



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αρχιτεκτονική αύξησης βιωσιμότητας MANET με βάση ενεργειακούς περιορισμούς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

*Χρήστου Ηλία Κατσιγιάννη
Διπλωματούχου Μηχανικού Η/Υ και Πληροφορικής Πανεπιστημίου Πατρών*

Αθήνα, Μάρτιος 2010



Αρχιτεκτονική αύξησης βιωσιμότητας MANET με βάση ενεργειακούς περιορισμούς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Χρήστου Ηλία Κατσιγιάννη
Διπλωματούχου Μηχανικού Η/Υ και Πληροφορικής Πανεπιστημίου Πατρών

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Ι. Στ. Βενιέρης (επιβλέπων)

Χρ. Καψάλης

Γ. Ι. Στασινόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 22/03/2010

.....
Ι. Στ. Βενιέρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρ. Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Ι. Στασινόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δ.-Θ. Ι. Κακλαμάνη
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Μ. Ε. Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Χρ. Παπαβασιλείου
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Δ. Τσελίκας
Λέκτορας Πανεπιστημίου
Τρίπολης



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

.....
Κατσιγιάννης Ηλία Χρήστος

Διπλωματούχος Μηχανικός Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Copyright© 2010 – Κατσιγιάννης Ηλία Χρήστος , 2010

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

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



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εξελίξεις στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα επέβαλλαν την αναγκαιότητα συνδεσιμότητας του χρήστη από οποιαδήποτε θέση σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή με χρήση διαφορετικών συσκευών. Η συγκεκριμένη ιδέα οδήγησε στη δημιουργία αυτόνομων συστημάτων, των Mobile Ad hoc NETworks (MANETs) που παρέχουν ένα πλήθος εφαρμογών, συμβάλλοντας στην βελτίωση της καθημερινότητας του χρήστη. Από τα δίκτυα αισθητήρων μέχρι και τα vehicular networks τα ad hoc δίκτυα κατατάσσονται στα πιο εξελιγμένα κινητά δίκτυα δεδομένων χαμηλής κλιμάκωσης και υψηλής κινητικότητας.

Τα συγκεκριμένα δίκτυα δεν απαιτούν την ύπαρξη δικτυακής υποδομής, δίνοντας τη δυνατότητα αξιοποίησής τους σε περιπτώσεις έκτακτων αναγκών. Οι κόμβοι που συνθέτουν ένα τέτοιο δίκτυο είναι απλές συσκευές καθημερινής χρήσης, όπως κινητό τηλέφωνο, laptop, smart phone, PDAs κ.τ.λ. Τα προβλήματα που ανακύπτουν από τη χρήση τέτοιων δικτύων σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών, καθώς και με την κινητικότητα των κόμβων που οδηγεί σε συχνές τοπολογικές μεταβολές.

Στην παρούσα διατριβή μελετάται, παρουσιάζεται και αναλύεται μια αρχιτεκτονική πολλών επιπέδων για την καλύτερη διαχείριση των ενεργειακών αποθεμάτων του δικτύου. Βελτιώνεται η συμπεριφορά επιτυχημένων αλγορίθμων σε επίπεδο δρομολόγησης, αλλά και παράδοσης υπηρεσίας λαμβάνοντας υπόψη την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων.

Επεκτείνοντας τις υπάρχουσες υλοποιήσεις του πρωτοκόλλου AODV (Ad hoc On Demand distance Vector) σε πρώτο στάδιο σχεδιάζεται και υλοποιείται ένα ενεργειακό πρωτόκολλο σε επίπεδο δρομολόγησης. Επιλέγεται πάντα το κυρίαρχο ενεργειακά μονοπάτι, και με αυτόν τον τρόπο αυξάνονται οι διαθέσιμες διαδρομές και το χρονικό διάστημα επιβίωσης των ασύρματων ζεύξεων. Επιπλέον σε επίπεδο επιλογής και παράδοσης υπηρεσίας επεκτείνεται το πρωτόκολλο SLPv2 (Service Location Protocol) προκειμένου να επιλέγεται ο πιο δυνατός ενεργειακά εξυπηρετητής. Έτσι εξασφαλίζεται ότι η TCP σύνδεση μεταξύ του πελάτη και του παρόχου της υπηρεσίας, θα είναι διαθέσιμη και ενεργή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Ο συνδυασμός των βελτιστοποιήσεων στα δύο επίπεδα, οδηγούν σε αύξηση της βιωσιμότητας του δικτύου, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη διάρκεια ζωής των διαθέσιμων κόμβων.

Λέξεις κλειδιά: MANET, mobile ad hoc networks, ασύρματη ζεύξη, υπολειπόμενη ενέργεια κόμβου, μέση ενέργεια δικτύου, AODV, EAODV, EAODV_hops, SLP, RREQ, RREP, SrvRqst, SrvRply, αίτημα δρομολόγησης, ανακάλυψη υπηρεσίας, παράδοση υπηρεσίας



ABSTRACT

Advances in telecommunication systems led to the evolution of novel network architectures, that fulfill the promises of ubiquitous computing. Autonomous systems like Mobile Ad hoc NETWORKS provide many applications contributing to the improvement of people's everyday life. From sensor networks to vehicular ad hoc networks and that is the reason why these types of networks are included in the most evolved small scale data networks in highly mobile environments.

MANETs' don't require network infrastructure, and that's the reason why they are enabled for emergency situations. Nodes that compose a MANET are simple devices, like mobile phones, smart phones, PDAs, laptops etc. Problems arising from this type of devices are associated with energy consumption and mobility, leading to frequent changes in the network topology.

The present doctoral thesis describes and analyzes a multilayered architecture for the optimization of the energy resources' management. Through the proposed architecture widely used routing algorithms, as well as service discovery and delivery mechanisms, are extended in order to take into account the nodes' power savings.

Extensions of AODV (Ad hoc On Demand distance Vector) lead to the design and implementation of an energy aware routing protocol. Enabling this algorithm the most energy powerful path is selected maximizing the life of the mobile link. Concerning the service discovery and delivery, SLPv2 (Service Location Protocol) is extended in order to select the most powerful server as far as its remaining energy is concerned. In this way the TCP connection between the user and the server will be available for more time. The proposed architecture will lead in the maximization of the network lifetime through the maximization of each node's lifetime.

Keywords: mobile ad hoc networks (MANET), mobile link, remaining node's energy, average network's energy, AODV, EAODV, EAODV_hops, RREQ, RREP, SrvRqst, SrvRply, route request, service discovery, service delivery.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί το σημαντικότερο ερευνητικό προϊόν της πενταετούς σχεδόν ερευνητικής παρουσίας μου στο εργαστήριο «Ευφυών Επικοινωνιών και Δικτύων Ευρείας Ζώνης» του ΕΜΠ. Ταυτόχρονα με την ακαδημαϊκή μου πρόοδο, αναπτύχθηκα ως άνθρωπος και προσωπικότητα μέσα από τη συναναστροφή και επικοινωνία μου με τους ανθρώπους που πλαισίωσαν τη ζωή μου κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος. Τους ανθρώπους αυτούς θα ήθελα να ευχαριστήσω στη συνέχεια, αναγνωρίζοντας τη συμβολή τους στην πρόοδό μου.

Καταρχάς, αρμόζει ένα ευχαριστώ στον επιβλέποντα της διατριβής μου, καθηγητή κ. Ιάκωβο Βενιέρη για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στις δυνατότητές μου και τις προκλήσεις που μου έδωσε την ευκαιρία, αλλά και με παρότρυνε να αντιμετωπίσω. Κατάφερε πάντα να βρίσκει λύσεις στα προβλήματα για τα οποία ζήτησα τη συμβουλή του και να μου δίνει κίνητρο και παρότρυνση να συνεχίσω μπροστά. Επίσης, ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στην καθηγήτρια κ. Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη για την ενίσχυσή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου και για την πολύτιμη συμβολή της στο ερευνητικό μου έργο. Μαζί με τον επιβλέποντα καθηγητή μου υπήρξαν οι σημαντικότεροι αρωγοί στην προσπάθεια των τελευταίων πέντε ετών που κορυφώνεται με τη συγγραφή του παρόντος κειμένου. Επίσης, τους καθηγητές κ. Γεώργιο Στασινόπουλο και Χρήστο Καψάλη, που πλαισίωσαν την τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και υπήρξαν πάντα πρόθυμοι να με βοηθήσουν σε ότι χρειάστηκα. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Συμεών Παπαβασιλείου λόγω του συμβουλευτικού ρόλου του πάνω στο θέμα της διατριβής μου καθώς έχει ασχοληθεί εκτεταμένα με τα θέματα που καλύπτονται από την παρούσα διατριβή.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω το λέκτορα του Πανεπιστημίου Τρίπολης κ. Νικόλαο Τσελίκια για τη συνεργασία μας στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων, καθώς και την καθοδήγησή του σε ερευνητικά θέματα. Ευχαριστώ ιδιαίτερος τον καθηγητή κ. Μιχάλη Θεολόγου, που με τίμησε με την παρουσία του στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Πριν να αναφερθώ ξεχωριστά στα άτομα με τα οποία συνεργάστηκα στο εργαστήριο και με στήριξαν σε όλη τη διαδρομή μου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεγαλύτερο αρωγό μου σε όλη αυτή την προσπάθειά, τον ξάδερφό μου, καθηγητή στα ΤΕΙ Χαλκίδας Δρα Θοδωρή Ζαχαριάδη, για την καθοδήγηση του μέσω της επιστημονικής του κατάρτισης και της εμπειρία του ως μηχανικός.

