπό, ώστε να βελτιώνεται η απόδοση της επικοινωνίας.

Η βασική λειτουργία της συνεργατικής επικοινωνίας ακολουθεί τρία βήματα: Αρχικά, κατασκευάζεται μια διαδρομή ανάμεσα στην πηγή (source) και τον προορισμό (destination), χρησιμοποιώντας κάποιον από τους διαδεδομένους αλγόριθμους δρομολόγησης. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται μια πολιτική αναμετάδοσης (relay) σύμφωνα με την οποία επιλέγονται οι κόμβοι που θα λειτουργήσουν σαν διαβιβαστές (forwarders) σε κάθε στάδιο της μετάδοσης. Ουσιαστικά, η πολιτική αναμετάδοσης του κάθε αλγορίθμου προσδιορίζει και την ενεργειακή του απόδοση. Τέλος, κατανέμεται η αναγκαία ισχύς σε κάθε κόμβο που θα λάβει μέρος στην μετάδοση.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας συνοψίζονται στην Εικόνα 2.

Scheme	Pros	Cons
CAN-L	The process of route construction and relay selection is implemented easily.	The optimal cooperative route construction does not consider the diversity gain. Not all $L$ nodes have direct links with next hop on the path.
MTE-L	The relay selection is simple.	Same as CAN-L.
CSP	By taking advantage of the cooperative diversity when building route, it resolves the problem of CAN-L and MTE-L, where not all $L$ nodes have the direct links to next hop on the path.	The network global information is required, so this scheme is not suitable for mobile networks because the topology changes frequently.
PC-L (PC-L- $w$ )	Inherit the pros of CSP when constructing route. By increasing the size of possible relay set, it provides better chances for potential nodes to be selected as relays.	Due to parameter $w$ and $L$ playing key roles, this scheme is lack of relay number adaptation.
DCR	It obtains proper relay sets by optimizing the minimum cooperative links for each $h$ -hops node pairs. The cooperative strategy is calculated by a graph induced by the local cooperative transmission schemes.	The number of hops $h$ has the impact on performance because the link costs between each node pair vary with $h$ .
MECR	It achieves the optimal size of relay set.	The route is selected based on the global information, so it is hard to be conducted by the distributed algorithms.
CMIMO	Cluster formation is operated in distributed ways. It is proper for wireless sensor networks because the cluster members may go to sleep state after sending data to CHs. The inter-cluster transmission has flexible cooperative modes.	The communications of neighborhood discovery, cluster heads selection, intra-cluster transmission scheduling results in high overhead. The energy consumption in cluster heads is larger than that of cluster members.
CwR	Although cluster head selection is simple, the selection of cluster member considers parameters, including the link cost, residual energy of each node, and others.	Although route construction is applied in a distributed way, it has no account of diversity.
MPCR	It adopts a distributed routing algorithm and ensures the desired throughput when minimizing total transmission power. It provides flexibility of choosing point-to-point or cooperative transmission according to energy consumption.	It is only suitable for the single relay scenario and MAC protocol such as TDMA, which must be redesigned to adapt to upper layer.
CASNCP	Similar to MPCR, it has the flexible transmission mode, but route construction and relay selection are implemented easily. It reduces the number of hops by organizing the three consecutive nodes in the route to conduct cooperative communications.	Route establishment does not take the cooperative diversity into account.
MPSDF	It utilizes the MAC layer mechanisms to choose best relay. In order to guarantee that each link has the desired BER, it considers the source and relay transmission power to minimize end-to-end total power consumption.	For the energy-constrained nodes, each relay bears more burden when monitoring source-destination's link quality. Other drawbacks are similar to MPCR.

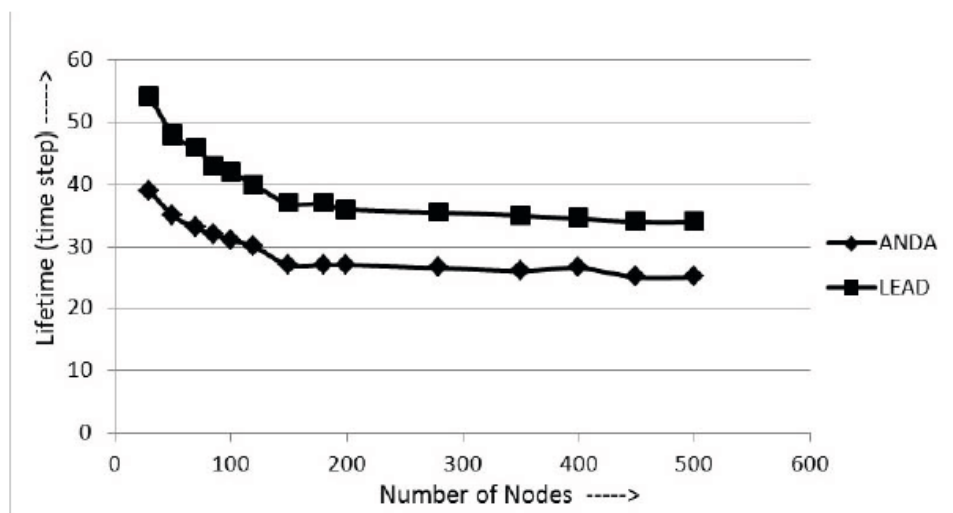
Εικόνα 2: Σύγκριση Αλγορίθμων Συνεργατικής Επικοινωνίας

## Ad-hoc Δίκτυα

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η επιστημονική κοινότητα έχει ασχοληθεί εκτενώς με την ενεργειακή απόδοση των αλγόριθμων δρομολόγησης στα ad-hoc δίκτυα [23]. Έτσι ονομάζονται τα αποκεντρωμένα ασύρματα δίκτυα, τα οποία δεν στηρίζονται σε μια υπάρχουσα υποδομή, όπως, για παράδειγμα, αυτή που δημιουργούν οι δρομολογητές (routers) στα ενσύρματα δίκτυα ή τα σημεία πρόσβασης (access points) στα κλασικά ασύρματα δίκτυα. Αντίθετα, στα ad-hoc δίκτυα κάθε κόμβος αποφασίζει σε ποιο κόμβο θα δρομολογήσει τα πακέτα δεδομένων δυναμικά, ανάλογα με την συνδεσιμότητα του δικτύου. Στη συνέχεια παρατίθενται ενεργειακά αποδοτικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης για ad-hoc δίκτυα.

Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να αποσαφηνιστεί η έννοια του συγκροτήματος (cluster). Στο [17] η ομαδοποίηση (clustering) ορίζεται ως ο σχηματισμός συνόλων που απαρτίζονται από αντικείμενα με παρεμφερή χαρακτηριστικά, με σκοπό να εντοπιστούν οι φυσικοί συσχετισμοί που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Στα συστήματα που βασίζονται στην ομαδοποίηση οι κόμβοι του δικτύου χωρίζονται σε σύνολα, σε καθένα από τα οποία ένας κόμβος γίνεται ο επικεφαλής του συγκροτήματος (cluster head). Η αρχή της λειτουργίας των δικτύων αυτών έγκειται στο ότι οι κόμβοι κάθε συγκροτήματος αποστέλλουν πακέτα δεδομένων στον επικεφαλής της κάθε ομάδας, ο οποίος με τη σειρά του επικοινωνεί με τη βάση (base station), όπου γίνεται η τελική επεξεργασία των δεδομένων.

Στηριζόμενοι στην αρχή της ομαδοποίησης, οι συγγραφείς στο [17] προτείνουν τον αλγόριθμο LEAD, ο οποίος έχει σαν στόχο την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του ad-hoc δικτύου, αναθέτοντας περιοδικά το ρόλο του επικεφαλής του συγκροτήματος (cluster head) στους κόμβους που απαρτίζουν το δίκτυο. Στην συνέχεια χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος ANDA [6] για την ανάθεση των υπόλοιπων κόμβων στους επικεφαλής των ομάδων. Η επιτυχία του LEAD στηρίζεται στο γεγονός ότι οι επικεφαλής των ομάδων ορίζονται δυναμικά σε περιοδική βάση ανάλογα με την ενεργειακή τους κατάσταση. Έτσι καταφέρνει να είναι 35% πιο αποδοτικός από τον ANDA, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Προσδόκιμο της ζωής του δικτύου σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων που το απαρτίζουν



Τα ad-hoc δίκτυα δημιουργούνται από συσκευές οι οποίες έχουν ισότιμο ρόλο στην συνδεσιμότητα του δικτύου και είναι ελεύθερες να επικοινωνούν με οποιοδήποτε κόμβο του δικτύου. Συχνά τα ad-hoc δίκτυα αναφέρονται σε ένα συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας των IEEE 802.11 ασύρματων δικτύων [23].

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [19], το πιο δημοφιλές σε επίπεδο MAC πρωτόκολλο στα ad-hoc δίκτυα είναι το IEEE 802.11. Βασίζεται στο CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoidance) πρωτόκολλο, όπου χρησιμοποιείται ο μηχανισμός μετάδοσης πακέτων RTS/CTS. Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται σε πακέτα RTS (request to send) και CTS (clear to send), ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις πακέτων (packet collisions) στο δίκτυο.

Στο [19] γίνεται μια επισκόπηση των ενεργειακά αποδοτικών multi-channel MAC πρωτοκόλλων που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία. Με την χρήση των multi-channel MAC πρωτοκόλλων είναι δυνατή η χρήση πολλαπλών κωδικών ταυτόχρονα ή η δυναμική αλλαγή από ένα κώδικα σε άλλο, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη ρυθμαπόδοση (throughput), μειωμένη πιθανότητα συγκρούσεων πακέτων και συμμόρφωση με τα κριτήρια QoS. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στην Εικόνα 4.