Στην πενταετή παρουσία μου στο εργαστήριο είχα την χαρά να συνεργαστώ με μια πλειάδα ανθρώπων από τους οποίους αποκόμισα πολλά οφέλη και εμπειρίες και κάποιους εκ των οποίων έχω την τιμή να θεωρώ φίλους. Από αυτούς, ιδιαίτερη αναφορά αρμόζει στη Δήμητρα Ζαρμπούτη, το Δημήτρη Κατέρο, το Δημήτρη Τσιλιμαντό, το Γιάννη Φουκαράκη, τον Παναγιώτη Γκόννη και τη Ζέτα Καπιτσάκη. Ακόμα, τους Σωτήρη Μανιάτη, Γιώργο Πρεζεράκο, Μαρία Στριμπάκου, Βαγγέλη Κοσμάτο, Βαγγέλη Νίκα, Γιώργο Λιουδάκη, Γιώργο Λεολέη, Φώτη Γώγουλο, Χρύσα Παπαγιάννη, Γιάννη Στειακογιαννάκη, Γιώργο Λαμπρινάκο, Άννα Αντωνοκοπούλου,



Κώστα Παππά, Αζίζ Μουσά, Ευγενία Παπαγιαννακοπούλου, Μαρίζα Κουκοβίνη, Χρήστο Παππά, Νίκο Δέλλα, Θοδωρή Αθαναηλέα, Λευτέρη Κουτσολουκά και Λίλα Δημοπούλου.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ αρμόζει στο Σπύρο Γιαννακάκη για την άριστη συνεργασία μας στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής του εργασίας, η οποία σχετίζεται άμεσα με θέματα που καλύπτονται από την παρούσα διατριβή.

Σε αυτό το σημείο θέλω να αναφέρω ανθρώπους εκτός του στενού ακαδημαϊκού περιβάλλοντος που υπήρξαν έταιροι πόλοι στη ζωή μου, προσδίδοντας την απαιτούμενη ισορροπία. Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τη Νικολέττα, το Λάμπρο, το Δημήτρη, το Βαγγέλη, τον Νάσσο, τον Μπάμπη, το Σάκη, το Γιάννη, το Βασίλη, τον Πέτρο, τον Νίκο, τον Επαμεινώνδα, το Γιάννη και να ζητήσω προκαταβολικά από όποιον ξέχασα να συγχωρέσει την παράληψή μου. Είστε όλοι ξεχωριστοί. Ειδική μνημία πρέπει να γίνει στον αδερφό μου, Ανδρέα, που έζησε από κοντά, ως συγκάτοικός μου, την προσπάθεια των πέντε τελευταίων χρόνων.

Άφησα για το τέλος τη μητέρα μου, θέλοντας να την ευχαριστήσω για την αγάπη που μου χάριζε και μου χαρίζει καθημερινά και την πίστη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η πραγματοποίηση της διατριβής μου, αλλά και η γενικότερη έως τώρα πορεία μου, οφείλεται κατά ένα πολύ σημαντικό μέρος στην παρουσία της. Την ευχαριστώ θερμά, ενώ αφιερώνω την παρούσα διατριβή στον πατέρα μου.

Χρήστος Κατσιγιάννης
Αθήνα, Μάρτιος 2010



Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
Πρόλογος	7
Περιεχόμενα	9
Πίνακας Εικόνων	12
Ευρετήριο Πινάκων	14
Πίνακας Σχημάτων	16
1 Εισαγωγή	17
1.1 Χαρακτηριστικά ad hoc	19
1.2 Εφαρμογές MANETs	22
1.3 Δομή της διατριβής	23
2 Υπάρχουσα Κατάσταση	25
2.1 Ενεργειακά Θέματα	25
2.1.1 Ενεργειακή εκφόρτιση μπαταρίας ασύρματης συσκευής	29
2.1.2 Μοντελοποίηση απωλειών ενέργειας κατά τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων	31
2.1.3 Αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη τους ενέργεια σε επίπεδο δικτύου...	37
2.1.4 Πρωτόκολλα ανακάλυψης διαδρομής βάσει υπολειπόμενης ενέργειας..	43
2.1.4.1 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστης ισχύος μετάδοσης (Minimum Total Transmission Power – MTPR)	44
2.1.4.2 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστου κόστους μπαταρίας (Minimum Battery Cost Routing – MBCR)	45
2.1.4.3 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστου-μέγιστου κόστους μπαταρίας (Min-max battery cost routing – MMBCR)	46
2.1.4.4 Πρωτόκολλο δρομολόγησης με χρήση όρων μέγιστης-ελάχιστης χωρητικότητας μπαταρίας (Conditional Max-Min Battery Capacity Routing CMMBCR)	47
2.2 Ανακάλυψη υπηρεσίας (Service Discovery)	48
2.2.1 Ανακάλυψη υπηρεσίας σε MANETs	49
2.2.1.1 Bluetooth SDP	50
2.2.1.2 Konark	50
2.2.1.3 GSD	52
2.2.1.4 DEAPSpace	53
2.2.1.5 Εφαρμογή SLP σε MANETs	53
2.2.1.5.1 Περιγραφή πρωτοκόλλου	54
2.3 Cross Layer	55
2.3.1 CL_{dsr}	55
2.3.2 CL_{dsdv}	56
2.3.3 Υπολογισμός κόστους δικτύου για τις Cross-Layer υλοποιήσεις	56
2.3.4 Συμπεράσματα της υλοποίησης	56
3 Προβλήματα που εμφανίζονται στα Mobile Ad Hoc Networks και παρουσίαση προτεινόμενης αρχιτεκτονικής	57



3.1	Φαινόμενα που επηρεάζουν την τοπολογία σε ένα MANET	57
3.2	Ενεργειακή εξάντληση των κόμβων σε ένα MANET	57
3.3	Προτεινόμενη Λύση σε επίπεδο δρομολόγησης.....	59
3.4	Προτεινόμενη Λύση σε επίπεδο ανακάλυψης υπηρεσίας.....	60
4	Επίλυση του προβλήματος σε επίπεδο δικτύου	61
4.1	Εισαγωγή	61
4.2	Επιλογή πρωτοκόλλου	61
4.3	Συνοπτική παρουσίαση του AODV	62
4.4	Ανάλυση μηνυμάτων RREQ, RREP και RERR	64
4.4.1	Μορφή μηνύματος Route Request (RREQ)	65
4.4.2	Μορφή μηνύματος Route Reply (RREP)	66
4.5	Πλήρης περιγραφή λειτουργίας AODV.....	67
4.5.1	Διατήρηση των ακολουθιακών αριθμών (sequence numbers)	68
4.5.2	Εγγραφές του πίνακα δρομολόγησης και λίστες precursor	68
4.5.3	Δημιουργία Αιτημάτων Εύρεσης Διαδρομής (Route Requests).....	69
4.5.4	Έλεγχος της διανομής των μηνυμάτων αίτησης διαδρομής	70
4.5.5	Επεξεργασία και προώθηση αιτημάτων διαδρομών – Route Request. 70	
4.5.6	Δημιουργία απαντήσεων διαδρομών (Route Replies - RREP).....	72
4.5.7	Δημιουργία Route Reply από τον προορισμό.....	72
4.5.8	Δημιουργία Route Reply από ενδιάμεσο κόμβο.....	72
4.6	Ενεργειακός υπολογισμός AODV με χρήση ns-2	73
4.6.1	Παρουσίαση σεναρίων προσομοίωσης.....	76
4.7	Ενεργειακές αλλαγές – Βελτιστοποιήσεις του αλγορίθμου.....	82
4.7.1	Σενάριο λειτουργίας ενός δικτύου	83
4.7.2	Αποτελέσματα σεναρίων	87
4.8	Επιπλέον αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου	89
4.8.1	Αποτελέσματα σεναρίων	90
4.9	Σύγκριση του AODV με τις προτεινόμενες επεκτάσεις	93
4.9.1	Σύγκριση του AODV, του EAODV με τον EAODV_hops.....	99
5	Επίλυση του προβλήματος σε επίπεδο ανακάλυψης διαδρομής.....	108
5.1	Εισαγωγή	108
5.2	SLP.....	110
5.2.1	Ορολογία.....	110
5.3	Συνοπτική παρουσίαση του πρωτοκόλλου	110
5.3.1	Τα URLs που χρησιμοποιούνται στο Service Location.....	113
5.3.1.1	Ανάλυση των URL Entries	113
5.3.1.2	Χρήση των Ports, του UDP, και της Multicast εκπομπής	113
5.3.1.3	Επαναμετάδοση SLP μηνυμάτων	114
5.4	SLP Μηνύματα	114
5.4.1	Service Request.....	116
5.4.2	Service Reply	117
5.4.3	Directory Agent Advertisement.....	117
5.4.4	Service Agent Advertisement	118
5.4.5	Service Location Protocol Extensions	118
5.5	SLP ΣΕ AD HOC ΔΙΚΤΥΑ.....	119
5.5.1	Protocol Overview	120
5.5.2	URLs, χρήση των Ports, Επαναμετάδοση SLP μηνυμάτων	120



5.5.3	SLPManet Μηνύματα	120
5.6	Βελτιστοποιήσεις λειτουργίας SLP ΓΙΑ AD HOC ΔΙΚΤΥΑ.....	120
5.6.1	Προτεινόμενη Βελτιστοποίηση στο SLP	123
5.6.2	Σενάρια Δοκιμής των αλγορίθμων.....	124
5.6.3	Προσομοιώσεις του σεναρίου.....	126
5.6.4	Προσομοίωση του πρώτου σεναρίου.....	129
5.7	Αποτελέσματα SLP και ESLP	132
5.7.1	Σύγκριση SLP και ESLP χρησιμοποιώντας τον παραδοσιακό AODV	132
5.7.2	Σύγκριση SLP και ESLP χρησιμοποιώντας τον EAODV	133
5.7.3	Σύγκριση SLP και ESLP χρησιμοποιώντας τον EAODV_hops.....	134
5.8	Συμπεράσματα	135
6	Μελλοντική Δουλειά	136
7	Βιβλιογραφία	137



Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Ετερογενές δίκτυο κινητών συσκευών.....	18
Εικόνα 2: Δίκτυο κινητών σταθμών	18
Εικόνα 3: Αλλαγή τοπολογίας δικτύου λόγω φορητότητας συσκευών	19
Εικόνα 4: Τοπολογίες σύγχρονων δικτύων.....	20
Εικόνα 5: Multi-hop προώθηση πακέτων	20
Εικόνα 6: Υπολογισμός k με χρήση καθοδηγούμενης από πίνακα μεθόδου.....	31
Εικόνα 7: Επίδραση στον κόμβο N εξαιτίας του κόμβου M λόγω ροής f	32
Εικόνα 8: Παράδειγμα παρουσίασης για χρήση κριτηρίου επιλογής διαδρομής ελάχιστου αριθμού βημάτων.....	46
Εικόνα 9: Εκπομπή RREQ μηνύματος για αίτηση διαδρομής από την πηγή 1 στον προορισμό 10	63
Εικόνα 10: Διάδοση RREP και διαδρομή που δημιουργείται μεταξύ των κόμβων 1 και 10	63
Εικόνα 11: Μορφή RREQ μηνύματος.....	65
Εικόνα 12: Μορφή RREP μηνύματος.....	66
Εικόνα 13: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 10 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια.....	80
Εικόνα 14: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 30 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια.....	81
Εικόνα 15: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 50 κόμβων για τα 4 διαφορετικά σενάρια.....	81
Εικόνα 16: Εικόνα που προκύπτει από τον nsnam για 10 κόμβους	84
Εικόνα 17: Περιοχές κάλυψης του κάθε κόμβου.....	84
Εικόνα 18: Τελική εικόνα κόμβων με κινητικότητα	86
Εικόνα 19: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 10 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV ...	88
Εικόνα 20: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 30 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV ...	88
Εικόνα 21: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 30 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV ...	89
Εικόνα 22: Τοπολογία 6 κόμβων	90
Εικόνα 23: Σχηματική παρουσίαση της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 10 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV_hops	91
Εικόνα 24: Σχηματική παρουσίαση της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 30 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV_hops	92
Εικόνα 25: Σχηματική παρουσίαση της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 50 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV_hops	92
Εικόνα 26: Συγκριτικά αποτελέσματα για 10 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV σε 5 διαφορετικά σενάρια.....	94
Εικόνα 27: Συγκριτικά αποτελέσματα για 30 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV σε 5 διαφορετικά σενάρια.....	96
Εικόνα 28: Συγκριτικά αποτελέσματα για 50 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV σε 5 διαφορετικά σενάρια.....	99



Εικόνα 29: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max0-cbr-10-0.125.....	100
Εικόνα 30: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max0-cbr-10-0.25.....	100
Εικόνα 31: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max20-cbr-10-0.125.....	101
Εικόνα 32 : Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max20-cbr-5-0.25	101
Εικόνα 33: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max20-cbr-8-0.25.....	102
Εικόνα 34: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max0-cbr-30-0.125.....	103
Εικόνα 35: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max0-cbr-30-0.25.....	103
Εικόνα 36: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max20-cbr-30-0.125.....	103
Εικόνα 37: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max20-cbr-5-0.25.....	104
Εικόνα 38: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max20-cbr-8-0.25.....	104
Εικόνα 39: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max0-cbr-50-0.125.....	105
Εικόνα 40: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max0-cbr-50-0.125.....	105
Εικόνα 41: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max20-cbr-50-0.125.....	106
Εικόνα 42: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max20-cbr-20-0.25.....	106
Εικόνα 43: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max20-cbr-40-0.25.....	107
Εικόνα 44: Τοπολογία σεναρίου 10 κόμβων για εφαρμογή SLP	124
Εικόνα 45: Γράφημα με συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ SLP και ESLP	132
Εικόνα 46: Γράφημα με συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ SLP και ESLP για το σενάριο με 5 διαθέσιμους service agents.....	133
Εικόνα 47: Γράφημα με συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ SLP και ESLP για το σενάριο με 5 διαθέσιμους service agents.....	134
Εικόνα 48: Γράφημα με συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ SLP και ESLP για το σενάριο με 5 διαθέσιμους service agents.....	135



Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Πειραματικές μετρήσεις δικτυακών διεπαφών για την κατανάλωση ενέργειας	27
Πίνακας 2: Παρουσίαση των τιμών των μετρήσεων για direct sequence spread spectrum γραμμικό μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας της κάρτας Lucent IEEE 802.11 WaveLAN PC card 2.4 GHz.....	36
Πίνακας 3: Τιμές σταθερών που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις	37
Πίνακας 4: Ανάλυση των πεδίων του RREQ	66
Πίνακας 5: Ανάλυση των πεδίων του RREP	67
Πίνακας 6 : Παράδειγμα tcl script που εισάγει ενεργειακό μοντέλο.....	76
Πίνακας 7: Περιεχόμενα αρχείου με πληροφορίες κίνησης των κόμβων	77
Πίνακας 8: Παρουσίαση του αρχείου δημιουργίας κίνησης πακέτων δεδομένων μεταξύ των κόμβων.....	78
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά που διαμορφώνονται στα εισαγωγικά του αρχείου .tcl	79
Πίνακας 10: Διαμόρφωση των χαρακτηριστικών των κόμβων του δικτύου προσομοίωσης.....	79
Πίνακας 11: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 10 κόμβων.....	80
Πίνακας 12: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 30 κόμβων.....	80
Πίνακας 13: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 50 κόμβων.....	81
Πίνακας 14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη διάρκεια ζωής του δικτύου	85
Πίνακας 15: Υπολοιπόμενες ενέργειες κόμβων του δικτύου τη χρονική στιγμή 14 sec	85
Πίνακας 16: Υπολοιπόμενες ενέργειες κόμβων του δικτύου τη χρονική στιγμή 14,45 sec	86
Πίνακας 17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη διάρκεια ζωής του δικτύου	86
Πίνακας 18: Υπολειπόμενες ενέργειες των κόμβων του δικτύου στα 17,41 sec.....	87
Πίνακας 19: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 10 κόμβων εφαρμόζοντας AODV με ενεργειακή επέκταση.....	87
Πίνακας 20: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 30 κόμβων εφαρμόζοντας AODV με ενεργειακή επέκταση.....	88
Πίνακας 21: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 50 κόμβων εφαρμόζοντας AODV με ενεργειακή επέκταση	89
Πίνακας 22: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 10 κόμβων εφαρμόζοντας EAODV_hops	91
Πίνακας 23: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 30 κόμβων εφαρμόζοντας EAODV_hops	91
Πίνακας 24: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 50 κόμβων εφαρμόζοντας EAODV_hops	92
Πίνακας 25: Τιμές για 10 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV για 5 διαφορετικά σενάρια.....	93
Πίνακας 26: Υπολειπόμενες Ενέργειες κόμβων τη χρονική στιγμή 55 sec για το συνδυασμό σεναρίων scen-10-max0 και cbr-10-0.125	94



Πίνακας 27: Τιμές για 30 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV για 5 διαφορετικά σενάρια.....	95
Πίνακας 28: Υπολειπόμενες Ενέργειες κόμβων τη χρονική στιγμή 45 sec για το συνδυασμό σεναρίων scen-30-max20 και cbr-30-0.125	96
Πίνακας 29: Τιμές για 50 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV για 5 διαφορετικά σενάρια.....	97
Πίνακας 30: Υπολειπόμενες Ενέργειες κόμβων τη χρονική στιγμή 55 sec για το συνδυασμό σεναρίων scen-50-max20 και cbr-20-0.25	98
Πίνακας 31: Τιμές για 10 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV, EAODV και EAODV_hops για 5 διαφορετικά σενάρια	99
Πίνακας 32: Τιμές για 30 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV, EAODV και EAODV_hops για 5 διαφορετικά σενάρια	102
Πίνακας 33: Τιμές για 50 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV, EAODV και EAODV_hops για 5 διαφορετικά σενάρια	105
Πίνακας 34: Δομή πακέτου SLP	124
Πίνακας 35: Ανταλλαγή μηνυμάτων κατά την προσομοίωση.....	131
Πίνακας 36: Δομή tr μηνύματος	131
Πίνακας 37: Υπολειπόμενες ενέργειες των service agents 1 και 5.....	131
Πίνακας 38: Υπολειπόμενες ενέργειες των service agents 1, 5, 6 και 8.....	132
Πίνακας 39: Υπολειπόμενες ενέργειες των service agents 1, 5, 6 και 8.....	133
Πίνακας 40: Υπολειπόμενες ενέργειες των service agents 1, 5, 6 και 8.....	134



Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Konark service discovery	51
Σχήμα 2: Παράδειγμα Δένδρου Υπηρεσιών	52
Σχήμα 3: SLP Μηνύματα σε ad hoc δίκτυα	54
Σχήμα 4: Κεντριοποιημένη λειτουργία SLP	109
Σχήμα 5: Κατανεμημένη λειτουργία SLP	109
Σχήμα 6: Εκπομπή μηνυμάτων SrvRqst και SrvRply	111
Σχήμα 7: Αποστολή μηνυμάτων μέσω Directory Agents	111
Σχήμα 8: Ανακάλυψη των Directory Agents	112
Σχήμα 9: Ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω scopes	112
Σχήμα 10: URL Entries	113
Σχήμα 11: Επικεφαλίδα SLP μηνυμάτων	115
Σχήμα 12: Διαχωρισμός μηνυμάτων SLP και αντίστοιχα Function-IDs	115
Σχήμα 13: Service Request	116
Σχήμα 14: Service Reply	117
Σχήμα 15: Directory Agent Advertisement	117
Σχήμα 16: Service Agent Advertisement	118
Σχήμα 17: Service Location Extension	119
Σχήμα 18: SLP Μηνύματα σε ad hoc δίκτυα	120
Σχήμα 19: Σενάριο SLP 8 κόμβων	121
Σχήμα 20: Αποστολή SrvRqst	121
Σχήμα 21: Προώθηση του SrvRqst από τους κόμβους 3 και 4	122
Σχήμα 22: Επαναπροώθηση και δημιουργία SrvRply από τον service agent κόμβο 2	122
Σχήμα 23: Άφιξη του SrvRply στην πηγή του SrvRqst και δημιουργία του νέου SrvRply από τον κόμβο 8	122
Σχήμα 24: Προώθηση SrvRply από τον κόμβο 5 προς τον 3	123
Σχήμα 25: α) Απάντηση SrvRply από τον κόμβο 8 προς τον 1. β) Δημιουργία TCP σύνδεσης μεταξύ της πηγής SrvRqst και του πλησιέστερου εξυπηρετητή (2) ..	123
Σχήμα 26: Τοπολογία και ρόλοι κόμβων	125
Σχήμα 27: Τοπολογία και ρόλοι κόμβων	126

1 Εισαγωγή

Οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις και το μειούμενο κόστος των τεχνολογιών δικτύου έχουν οδηγήσει σε μια ραγδαία αύξηση κατανεμημένων συστημάτων και στην ανάπτυξη χιλιάδων συσκευών δικτύου που χρησιμοποιούνται τόσο σε ενσύρματα όσο και σε ασύρματα δίκτυα. Έχουν ήδη σχεδιαστεί και υλοποιηθεί εφαρμογές, στις οποίες ο κλασσικός υπολογιστής δεν υφίσταται πλέον ως μια αυτόνομη, συγκροτημένη συσκευή πολλαπλών χρήσεων, αλλά ως ένα κατανεμημένο σύστημα από μη-ορατά υπολογιστικά τμήματα. Τα τμήματα αυτά συνήθως έχουν πολύ μικρό μέγεθος και είναι ενσωματωμένα σε άλλα αντικείμενα, μη-υπολογιστικής και συνήθως καθημερινής χρήσης.