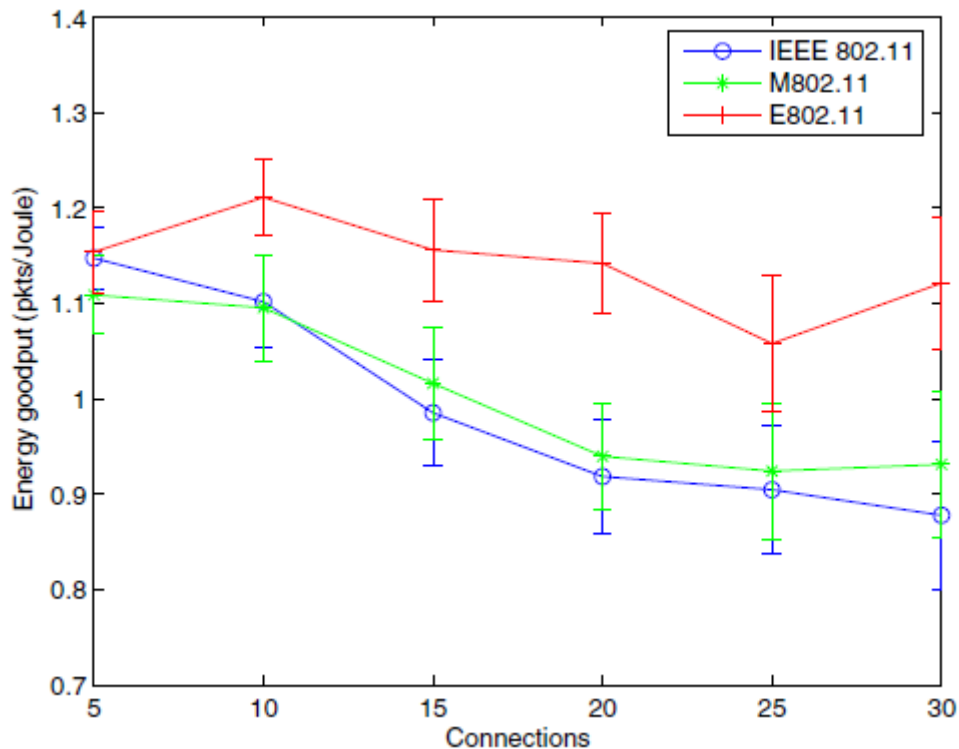
Protocol Name	Features	Hardware Requirement	Channels	Information to be stored in a node (or shared by nodes)	Advantages	Disadvantages
DRCPC	CDMA based power control	Nodes to be equipped with separate busy tone transceiver	Common Channel (cm), Data channel (cd), Broadcast Channel (cb)	Available code list(ACL), Occupied Code list(OCL), Forbidden Code list(FCL)	Decreases the collision probability/ broadcast messages and control messages	RTS,CTS overhead, a separate busy tone transceiver is needed
TMMAC	TDMA based DATIM + Broadcast support	Single half duplex transceiver per node	N data channels	CUB(Channel Usage Bimap) data structure	Per packet energy consumption is reduced. Dynamic adjustment of the ATIM window size	Extra info required, synchronization needed
TPCPC	CDMA based power control + eliminates HT,ET & near far interference	Multicode transceiver, code synchronization and GPS	1 control channel and 1 data channel with multiple code	Available Code Set	Good scalability	Code synchronization needed
DCA-PC	Channel assignment+medium access + power control	2 half duplex transceiver per node	1 control channel and n data channels	- Power information -CUL -FCL	Higher throughput than DCA.	Increase in the number of channels will lead to overload of control channel
MCBPC	power control, and minimum energy route protocol	Single transceiver per node	one dedicated control channel & N data channels	Route metric	Gives the minimum energy efficient routing path	Longer path results in more delay

Εικόνα 4: Σύγκριση των πρωτοκόλλων

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί μέτρο αξιολόγησης ενός ασύρματου IEEE 802.11 multihop ad-hoc δικτύου [30]. Το IEEE 802.11 στάνταρ που χρησιμοποιείται σε αυτού του είδους τα δίκτυα πάσχει από μεγάλα ποσοστά συγκρούσεων πακέτων, με αποτέλεσμα να καταναλώνονται ευρυζωνική χωρητικότητα και ενεργειακοί πόροι. Στο [30] το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την ανάπτυξη ενός μηχανισμού

υποχώρησης (back-off scheme) που σκοπό έχει την εξοικονόμηση ενέργειας στα ασύρματα IEEE 802.11 multihop ad-hoc δίκτυα.

Στόχος των ερευνητών είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των πακέτων που μεταδίδονται με επιτυχία ανά μονάδα ενέργειας που δαπανάται (goodput). Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται ενέργεια και βελτιώνεται η ρυθμαπόδοση του συστήματος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η ροή των δεδομένων μπορεί να αλλάζει συχνά και με απροσδόκητο τρόπο. Για να το επιτύχουν, χρησιμοποιούν έναν μηχανισμό παραπλήσιο με αυτό που παρουσιάζεται στα [16], [1] εφαρμόζοντας τις αλυσίδες Markov (Markov Chain) [26], ώστε να μοντελοποιηθεί η διαδικασία back-off σε κάθε κόμβο. Ο αλγόριθμος που προκύπτει ονομάζεται E802.11 και η απόδοσή του παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.