Τα συστήματα αυτά καλούνται συνήθως «διδεισδυτικά υπολογιστικά συστήματα» (pervasive computer systems), αν και έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί και άλλοι όροι, όπως ubiquitous computing, disappearing computers κλπ. Η βασική ιδέα πίσω από όλες αυτές τις προσεγγίσεις είναι ότι ο υπολογιστής «εξαφανίζεται» και οι υπηρεσίες που απαιτούν υπολογιστική ισχύ διατίθενται στους ανθρώπους δια μέσου του φυσικού τους περιβάλλοντος.

Προς τη κατεύθυνση αυτή και με σκοπό την καλυτέρευση της ποιότητας της ζωής του ανθρώπου, γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης διάφορων μορφών δικτύων. Για παράδειγμα, η δημιουργία ασύρματων δικτύων που βασίζονται στην υπάρχουσα δικτυακή υποδομή, όπως το ευρέως διαδεδομένο κυψελωτό σύστημα (cellular).

Υπάρχουν όμως και τα ασύρματα δίκτυα που δεν εκμεταλλεύονται την υποδομή αυτή. Τέτοια δίκτυα είναι για παράδειγμα τα ad hoc που διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στον τομέα των «pervasive computer systems».

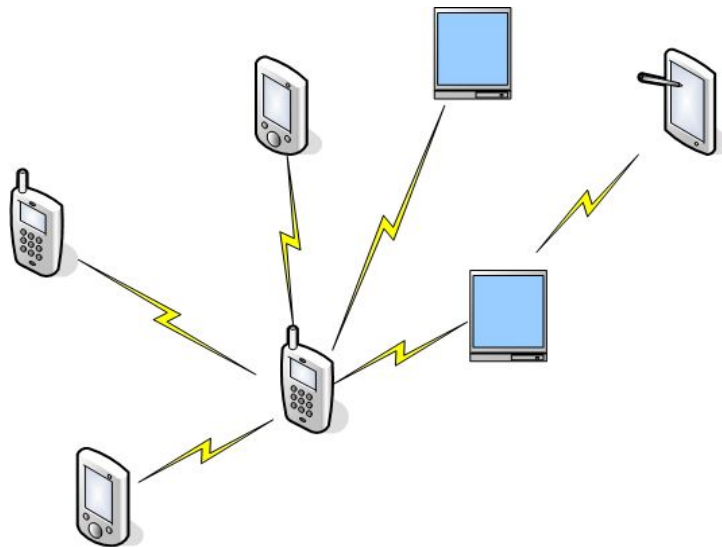
Τα ασύρματα ad hoc δίκτυα (Mobile Ad Hoc Networks) είναι αυτόνομα συστήματα με βασικό γνώρισμά τους την αυτό-οργάνωση και τον αυτο-έλεγχο των διαθέσιμων πηγών.

Ετυμολογικά ad hoc σημαίνει «τυχαία», που εκφράζει απόλυτα τόσο τον τρόπο οργάνωσης όσο και τον τρόπο λειτουργίας των MANETs. Η αντικατάσταση της κεντροποιημένης δομής με έναν πλήρως κατανεμημένο τρόπο διαχείρισης και η απουσία δρομολογητών στην υποδομή των MANETs, καθιστά τα συγκεκριμένα δίκτυα από τα πιο ενδιαφέροντα πεδία ερευνητικής δραστηριότητας.

Όλοι οι κόμβοι ενός MANET συμμετέχουν στη διαδικασία προώθησης ενός πακέτου προς τον προορισμό. Κάθε ασύρματη συσκευή μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως απλός παραλήπτης όσο και σαν δρομολογητής με άμεσες αρμοδιότητες να προωθήσει ένα πακέτο στον τελικό προορισμό.

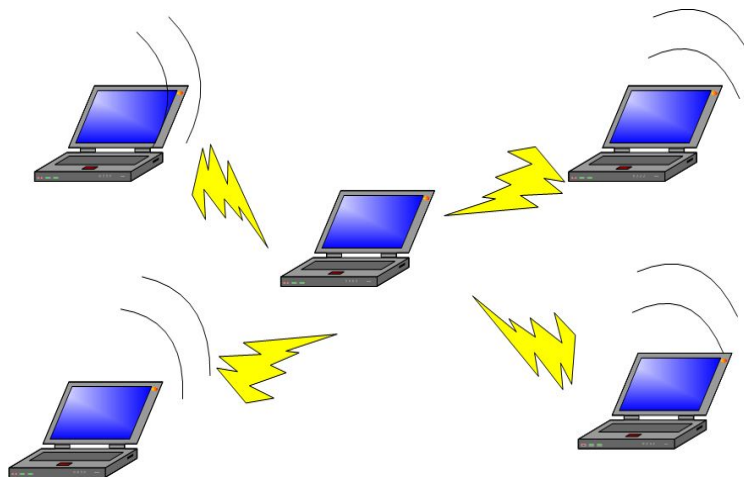
Ως αυτόνομο σύστημα, δεν έχει ανάγκη για την αξιοποίηση της υπάρχουσας δικτυακής υποδομής για την εύρυθμη λειτουργία του. Με αυτό τον τρόπο, πραγματοποιείται ο στόχος της σημερινής εποχής για σύνδεση και παροχή υπηρεσιών σε οποιαδήποτε στιγμή και από οποιαδήποτε θέση του χρήστη, επιτρέποντας την αυθόρμητη και στιγμιαία σύνθεση και αναδιάταξη του κινητού δικτύου.

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο διαφορετικές τοπολογίες ad hoc δικτύων, το ετερογενές δίκτυο κινητών συσκευών και το δίκτυο κινητών σταθμών. Στην πρώτη τοπολογία (Εικόνα 1) το δίκτυο αποτελείται από διαφορετικούς τύπους κινητών συσκευών όπως PDAs, smart bridges και κινητούς σταθμούς.



Εικόνα 1: Ετερογενές δίκτυο κινητών συσκευών

Στη δεύτερη περίπτωση, το δίκτυο κινητών σταθμών, αποτελείται αποκλειστικά και μόνο από κινητούς σταθμούς, δηλαδή συσκευές με μεγάλη επεξεργαστική ισχύ, όπως για παράδειγμα laptop. Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 2) παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα της συγκεκριμένης τοπολογίας.



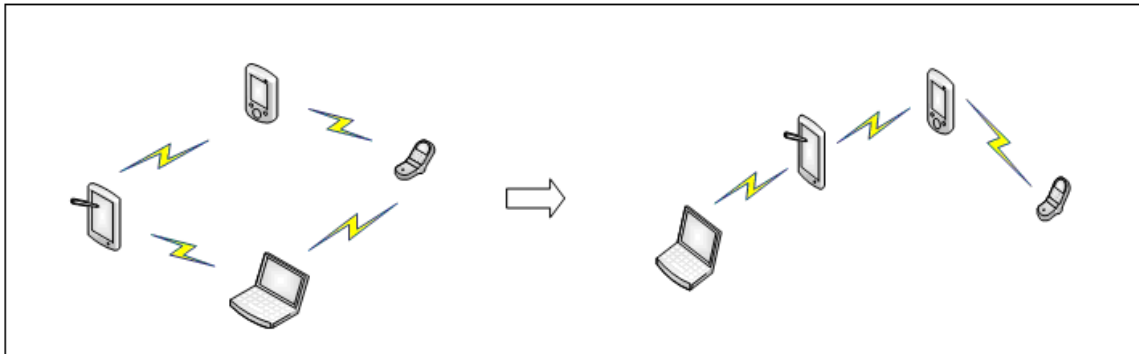
Εικόνα 2: Δίκτυο κινητών σταθμών

Εκτός από τις παραδοσιακές υπηρεσίες που υποστηρίζονται από όλες τις μορφές δικτύων, όπως για παράδειγμα telnet, ftp, ping κ.τ.λ. τα MANETs προσφέρουν και επιπρόσθετες υπηρεσίες. Πιο συγκεκριμένα υποστηρίζουν υπηρεσίες πελάτη/εξυπηρετητή (client/server), υπηρεσίες βασισμένες στο περιεχόμενο και ειδικότερα στη θέση του χρήστη (content/location aware) καθώς και υπηρεσίες πολυμεσικών δεδομένων σε κινητά δίκτυα.