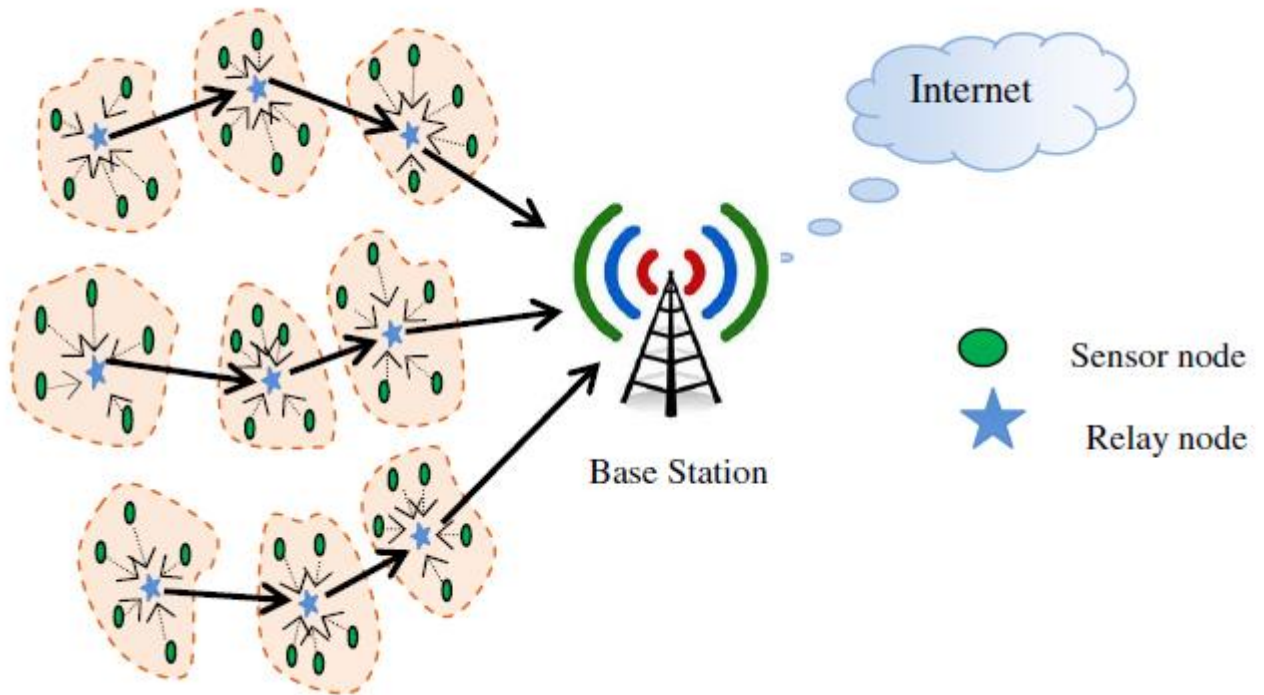
Εικόνα 5: Ο αριθμός των πακέτων που μεταδίδονται με επιτυχία ανά μονάδα ενέργειας

## Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δομούνται όπως φαίνεται στην Εικόνα 6 [7]. Το πρόβλημα των δικτύων αυτών έγκειται στην δυσκολία ανανέωσης των πηγών τροφοδότησης ενέργειας στους κόμβους, η οποία σε αρκετές περιπτώσεις οδηγεί στην πλήρη αχρηστία τους. Η κατάσταση είναι ακόμα πιο κρίσιμη στην περίπτωση του cluster head κόμβου, ο οποίος επιβαρύνεται επιπλέον με την συγκέντρωση και την δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων στο σταθμό βάσης.

Η εξοικονόμηση της ενέργειας στους cluster heads έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τη βιβλιογραφία. Προς αυτή την κατεύθυνση κινείται η έρευνα στο [29], όπου γίνεται μια προσπάθεια να αποφορτιστούν οι cluster heads με την εισαγωγή του ρόλου του διαπραγματευτή (negotiator). Προτείνεται ο αλγόριθμος NAMAC, ο οποίο βασίζεται στο multi-channel MAC πρωτόκολλο και επιστρατεύει τους διαπραγματευτές. Πρόκειται για κόμβους του δικτύου, ο ρόλος των οποίων είναι να διατηρούν ένα πρόγραμμα sleeping and communication.

Έτσι, οι διαπραγματευτές διευκολύνουν την ανάθεση των καναλιών επικοινωνίας στους ενεργούς κόμβους (communication nodes), αφήνοντας έτσι τους υπόλοιπους να μουν σε sleeping mode, εξοικονομώντας ενέργεια. Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι ο NAMAC καταναλώνει 36% λιγότερη ενέργεια, προσφέροντας ταυτόχρονα 25% μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση σε σχέση με άλλου διαδεδομένους αλγορίθμους δρομολόγησης.



Εικόνα 6: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων (Wireless Sensor Network - WSN)

Ένας ακόμα αλγόριθμος που στοχεύει στην μείωση του ποσοστού απώλειας πακέτων λόγω ενεργειακών περιορισμών είναι ο CER (Congestion-aware Energy-efficient Routing protocol) [11]. Στόχος του CER είναι η δρομολόγηση των πακέτων να γίνεται προς εκείνους τους κόμβους που πληρούν τα εξής κριτήρια: προσφέρουν το μικρότερο ενεργειακά κόστος δρομολόγησης, παρουσιάζουν μειωμένη ροή πακέτων και έχουν μεγάλα αποθέματα εναπομένουσας ενέργειας.

Επιπλέον, στην βιβλιογραφία γίνεται αναφορά σε γεωγραφικούς αλγορίθμους δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στο [5] προτείνονται οι αλγόριθμοι EEGRA (Energy Efficient Geographic Routing Algorithms). Πρόκειται για ενεργειακά αποδοτικούς γεωγραφικούς αλγορίθμους που λαμβάνουν υπόψη τρεις παράγοντες, οι οποίοι με την σειρά τους καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων: την απόσταση δρομολόγησης, τις παρεμβολές σημάτων και το υπολογιστικό κόστος της δρομολόγησης. Ο πρώτος αλγόριθμος EEGRA I συνδυάζει την παρεμβολή με το κόστος δρομολόγησης σε μια ενιαία συνάρτηση, ενώ ο δεύτερος EEGRA II αντιμετωπίζει το ζήτημα της δρομολόγησης των πακέτων σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης και προσπαθεί να το λύσει αναζητώντας το βέλτιστο διακριτό βαθμό παρεμβολής.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν 30% - 50% διατήρηση της ενέργειας των αισθητήρων σε σχέση με άλλους διαδεδομένους γεωγραφικούς αλγορίθμους δρομολόγησης.

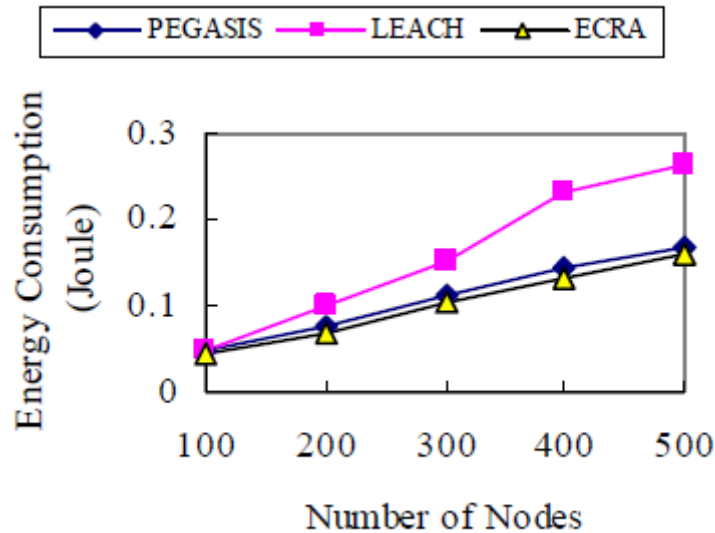
Ένας από τους πιο δημοφιλείς αλγόριθμους δρομολόγησης που βασίζεται στην αρχή της ομαδοποίησης (clustering) είναι ο LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [8]. Ο LEACH χρησιμοποιεί ένα στοχαστικό μοντέλο για να επιλέξει τους cluster heads και για να τους αναθέσει στη συνέχεια τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Όμως, η επιλογή των επικεφαλής κόμβων γίνεται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εναπομένουσα ενέργειά τους, ούτε η γεωγραφική τους θέση. Το γεγονός αυτό οδηγεί κατά συνέπεια στην αχρηστία των κόμβων και την μείωση της ζωής ολόκληρου του ασύρματου δικτύου.

Σε μια προσπάθεια να περιοριστούν οι παραλείψεις του LEACH, οι Z. Beiranvand, A. Patooghy και M. Fazeli προτείνουν τον αλγόριθμο I-LEACH [2]. Σε αντίθεση με τον LEACH, στον I-LEACH η επιλογή των cluster heads γίνεται βάσει της εναπομένουσας ενέργειας, του αριθμού των γειτονικών κόμβων και της απόστασης από το σταθμό βάσης. Στην συνέχεια, γίνεται η ομαδοποίηση των υπόλοιπων κόμβων, οι οποίοι ανατίθενται στους cluster heads με τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται το προσδόκιμο της ζωής του ασύρματου δικτύου και να ελαχιστοποιείται η εξάλειψη της ενέργειας κάθε κόμβου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι ο I-LEACH αυξάνει την συνολική απόδοση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων κατά 65%, μειώνει την συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο κατά 62% και βελτιώνει το ποσοστό της επιτυχούς παράδοσης πακέτων τουλάχιστον κατά 56% σε σχέση με τον LEACH.