1.1 Χαρακτηριστικά ad hoc

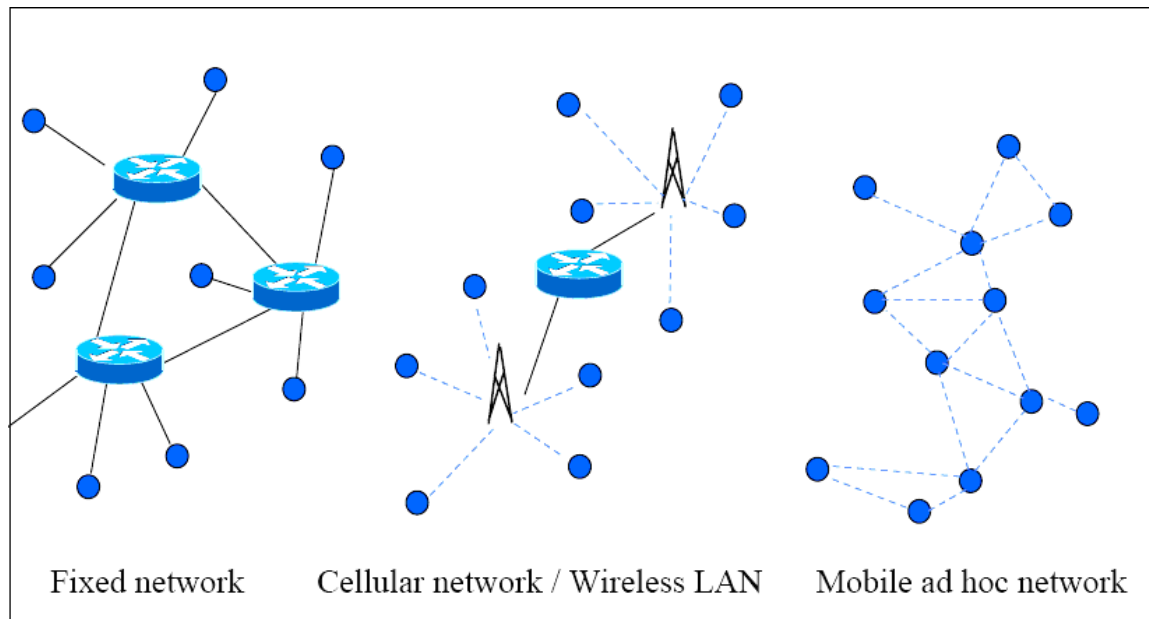
Το βασικότερο χαρακτηριστικό των ασύρματων ad hoc δικτύων είναι η δυνατότητα των κόμβων να λειτουργούν τόσο σαν τελικοί παραλήπτες μηνυμάτων όσο και σαν ενδιάμεσοι, με σκοπό την προώθηση των μηνυμάτων προς τον τελικό αποδέκτη. Ουσιαστικά έχουν διττό ρόλο και λειτουργούν σαν απλοί τελικοί κόμβοι και σαν δρομολογητές.

Δεδομένου ότι το δίκτυο απαρτίζεται από ασύρματες και κινητές συσκευές, οι κόμβοι που συμμετέχουν στο δίκτυο διακρίνονται για τη δυνατότητα της φορητότητας τους. Στο συγκεκριμένο γνώρισμα εντοπίζονται τόσο θετικά στοιχεία για τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου, όσο και αρνητικά. Από τη μια πλευρά, το δίκτυο εμφανίζεται εύκολα προσαρμόσιμο σε νεοεισερχόμενους κόμβους, παρέχοντας τη δυνατότητα στις κινητές συσκευές να αποχωρούν και να ξαναισέρχονται στο δίκτυο με τα ίδια δικαιώματα, όποτε επιθυμούν. Από την άλλη όμως, η διαρκής αλλαγή θέσης συσκευών προκαλεί συχνές μεταβολές στην τοπολογία του δικτύου. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια ραγδαίες αλλαγές στις υπαρκτές διαδρομές μεταξύ των κόμβων, καθώς και μεταβολές στη διαδικασία δρομολόγησης των πακέτων. Το εν λόγω πρόβλημα επιδεινώνεται όσο το δίκτυο επεκτείνεται με την εισαγωγή νέων κόμβων.



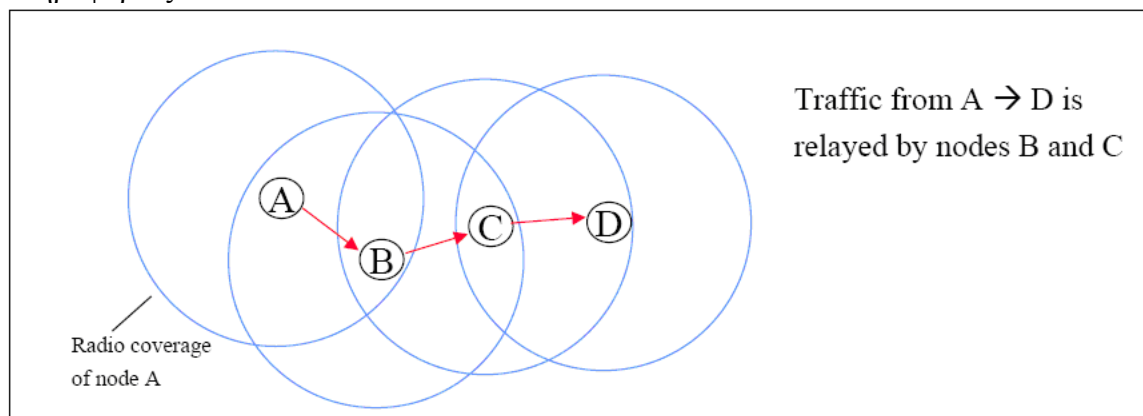
Εικόνα 3: Αλλαγή τοπολογίας δικτύου λόγω φορητότητας συσκευών

Τα ad hoc δίκτυα αποτελούν αυτόνομα συστήματα, η οργάνωσή τους αποτελεί εσωτερική διαδικασία, υπονοώντας την απουσία κεντρικής δομής ελέγχου. Ο κατακεντρωμένος τρόπος λειτουργίας τους, συναντά τις απαιτήσεις των σύγχρονων υπολογιστών συστημάτων. Το βασικό αίτημα των προϊόντων και των ερευνητικών κινήσεων είναι η αποφυγή κεντριοποιημένης δομής και η χρήση κατακεντρωμένων αρχιτεκτονικών, που παρέχουν υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας και ιδιωτικότητας από τη μία πλευρά και μεγαλύτερη ευελιξία στο δίκτυο από την άλλη.



Εικόνα 4: Τοπολογίες σύγχρονων δικτύων

Λειτουργώντας σαν multihop ασύρματα δίκτυα, όλοι οι κόμβοι βοηθούν για τη διατήρηση της διασυνδεσιμότητας του δικτύου. Δεν υπάρχει αρχηγός, κεντρικός διαχειριστής, ή συντονιστής του δικτύου ή της κυκλοφορίας. Κάθε σταθμός μπορεί να στείλει πληροφορία σε οποιοδήποτε άλλον σταθμό άμεσα, είτε ο παραλήπτης βρίσκεται εντός της εμβέλειας του είτε εκτός, οπότε θα πρέπει να βρεθεί κατάλληλο και αποδοτικό μονοπάτι που θα αποτελείται από τους κόμβους από τους οποίους θα περάσει το μήνυμα προκειμένου να φτάσει στον παραλήπτη. Όλοι οι σταθμοί είναι ισοδύναμοι, έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά δικτύωσης και επιτελούν τις ίδιες λειτουργίες όταν πρόκειται για αποστολές, λήψεις ή προωθήσεις πακέτων πληροφορίας.



Εικόνα 5: Multi-hop προώθηση πακέτων

Οι κόμβοι ενός ad hoc δικτύου είναι συσκευές με ιδιαίτερα χαμηλά αποθέματα ενέργειας. Άλλωστε, η μοναδική πηγή ενέργειας των συγκεκριμένων κινητών συσκευών είναι η μπαταρία τους, η οποία εξαντλείται ανάλογα με τον τρόπο και τη διάρκεια χρήσης της συσκευής. Ειδικότερα, ένας κόμβος ad hoc δικτύου, λόγω και των ιδιαίτερα αυξημένων λειτουργιών που καλείται να επιτελέσει, όπως η συμβολή στη δρομολόγηση, η αναγνώριση της τοπολογίας του δικτύου και συνεπώς η

συχνότερη ανταλλαγή μηνυμάτων, «εξαντλείται» ενεργειακά γρήγορα, οδηγώντας ταυτόχρονα σε ενεργειακή «πτώση» και τις αντίστοιχες διαδρομές στις οποίες συμμετέχει, μεταβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο και την τοπολογία του δικτύου.

Τα MANETs παρουσιάζουν επίσης περιορισμένη διαθεσιμότητα σε εύρος ζώνης (bandwidth). Εμφανίζουν ιδιαίτερα χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, τυπικά αρκετά πιο χαμηλές ταχύτητες σε σύγκριση με τα ενσύρματα δίκτυα, οδηγώντας σε μεγαλύτερη καθυστέρηση, καθώς επίσης και μεγαλύτερους χρόνους εγκαθίδρυσης των συνδέσεων. Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι οι ασύρματες ζεύξεις έχουν σημαντικά χαμηλή χωρητικότητα σε σχέση με τις αντίστοιχες ενσύρματες. Εξαιτίας των φαινομένων πολλαπλής πρόσβασης, παρουσιάζονται φαινόμενα θορύβου εξασθένισης που προκαλείται από την πολυδιάδοση (multipath fading noise) και φαινόμενα διασυμβολικής παρεμβολής. Κατά συνέπεια, η χωρητικότητα μιας ασύρματης ζεύξης υποβαθμίζεται με το πέρασμα του χρόνου ενώ η αποδοτικότητα της ρυθμαπόδοσης μπορεί να είναι μικρότερη από τη μέγιστη δυνατότητα μετάδοσης χωρητικότητας που παρέχεται.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι ανακύπτουν αρκετά ενδιαφέροντα ζητήματα για τα ad hoc δίκτυα. Θέματα που σχετίζονται με τη δρομολόγηση, την πρόσβαση στα διαθέσιμα κανάλια, αλλά και την αντιμετώπιση προβλημάτων, όπως η αυξημένη κινητικότητα των κόμβων, η διατήρηση της ενέργειας και η αποτελεσματική χρήση και κατανομή του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Πιο συγκεκριμένα, σε ένα ad hoc δίκτυο η διαδικασία της δρομολόγησης είναι περισσότερο πολύπλοκη και παρουσιάζει έντονα προβλήματα, συγκρινόμενη με την αντίστοιχη διαδικασία σε ενσύρματα δίκτυα. Αν αναλογιστούμε ότι οι δρομολογητές είναι κινητές συσκευές, μπορούμε να κατανοήσουμε ότι οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων, αλλάζουν αρκετά συχνά. Συνεχείς ενημερώσεις σχετικά με τις αλλαγές που δημιουργούνται στο δίκτυο θα πρέπει να ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων, όμως η διαρκής παραγωγή και αποστολή μηνυμάτων, αυξάνει κατά πολύ την κίνηση δεδομένων μέσω των διαύλων επικοινωνίας, οδηγώντας σε αυξημένη κατανάλωση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου.