Αντίστοιχα, καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον LEACH επιτυγχάνει και ο αλγόριθμος EE-SEP (Energy Efficient Stable Election Protocol) [14]. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο για να υπολογίσει την βέλτιστη πιθανότητα βάσει της οποίας ένας κόμβος πρέπει να αναλάβει το ρόλο του cluster head. Από τα αποτελέσματα της έρευνας φαίνεται ότι ο EE-SEP ενισχύει την σταθερότητα του δικτύου και αυξάνει την διάρκεια ζωής του, εφαρμόζοντας μια ενεργειακά αποδοτική διαδικασία επιλογής των cluster heads.

Ένας άλλος διαδεδομένος αλγόριθμος είναι ο PEGASIS [13]. Σε αντίθεση με τους αλγορίθμους που βασίζονται στο clustering, ο PEGASIS δημιουργεί μια αλυσίδα αισθητήρων που καταλήγει στο σταθμό βάσης. Με τον τρόπο αυτό κάθε κόμβος λαμβάνει δεδομένα από τον πλησιέστερο γείτονά του. Το αρνητικό του αλγόριθμου είναι η μεγάλη του πολυπλοκότητα που αποτρέπει την εφαρμογή του σε πραγματικές συνθήκες.

Σε μια προσπάθεια εκμετάλλευσης των πλεονεκτημάτων τόσο του clustering όσο και του PEGASIS παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ECRA (Energy-Efficient Cluster Routing Algorithm) [4]. Ο ECRA λειτουργεί σε τρία στάδια: Αρχικά δημιουργούνται οι ομάδες των κόμβων (Cluster Formation). Στη συνέχεια, σε κάθε ομάδα εφαρμόζεται μια πολιτική δρομολόγησης δέντρου, όπως αυτή που χρησιμοποιείται από τον PEGASIS (Tree Formation). Τέλος, ο επικεφαλής κόμβος κάθε ομάδας συλλέγει τα δεδομένα και τα αποστέλλει στο σταθμό βάσης (Data Transmission). Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας του ECRA σε σύγκριση με τους LEACH και PEGASIS.



Εικόνα 7: Συγκριτική Κατανάλωση Ενέργειας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι μια ιδιαίτερη περίπτωση, πιο περίπλοκη σε σχέση με τα κινητά και τα ad-hoc δίκτυα, καθώς τα αποθέματα ενέργειας στις μπαταρίες που χρησιμοποιούν οι κόμβοι είναι περιορισμένα. Ένα επιπλέον σημαντικό πρόβλημα είναι ότι κατά την μετάδοση πακέτων ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη δαπανάται ενέργεια και από τους γειτονικούς κόμβους, όταν αυτοί ανιχνεύουν την μετάδοση. Για το λόγο αυτό στο [21] αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος, οποίος αντιμετωπίζει το πρόβλημα της δρομολόγησης ως εξής: το ζητούμενο είναι να βρεθεί εκείνη η διαδρομή ανάμεσα στην πηγή και στον προορισμό, έτσι ώστε μετά την μετάδοση των πακέτων η ελάχιστη εναπομένουσα ενέργεια σε όλους τους εμπλεκόμενους κόμβους να μεγιστοποιείται.

Επιπρόσθετα, η επιστημονική κοινότητα έχει επιστρατεύσει και τους γενετικούς αλγόριθμους προκειμένου να βρεθεί η πιο ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση των πακέτων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Ο γενετικός αλγόριθμος GAR (Genetic Algorithm-based Routing) κατασκευάζει χρωμοσώματα τα οποία αναπαριστούν μια αλληλουχία κόμβων αναμετάδοσης από την αρχή μια διαδρομής δρομολόγησης μέχρι τον τελικό σταθμό βάσης. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function) ώστε σε κάθε γύρο (round) του γενετικού αλγόριθμου να μειώνεται η απόσταση που καλύπτεται από τους κόμβους αναμετάδοσης. Με την ίδια λογική, στο [18] προτείνεται ο γενετικός αλγόριθμος GA.

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι δρομολόγησης που παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής εκμεταλλεύονται τα χαρακτηριστικά του clustering. Ο αλγόριθμος EERP (Energy-Efficient data Routing Protocol) [3], αντιθέτως στοχεύει στην δημιουργία πολλαπλών διαδρομών δρομολόγησης πακέτων μέσα στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Σύμφωνα με τον EERP κάθε κόμβος περιβάλλεται από έναν αριθμό γειτονικών κόμβων μέσω των οποίων μπορεί να δρομολογήσει τα πακέτα προς τον τελικό τους προορισμό. Η απόφαση για το ποιους γειτονικούς κόμβους θα χρησιμοποιηθεί βασίζεται σε δύο παράγοντες: την κατάσταση του γειτονικού κόμβου και την συνάρτηση κόστους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πως ο EERP ελαχιστοποιεί και κατανέμει την κατανάλωση ενέργειας σε όλους τους αισθητήρες που απαρτίζουν το δίκτυο, πετυχαίνοντας έτσι εμφανή βελτίωση του χρόνου βιωσιμότητάς του.

### 3. Συμπεράσματα

Η διαδικασία της δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα, όπως αναλύθηκε παραπάνω, παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα. Πρώτον, στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα κάθε κόμβος λειτουργεί σαν δρομολογητής και προωθεί τα πακέτα προς τον τελικό του προορισμό σύμφωνα με ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης. Δεύτερον, εκ φύσεως οι ασύρματες συνδέσεις είναι λιγότερο σταθερές από τις ενσύρματες, καθώς είναι επιρρεπείς σε φαινόμενα όπως η απόσβεση των σημάτων, οι παρεμβολές και ο θόρυβος.

Επιπλέον, σημαντικό είναι το ζήτημα της εξοικονόμησης της ενέργειας τροφοδότησης, ειδικά στις περιπτώσεις των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Κάποιοι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας είναι η απόσταση δρομολόγησης, το ποσοστό των παρεμβολών και το υπολογιστικό κόστος της δρομολόγησης [5]. Το πρόβλημα, λοιπόν, της ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης μπορεί να διατυπωθεί ως η αναζήτηση της βέλτιστης διαδρομής ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη των πακέτων δεδομένων, κατά την οποία ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας.

Μία ακόμα σημαντική παρατήρηση που προκύπτει κυρίως από τα [10] και [30] είναι πως προκειμένου να υπάρχει ενεργειακή αποδοτικότητα στους αλγόριθμους δρομολόγησης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων των δικτύων. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται μεγαλύτερος αριθμός επιτυχούς μετάδοσης πακέτων ανά μονάδα ενέργειας (goodput), μικρότερες καθυστερήσεις και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για το δίκτυο. Επιπλέον, όπως επισημαίνεται και στο [2], η ενεργειακή απόδοση των ασύρματων δικτύων επηρεάζεται τόσο από την αποδοτικότητα των αλγόριθμων δρομολόγησης, όσο και από την εξισορρόπηση του όγκου των διακινούμενων δεδομένων (load balancing) ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου.

Τέλος, σύμφωνα με τους συγγραφείς του [22], είναι σημαντικό να σχεδιάζονται αλγόριθμοι δρομολόγησης που λαμβάνουν υπόψη πολλαπλές παραμέτρους ώστε να μειώνεται το συνολικό κόστος της συνεργατικής επικοινωνίας στα ασύρματα δίκτυα και να αυξάνεται το κέρδος που προσφέρεται από την ποικιλομορφία. Στην περίπτωση, λοιπόν, που τα ενεργειακά αποθέματα ενός κόμβου είναι περιορισμένα θα πρέπει να υπάρχει μια συνάρτηση κόστους, η οποία θα συνυπολογίζει παραμέτρους, όπως το κόστος της συνεργατικής σύνδεσης, την εναπομένουσα ενέργεια του κόμβου, την εισερχόμενη ισχύ, την ισχύ επεξεργασίας του κυκλώματος κ.ο.κ. με σκοπό την εύρεση της αποδοτικότερης πολιτικής αναμετάδοσης. Ταυτόχρονα, σκοπός των προτεινόμενων αλγόριθμων δρομολόγησης θα πρέπει να είναι η εύρεση του ελάχιστου αριθμού κόμβων αναμετάδοσης που θα μεγιστοποιεί το κέρδος που προκύπτει από την συνεργατική επικοινωνία.