Ο τρόπος κατανομής των καναλιών, λόγω της απουσίας σταθερού σταθμού βάσης, οδηγεί σε προβλήματα διαθεσιμότητας καναλιών. Σε ένα MANET είναι πολύ δύσκολο να αποφευχθούν συγκρούσεις πακέτων και ακόμα πιο δύσκολη η υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας (QoS - Quality of Service). Άλλωστε, η κινητικότητα των κόμβων που συνθέτουν το δίκτυο επηρεάζει τη μετάδοση σήματος, τις εφαρμογές αλλά και τις προσφερόμενες υπηρεσίες.

Συμπερασματικά το βασικό ζήτημα που απασχολεί την ερευνητική κοινότητα, είναι η αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων για την βελτιστοποίηση της απόδοσης και της λειτουργίας των MANETs. Είναι φυσικό ότι ο ταυτόχρονος περιορισμός όλων των δυσλειτουργιών ενός MANET παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, συνεπώς τα βήματα γίνονται προς τη σταδιακή βελτιστοποίηση των διαφορετικών προβλημάτων. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη δημιουργία και την εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης ενέργειας.

Ο αλγόριθμος που θα παρουσιαστεί στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας διαχείρισης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη του την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων του δικτύου για κρίσιμες αποφάσεις. Οι συγκεκριμένες αποφάσεις θα σχετίζονται με τις ενεργές διαδρομές του δικτύου για τη δρομολόγηση πακέτων, αλλά και με την επιλογή διαθέσιμων παρόχων υπηρεσιών. Μέσω της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής, επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανακάλυψης διαδρομής, προς τον πιο «δυνατό» ενεργειακά πάροχο υπηρεσίας. Βασικός στόχος είναι η διατήρηση της ενέργειας των κόμβων για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό

διάστημα, μεγιστοποιώντας τη ζωή του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλει στη δημιουργία αξιόπιστων συνδέσεων προς τον αντίστοιχο πάροχο, βελτιώνοντας το επίπεδο της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

1.2 Εφαρμογές MANETs

Τα MANETs (Mobile Ad hoc NETworks) προσφέρουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Ως αυτόνομα αυτό-οργανωνόμενα συστήματα που δεν βασίζονται στην υπάρχουσα υποδομή, το εύρος των προσφερόμενων εφαρμογών εκτείνεται από περιβάλλοντα γραφείων μικρής επιχείρησης μέχρι και μεγάλης κλίμακας δικτύων αισθητήρων.

Οι κατηγορίες εφαρμογών των MANETs μπορούν να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες:

- Δίκτυα αισθητήρων: δίκτυα που βασίζονται στην επικοινωνία μεταξύ «έξυπνων» αισθητήρων. Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από κατακευκτισμένους στο χώρο αυτόνομους αισθητήρες που συνεργάζονται για την παρουσίαση φυσικών ή περιβαλλοντικών συνθηκών. Για παράδειγμα οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση της θερμοκρασίας, του ήχου, των δονήσεων, της πίεσης, της κίνησης ή των ρύπων ([1], [2]). Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων ξεκίνησε για στρατιωτικές εφαρμογές, όπως επιτήρηση σε πεδία μαχών. Σήμερα χρησιμοποιούνται σε αρκετούς τομείς της καθημερινότητας όπως παρακολούθηση και έλεγχος της διαδικασίας παραγωγής σε εργοστάσια, παρακολούθηση του περιβάλλοντος, καθώς και εφαρμογές υγείας, αυτοματοποίηση των διαδικασιών στο σπίτι και έλεγχο κυκλοφορίας ([1], [3]). Μπορούν να εφαρμοστούν σε αθλητικές δραστηριότητες, όπως μέτρηση επιδόσεων αθλητών με συσκευές που ενσωματώνονται στο ανθρώπινο σώμα (BAN – Body Area Networks).

Μια ιδιαίτερη εφαρμογή των sensor δικτύων είναι η παρακολούθηση, από ιατρικές μονάδες, ενός ασθενούς στο σπίτι. Τα τελευταία χρόνια με την εμφάνιση ασθενειών που σχετίζονται με απώλεια μνήμης ή και κινητικά προβλήματα, όπου υπάρχει ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης, η ερευνητική κοινότητα έχει προχωρήσει στη δημιουργία «έξυπνων περιβάλλοντων» (smart environments) με ιδιαίτερο στόχο την άμεση παροχή βοήθειας στους ασθενείς.

- Προσωπική χρήση και όχι μετάδοση εμπορικών δεδομένων ανάμεσα σε συσκευές και χρήστες. Ένα μικρό ad hoc δίκτυο μπορεί να απλοποιήσει τη διασύνδεση μεταξύ πολλών φορητών συσκευών, όπως φορητό υπολογιστή, PDA, κινητό τηλέφωνο, συσκευές μουσικής κ.α. Είναι δυνατό να γίνονται κλήσεις μέσω του τηλεφώνου και αν υπάρχει πρόσβαση στο Διαδίκτυο, οι κλήσεις αυτές να γίνονται μέσω VoIP χωρίς να παρεμβάλλεται ο χρήστης.
- Εμπορική χρήση για τον καθορισμό και τη δημιουργία επικοινωνίας σε περιπτώσεις εκθέσεων, συνεδρίων ή παρουσιάσεις πωλήσεων. Πιο συγκεκριμένα σε τοπικό επίπεδο τα ad hoc μπορούν να συνδέσουν άμεσα φορητούς υπολογιστές ή PDA, για τη δημιουργία ενός δικτύου πολυμέσων. Αυτό μπορεί να φανεί ιδιαιτέρως χρήσιμο σε αίθουσες διδασκαλίας ή συνεδρίων. Γενικότερα σε οποιαδήποτε περίπτωση συναθροίζονται πολλοί άνθρωποι για μικρό χρονικό διάστημα είναι δυνατή η εύκολη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τους χωρίς την ανάγκη ανάπτυξης υποδομής που μπορεί να είναι οικονομικά ασύμφορη.
- Δημιουργία vehicular networks (δίκτυα αυτοκινήτων) τα οποία δημιουργούνται ανάμεσα σε αυτοκίνητα που κινούνται και σε δίκτυα σταθερής υποδομής που καθορίζουν την κυκλοφορία, όπως τα φανάρια ή τα

ηλεκτρονικά σήματα. Έτσι μπορεί ο χρήστης-οδηγός να αποφύγει δρόμους όπου υπάρχει κυκλοφοριακή συμφόρηση ή ακόμη να ενημερωθεί και για υπηρεσίες όπως για βενζινάδικα ή συνεργεία που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Επιπλέον, ένα συγκεκριμένο «office-car» μπορεί να περιέχει fax, εκτυπωτές, τηλέφωνο, όπου χρήστες περαστικοί μπορούν να συνδεθούν και να τα χρησιμοποιήσουν μέσω των laptop τους και των PDA.

- Σε έκτακτες περιπτώσεις για επιχειρήσεις αναζήτησης και διάσωσης. Πιο συγκεκριμένα τα MANETs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία σε περιοχές χωρίς ικανοποιητική ασύρματη κάλυψη ή εφόσον η υπάρχουσα υποδομή επικοινωνίας δεν είναι λειτουργική εξαιτίας φυσικών καταστροφών. Οι περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης μπορούν να προκληθούν από κάποια φυσικής καταστροφής, όπως σεισμός ή πυρκαγιά, καθώς και σε τέτοιες περιπτώσεις είναι συνήθης η απουσία υποδομής και η ανάγκη για άμεση ανάπτυξη ενός δικτύου επικοινωνιών είναι μεγάλη. Η επικοινωνία μπορεί να γίνεται με μικρές συσκευές και σε μέρη όπου δεν θα μπορούσε να υπάρχει επικοινωνία μέσω κάποιου σταθμού βάσης. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν επικοινωνίες μεταξύ πλοίων ή δυνάμεων τήρησης της τάξης.

1.3 Δομή της διατριβής

Η παρούσα διατριβή, στόχο έχει να παρουσιάσει τις διαφορετικές ερευνητικές δραστηριότητες που σχετίζονται με τα ad hoc δίκτυα και να αναλύσει τα σημαντικότερα προβλήματα που εμφανίζονται σε συγκεκριμένους τομείς των MANETs, προτείνοντας ταυτόχρονα και λύσεις.

Στην επόμενη ενότητα θα εμφανιστεί η έρευνα που έχει ήδη γίνει ή βρίσκεται σε εξέλιξη, σχετικά με την ανάδειξη και την επίλυση ενεργειακών και άλλων προβλημάτων που εμφανίζονται στα MANETs. Η ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας επεκτείνεται στην παρουσίαση των αλγορίθμων για βέλτιστη αναζήτηση και παράδοση υπηρεσίας. Εντοπίζονται επίσης οι τρόποι απώλειας ενέργειας σε ένα MANET, μοντελοποιώντας τις συγκεκριμένες απώλειες ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας του κόμβου.

Εν συνεχεία, καθορίζεται το πρόβλημα στο οποίο θα εστιάσει η συγκεκριμένη διατριβή. Θα αναλυθεί η αξία της αναζήτησης υπηρεσίας βάσει ενεργειακών περιορισμών. Θα παρουσιαστούν οι επιλογές που έγιναν στα πλαίσια της έρευνας για τον κατάλληλο προσδιορισμό ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων και την επέκταση πρωτοκόλλων ανακάλυψης υπηρεσίας.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί το γενικό σχήμα της αρχιτεκτονικής που θα προκύψει για την ανακάλυψη υπηρεσίας με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Οι επεκτάσεις σε υπάρχοντες αλγορίθμους και οι λόγοι για τους οποίους κρίθηκαν αναγκαίες οι συγκεκριμένες μετατροπές θα επεξηγηθούν, δίνοντας μια πλήρη εικόνα των απαιτούμενων τροποποιήσεων.

Στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των κριτηρίων που θα χρησιμοποιηθούν για τις συγκρίσεις μεταξύ των προτεινόμενων υλοποιήσεων και των υπάρχοντων μηχανισμών. Τα κριτήρια θα αφορούν τη μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση της ενέργειας από τους κόμβους κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανακάλυψης και παράδοσης υπηρεσίας.

Τέλος θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η προσφορά της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Θα αναλυθούν προτάσεις για μελλοντική εργασία που

θα επεκτείνουν την αρχιτεκτονική ή θα παρουσιάζουν διαφορετικούς μηχανισμούς για αποδοτική ανακάλυψη υπηρεσίας σε ένα MANET.

2 Υπάρχουσα Κατάσταση

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η ερευνητική δραστηριότητα των τελευταίων χρόνων, αναφορικά με τα ad hoc δίκτυα. Οι σχετικές εργασίες που θα αναλυθούν, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων σε εργαστηριακές εγκαταστάσεις παγκοσμίως, παρουσιάζονται εκτενώς καθώς στοχεύουν κυρίως στην επίλυση προβλημάτων διατήρησης ενέργειας, με τα οποία ασχολείται και η παρούσα αναφορά.

2.1 Ενεργειακά Θέματα

Η υπερβολική κατανάλωση ενέργειας μέσω των διαδικασιών και των ρόλων του κάθε κόμβου στο δίκτυο και ο τρόπος περιορισμού της, με επέκταση υπαρχόντων πρωτοκόλλων ή με δημιουργία νέων, είναι μια από τις πιο διαδεδομένες ερευνητικές περιοχές. Στην παρούσα υποενότητα θα αναλυθεί η σχετική βιβλιογραφία.

Σε πρώτο στάδιο κρίνεται σκόπιμο να εντοπίσουμε και να παρουσιάσουμε τα ενεργειακά προβλήματα όπως εντοπίζονται σε ένα ad hoc δίκτυο. Η υπολειπόμενη ενέργεια ενός κόμβου και η διαρκής κατανάλωσή της, εκτός από τον σταδιακό ενεργειακό «θάνατο» της συσκευής, προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα και στη γενικότερη δομή του δικτύου.

Από τη συγκεκριμένη κατάσταση επηρεάζονται άμεσα οι διαδικασίες δρομολόγησης και επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου. Η εύρεση αλγορίθμων και μεθόδων που αξιοποιούν τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας χωρίς να προκαλούν την υπερβολική σπατάλη τους, είναι μια επιτακτική ανάγκη προκειμένου να αυξηθεί συνολικά η ζωή του δικτύου.

Χαρακτηριστικά, όπως τονίζεται στο [1], εφόσον σε ένα ad hoc δίκτυο οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ταυτόχρονα σαν τελικοί παραλήπτες μηνύματος και σαν δρομολογητές κίνησης και ενδιαμέσοι κόμβοι, απαιτείται επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας. Η επιπλέον ισχύς καταναλώνεται στις διαδικασίες προώθησης και παραλαβής πακέτου.

Όπως αναλύθηκε στο [5], προκειμένου να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο καταναλώνεται η ενέργεια σε ένα ad hoc δίκτυο, θα πρέπει να διαχωρίσουμε τις καταστάσεις λειτουργίας ενός κόμβου σε ένα MANET. Μπορούμε να αναγνωρίσουμε τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας μιας ασύρματης συσκευής και πιο συγκεκριμένα την κατάσταση εκπομπής, την κατάσταση λήψης και την κατάσταση “on”, στην περίπτωση όπου απλά η συσκευή είναι ανοιχτή.

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα τον τρόπο κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε μια από τις προαναφερθείσες μορφές λειτουργίας. Αν θεωρήσουμε ότι η συσκευή μεταδίδει, τότε μπορούμε να αναφέρουμε ότι ο ενισχυτής της κεραίας που λειτουργεί σαν front-end παρέχει ενέργεια για τη μετάδοση ραδιοσυχνοτήτων (RF-Radio Frequency). Στο συγκεκριμένο στάδιο περιέχονται τόσο οι απώλειες που προκύπτουν από την ακτινοβολία όσο και οι απώλειες λόγω αύξησης θερμοκρασίας εσωτερικά στην κεραία και στον ενισχυτή. Ενέργεια όμως καταναλώνεται και από τις διαδικασίες επεξεργασίας του κόμβου. Πιο συγκεκριμένα η δημιουργία, η διαμόρφωση, η κωδικοποίηση σήματος, καθώς και η πρόσβαση στη μνήμη και η επεξεργασία του προς αποστολή σήματος είναι ιδιαίτερα απαιτητικές ενεργειακά λειτουργίες.

Στην περίπτωση όπου ο κόμβος είναι παραλήπτης μηνύματος, η ενέργεια καταναλώνεται αποκλειστικά στον επεξεργαστή. Στον συγκεκριμένο υπολογισμό ενσωματώνεται και η ενέργεια που δαπανάται από τον ενισχυτή, καθώς προωθεί το μήνυμα από την κεραία λήψης σε επίπεδα επιθυμητά για αποκωδικοποίηση, επεξεργασία και αποθήκευση.

Τέλος, στην περίπτωση όπου η συσκευή είναι στην κατάσταση “on” η ενέργεια καταναλώνεται κατά την επεξεργασία, από τη στιγμή που οι ταλαντωτές τάσης, VCO, λειτουργούν, προκειμένου να είναι έτοιμοι να εκκινήσουν τη διαδικασία αποκωδικοποίησης ενός εισερχόμενου σήματος. Όλα τα κυκλώματα θα παραμείνουν ορθά αρχικοποιημένα και φορτισμένα. Η κατανάλωση ενέργειας εντοπίζεται και στην περίπτωση όπου οι συσκευές που συμμετέχουν σε μια διαδρομή πρέπει να μεταδίδουν περιοδικά ενημερωτικά μηνύματα για το αν συνεχίζουν να συμμετέχουν στο δίκτυο ή όχι.

Το σύνολο της δαπανούμενης ενέργειας στη μονάδα του χρόνου, όταν βρίσκεται σε κατάσταση “on”, είναι πολύ μικρό συγκρινόμενο με το αντίστοιχο των καταστάσεων αποστολής και λήψης μηνυμάτων. Αξίζει όμως να σημειωθεί, ότι σε αρκετές εφαρμογές, ειδικότερα στις περιπτώσεις των δικτύων αισθητήρων, ένας κόμβος μπορεί να σπαταλά τον περισσότερο χρόνο ζωής του όταν βρίσκεται στην “on” κατάσταση, χωρίς ουσιαστικά να στέλνει ή να λαμβάνει μηνύματα. Σε άλλες εφαρμογές, όπου ένας κόμβος είναι ενεργός και μεταδίδει κατά τη διάρκεια του περισσότερου χρόνου που βρίσκεται η συσκευή σε “on”, το ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται σε παθητική κατάσταση είναι αμελητέα και δεν λαμβάνεται υπόψη.

Όλες οι προαναφερθείσες καταστάσεις λειτουργίας εμπεριέχουν τόσο τις μονάδες hardware όσο και τους αλγορίθμους επεξεργασίας. Προκειμένου να μειωθεί το ποσό της απαιτούμενης ενέργειας για να επιτευχθεί μια εργασία επικοινωνίας, όπως για παράδειγμα μετάδοση ή παραλαβή ενός πακέτου, είναι απαραίτητο να εξεταστεί ο ρόλος κάθε ενός στοιχείου τόσο αυτόνομα όσο και σε συνεργασία μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την κατανάλωση της ενέργειας, οι σχεδιαστικές επιλογές που θα γίνουν κατά τη δημιουργία ενός MANET και πιο συγκεκριμένα οι μπαταρίες που θα επιλεγθούν για τις συσκευές. Η συγκεκριμένη επιλογή καθορίζει το συνολικό διαθέσιμο υπόλοιπο των κόμβων και κατά επέκταση του δικτύου.

Στο [6] παρουσιάζονται τρόποι για την πιο αποδοτική διαχείριση της ενέργειας σε ένα ad hoc δίκτυο. Ιδιαίτερα σε διαφορετικά σενάρια εφαρμογών, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η ανανέωση των πηγών ενέργειας είναι σχεδόν αδύνατη, κυρίως εξαιτίας της αδυναμίας πρόσβασης των περιοχών που βρίσκονται οι συγκεκριμένες συσκευές. Για αυτό το λόγο, η ζωή ενός κόμβου – αισθητήρα παρουσιάζει μια μοναδική συσχέτιση με το χρόνο ζωής της μπαταρίας του. Η συγκεκριμένη διαπίστωση παρουσιάζεται αναλυτικά και στο [7]. Τα WSN (Wireless Sensor Networks) πρέπει να λειτουργούν με τη λιγότερη δυνατή ενέργεια προκειμένου να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής των κόμβων – αισθητήρων διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη διατήρηση της διασυνδεσιμότητας του δικτύου. Προκειμένου να επιτευχθούν τα προαναφερθέντα, θα πρέπει τόσο η δημιουργία όσο και ο υπολογισμός των συνιστωσών της επικοινωνίας, να γίνεται βάσει της ενέργειας. Επίσης θα πρέπει να υπάρχει υποδομή λογισμικού που θα λαμβάνει υπόψη της την υπολειπόμενη ενέργεια. Σε ένα multihop WSN, εφόσον κάθε κόμβος έχει διττό ρόλο, συμμετέχοντας στο δίκτυο τόσο ως πηγή δημιουργίας και αποστολής δεδομένων όσο και ως δρομολογητής δεδομένων, είναι αυτονόητο ότι πιθανή ενεργειακή «πτώση» ενός κόμβου προκαλεί προβλήματα στην τοπολογία του δικτύου, οδηγώντας σε

επαναδρομολόγηση των πακέτων και αναδιοργάνωση του δικτύου συνολικά. Συνεπώς, η ύπαρξη ενός μηχανισμού για τη διαχείριση της ενέργειας αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία καθώς μπορεί επίσης να μειώσει την παρεμβολή μεταξύ των κόμβων – αισθητήρων και ταυτόχρονα το χρόνο για την επίτευξη της βέλτιστης χρήσης των πηγών του συστήματος.