## Βιβλιογραφία

- [1] Bianchi, G. 2000. “*Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function*”. IEEE J Sel Areas Commun 18(3):535-547
- [2] Beiranvand, Z., Patoophy, A., Fazeli, M. 2013. “*I-LEACH: An Efficient Routing Algorithm to Improve Performance & to Reduce Energy Consumption in Wireless Sensor Networks*”. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> Conference on Information and Knowledge Technology (IKT)
- [3] Boulfekhar, S., Benmohammed, M. 2013. “*A Novel Energy Efficient and Lifetime Maximization Routing Protocol in Wireless Sensor Networks*”. DOI: 10.1007/s11277-013-1081-4
- [4] Chang, B., Zhang, X. 2012. “*An Energy-Efficient Routing Algorithm for Data Gathering in Wireless Sensor Networks*”. In: Proceedings of the 2012 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference
- [5] Chen, Ts., Wei, Hs., Lee, Ch., Huang, F., Hsu, Ts., Shih, W. 2012. “*EEGRA: Energy Efficient Geographic Routing Algorithms for Wireless Sensor Network*”. In: Proceedings of the 2012 International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms and Networks
- [6] Chiasserini, C.-F., Chlamtac, I., Monti, P., Nucci, A. 2002. “*Energy Efficient Design of Wireless Ad Hoc Networks*”. In: NETWORKING 2002. LNCS, vol. 2345, pp. 376-386
- [7] Gupta, S., K., Kuila, Pr., Jana, Pr., K. 2013. “*GAR: An Energy Efficient GA-Based Routing for Wireless Sensor Networks*”. In: ICDCIT 2013, LNCS 7753, pp. 267-277
- [8] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. 2000. “*Energy-efficient routing protocols for wireless microsensor networks*”. In: Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Hawaii International Conference System Sciences (HICSS)
- [9] Hou, T., Li, V.,O.,K. 1986. “*Transmission range control in multihop packet radio transmissions*”. In: IEEE Trans. Commun., vol34, no. 1, pp. 38-44
- [10] Kwon, S., Shroff, N. 2012. “*Energy-Efficient Unified Routing Algorithm for Multi-Hop Wireless Networks*”. In: Proceedings of the IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 11, No. 11
- [11] Li, H. 2013. “*Energy-Efficient Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks*”. In: Proceedings of the International Conference on Information Engineering and Applications (IEA) 2012, Lecture Notes in Electrical Engineering 219. DOI: 10.1007/978-1-4471-4853-1\_25
- [12] Lin, L., Shroff, N., B., Srikant, R. 2007. “*Asymptotically optimal energy- aware routing for multihop wireless networks with renewable energy sources*”. IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 15, no. 5, pp. 1021-1034
- [13] Lindesey, S., Raghavendra, C., S. 2002. “*PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*”. In: Proceedings of the Aerospace IEEE Conference, vol. 3, pp. 3-1125 – 3-1130
- [14] Madhav, T., V., Sarma, N., V., S., N. 2012. “*Energy Efficient Cluster Routing Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks*”. Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunication Engineering. In: CNC 2012, LNICST 108, pp. 452-455
- [15] Melodia, T., Pompili, D., Akyildiz, I., F. 2004. “*Optimal local topology knowledge for energy efficient geographical routing in sensor networks*”. In: Proceedings of the 2004 IEEE Infocom, vol. 3, pp. 1705-1716
- [16] Minooei, H., Nojumi, H. 2001. “*Performance evaluation of a new backoff method for IEEE 802.11*”. Comput. Commun. 30:3698-3704
- [17] Mishra, S., Satpathy, S., M., Mishra, A. 2011. “*LEAD: Energy Efficient Protocol for Wireless Ad Hoc Networks*”. In: CCSIT 2011, Part II, CCIS 132, pp. 99-106

- [18] Nallusamy, R., Duraiswamy, K., Ayya Muthukumar, D., Sathiyakumar, C. 2010. “*Energy efficient dynamic shortest path routing in Wireless Ad hoc Sensor Networks using Genetic Algorithm*”. Department of Computer Science and Engineering, K.S. Rangasamy college of technology, Tiruchengode, India
- [19] Nithya, B., Alluri, A., K., Mala, C. 2011. “*Energy Efficient Multi Channel MAC Protocols for Wireless Ad Hoc Networks*”. In: NeCoM/ WeST/ WiMoN 2011, CCIS 197, pp. 358-367
- [20] Stevens, J. 1988. “*Spatial reuse through dynamic power and routing control in common-channel random-access packet radio networks*”. Ph.D. dissertation, University of Texas
- [21] Tung, N., Th. 2012. “*Heuristic Energy-Efficient Routing Solutions to Extend the Lifetime of Wireless Ad-Hoc Sensor Networks*”. In: ACIIDS 2012, Part II, LNAI 7197, pp. 487-497
- [22] Wang, Y., Yang, X., Yang, Sh., Yu, W., Bhattarai, S., Shen, D., Chen, G., 2013. “*Towards Energy-Efficient Cooperative Routing in Wireless Networks*”. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual IEEE CCNC – Green communications and Computation Track
- [23] Web Site of Wikipedia. “Ad-hoc Networks”. [http://en.wikipedia.org/wiki/Ad-hoc\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Ad-hoc_network). Last Accessed: 28-12-2013
- [24] Web Site of Wikipedia. “Exposed node problem”. [http://en.wikipedia.org/wiki/Exposed\\_node\\_problem](http://en.wikipedia.org/wiki/Exposed_node_problem). Last Accessed: 28-12-2013
- [25] Web Site of Wikipedia. “Hidden node problem”. [http://en.wikipedia.org/wiki/Hidden\\_node\\_problem](http://en.wikipedia.org/wiki/Hidden_node_problem). Last Accessed: 28-12-2013
- [26] Web Site of Wikipedia. “Markov Chain”. [http://en.wikipedia.org/wiki/Markov\\_chain](http://en.wikipedia.org/wiki/Markov_chain). Last Accessed: 27-12-2013
- [27] Web Site of Wikipedia. “MIMO”. <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>. Last Accessed: 27-12-2013
- [28] Wei, H., Ganguly, S., Izmailov, R., Hass, Z.,J. 2005. “*Interference-aware IEEE 802.16 WiMax mesh networks*”. In: Proceedings of the 2005 IEEE VTC-Spring, vol. 5, pp.3102-3106
- [29] Won, M., Yang, Ch., Zhou, W., Stoleru, R. 2013. “*Energy-efficient multi-channel media access control for dense wireless ad hoc and sensor networks*”. DOI: 10.1007/s11276-013-0549-1
- [30] Wu, Ch., Liaw Y., Leou, M., Su, H. 2011. “*An energy-efficient MAC protocol based on IEEE 802.11 in wireless ad hoc networks*”. Institut Télécom and Springer – Verlag 2011. DOI: 10.1007/s12243-011-0245-z