Επιπλέον, το ζήτημα που αναδεικνύεται από την ίδια ερευνητική δουλειά είναι το κόστος και τα παράπλευρα θέματα που ανακύπτουν από το σχήμα διαχείρισης ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί. Είναι δεδομένο ότι το πρωτόκολλο ελέγχου ισχύος απαιτεί επιπρόσθετο κόστος, κάτι που αποτελεί σημαντικό θέμα για την αποτελεσματικότητα της λύσης που θα επιλεγεί. Μερικά από τα κριτήρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση της χρησιμοποιούμενης λύσης είναι οι υποστηριζόμενες από τους κόμβους εφαρμογές, η συχνότητα συλλογής δεδομένων, το μέγεθος των πακέτων που κινούνται στο δίκτυο, η χρονική διάρκεια των μετρήσεων και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των κόμβων.

Όπως αναλύουν και οι συγγραφείς στο [8], ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση των ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας απαιτεί την πρακτική κατανόηση της συμπεριφοράς των υποκείμενων δικτυακών διεπαφών. Η ενέργεια που καταναλώνεται από μια διεπαφή της συσκευής, εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας. Σε κατάσταση “sleep”, μια διεπαφή δεν μπορεί ούτε να μεταδώσει ούτε να παραλάβει, συνεπώς η κατανάλωση ενέργειας θα είναι ιδιαίτερα μικρή. Ένας κόμβος θα πρέπει να μεταδίδει ή να λαμβάνει μέσω της δικτυακής διεπαφής του, αφού πρώτα μεταβεί σε αδρανή (idle) κατάσταση λειτουργίας, που απαιτεί τόσο χρόνο όσο και ενέργεια. Στη συγκεκριμένη κατάσταση, η μετάδοση ή λήψη μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, αλλά καταναλώνεται πολύ ενέργεια, εξαιτίας του αριθμού των στοιχείων κυκλωμάτων που πρέπει να ενεργοποιηθούν.

Εξαιτίας της ευρείας διαθεσιμότητάς τους, του χαμηλού κόστους και της σχετικής σταθερότητας που προσφέρουν οι διεπαφές που βασίζονται στα ανοιχτά πρότυπα IEEE 802.11 [9], προκάλεσαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στον ακόλουθο Πίνακα 1 συνοψίζονται οι σχετικές πειραματικές μετρήσεις για κατανάλωση ενέργειας που έγιναν βάσει διαφορετικών δικτυακών διεπαφών.

Διεπαφή IEEE 802.11 (2,4 GHz)	Μετάδοση	Λήψη	Κατάσταση λειτουργίας idle	Κατάσταση λειτουργίας sleep	Mbps
Aironet PC4800	1.4–1.9 W	1.3–1.4 W	1.34 W	0.075 W	11
Lucent Bronze	1.3 W	0.97 W	0.84 W	0.066 W	2
Lucent Silver	1.3 W	0.90 W	0.74 W	0.048 W	11
Cabletron Roamabout	1.4 W	1.0 W	0.83 W	0.13 W	2
Lucent WaveLAN	3.10 W	1.52 W	1.5 W	—	—

Πίνακας 1 Πειραματικές μετρήσεις δικτυακών διεπαφών για την κατανάλωση ενέργειας

Στους παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις που προαναφέρθηκαν, συμπεριλαμβάνονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, τα σχεδιαστικά κριτήρια και ο τρόπος κατασκευής που εφαρμόζεται από τους κατασκευαστές. Τα αποτελέσματα και οι διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται δεν είναι μεγάλες, πιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο τη συνέπεια των προτύπων που αναφέρθηκαν.

Αναλυτικά αποτελέσματα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας κατά τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων από τις διεπαφές δικτύου παρουσιάζονται στο [10]. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται από τους συγγραφείς προκύπτουν από μετρήσεις που έγιναν σε πραγματικές συνθήκες μετάδοσης και λήψης πακέτων διαφορετικών μεγεθών. Στο [10] τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να αναπτύξουν ένα μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης για μια διεπαφή δικτύου τύπου IEEE 802.11 Lucent.

Όταν μια διεπαφή δικτύου λαμβάνει, αποστέλλει ή απορρίπτει ένα πακέτο καταναλώνεται επιπλέον ενέργεια, η οποία προστίθεται στην αρχική. Αυτή μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας σε κάθε μορφή λειτουργίας ένα συστατικό που αυξάνεται με τρόπο ανάλογο με το μέγεθος του πακέτου, αλλά και ένα προκαθορισμένο στοιχείο που αντανakλά την ανάθεση του καναλιού.

Παρά το γεγονός ότι το συγκεκριμένο αριθμητικό αποτέλεσμα προκύπτει από περιορισμούς τιμής και πάλι υπάρχουν πολύ ισχυρά πρότυπα. Το προκαθορισμένο κόστος είναι υψηλό, εξαιτίας του κόστους που δημιουργείται από τις RTS (Request To Send)/ CTS(Clear To Send)/data/ACK (Acknowledge) χειραψίες και το μέγεθος των IEEE 802.11 MAC ετικετών. Το προκαθορισμένο κόστος κυριαρχεί για πακέτα μικρότερα από 338 bytes, για 2Mbps εύρος ζώνης ή 1,2 Kbytes για 11 Mbps. Παρόλα αυτά, η κατανάλωση της ενέργειας στην περίπτωση αδράνειας (idle) είναι η επικρατούσα στην υπολογισμό της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται. Κάνοντας μια σκληρή αποτίμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατάσταση βασιζόμενοι στο [10] αποδεικνύεται ότι μια διεπαφή IEEE 802.11 δύναται να αποστείλει δέκα 128-byte πακέτα με ευρυ-εκπομπή ανά δευτερόλεπτο και να παραλάβει τον ίδιο όγκο μηνυμάτων και από τους 4 γειτονικούς του κόμβους, καταναλώνοντας μόνο περίπου 1% παραπάνω ενέργεια από ότι μια διεπαφή που βρίσκεται σε αδράνεια. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να ενσωματωθούν σε προσομοιώσεις στο επίπεδο του πακέτου ενός ad hoc πρωτοκόλλου δρομολόγησης, όπως περιγράφεται στο [12].

Στη συγκεκριμένη εργασία, γίνεται ξεκάθαρο ότι το εύρος ζώνης και η ενέργεια δεν είναι κριτήρια αλληλοεπηρεαζόμενα με ανάλογο τρόπο, δηλαδή η μείωση του εύρους ζώνης δεν συνεπάγεται απαραίτητα τη μείωση της δαπανώμενης ενέργειας. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ότι σε ένα σχετικά πυκνό δίκτυο, η ευρυεκπομπή κίνησης μπορεί να είναι ακριβή, εξαιτίας πολλαπλού κόστους παραλαβής μηνυμάτων. Από την άλλη, τα πειράματα που περιγράφονται στο [10] δεν υπολογίζουν τα αποτελέσματα του ελέγχου μετάδοσης ενέργειας, κατά την κατανάλωση ενέργειας στη διεπαφή δικτύου.

Οι υπολογισμοί για την κάρτα Aironet PC 4800B, η οποία υποστηρίζει πολλαπλά επίπεδα μετάδοσης ενέργειας, αναφέρονται στην [11]. Τα αποτελέσματα εμφανίζουν ότι καθώς μειώνεται το επίπεδο της εξερχόμενης ενέργειας από 50mW σε 1mW, η ενέργεια που καταναλώνεται από τον αποστολέα μειώνεται κατά περίπου 500mW. Αυτό αναπαριστά μόνο περίπου το 25% από το συνολικό ποσό καταναλισκόμενης ενέργειας, ενώ η αρχική κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται περίπου στο 70% της συνολικής. Από την άλλη πλευρά η κατανάλωση ενέργειας του παραλήπτη μπορεί να συγκριθεί με την αρχική και να θεωρηθεί προσεγγιστικά ανεξάρτητη των επιπέδων εκπεμπόμενης ισχύος.

Το συμπέρασμα της εργασίας [8], είναι ότι η μείωση της καταναλούμενης ενέργειας της δικτυακής διεπαφής, είναι απαραίτητη για να βρεθεί ένας τρόπος, ώστε να βρίσκεται για περισσότερο χρόνο στην κατάσταση “sleep” και λιγότερο χρονικό διάστημα στην κατάσταση “idle”.

2.1.1 Ενεργειακή εκφόρτιση μπαταρίας ασύρματης συσκευής

Στην εργασία [15] γίνεται αναφορά στα διαφορετικά μοντέλα χωρητικότητας μπαταρίας. Τα συγκεκριμένα μοντέλα περιγράφουν τον τρόπο χρήσης της χωρητικότητας μπαταρίας, βάσει του τρόπου εκφόρτισης των κυκλωμάτων κατανάλωσης ενέργειας της μπαταρίας. Σε μια προσπάθεια επικύρωσης των συγκεκριμένων μοντέλων, μπορούμε να χαρακτηρίσουμε μια εμπορικά διαθέσιμη μπαταρία λιθίου μέσα από συγκεκριμένες μετρήσεις του φέροντος και της εξόδου τάσης της, για διαφορετικά προφίλ κίνησης που εφαρμόζονται από έναν κόμβο – αισθητήρα. Στο αποτέλεσμα, παρουσιάζεται ο τρόπος που επηρεάζεται η χωρητικότητα από τα διαφορετικά προφίλ κίνησης και παρέχεται μια ανάλυση για το αν τα μοντέλα συμβατικών μπαταριών μπορούν να εφαρμοστούν στις σημερινές συνθήκες.

Μέσα από τη συγκεκριμένη εργασία αναλύεται ο τρόπος μοντελοποίησης μιας μπαταρίας. Σύμφωνα με την παρουσίαση, η συγκεκριμένη μοντελοποίηση οδηγεί στη δημιουργία των «γενεών» ενσωματώνοντας επιπλέον χαρακτηριστικά σε κάθε νέα γενεά που δημιουργείται. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να υποδειχθεί η μέγιστη χωρητικότητα, είναι η μονάδα Ah (Ampere*Hour). Το εν λόγω κριτήριο αποτελεί μια κοινή μέθοδο που χρησιμοποιείται ευρέως από τους κατασκευαστές για να καθορίσουν θεωρητικά τη συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας. Γνωρίζοντας τον τρόπο εκφόρτισης της μπαταρίας και τη συνολική χωρητικότητα σε Ah, μπορείτε να υπολογίσετε θεωρητικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας με χρήση της συνάρτησης.

$$T = \frac{C}{I} \quad (1)$$

όπου το T συμβολίζει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, το C τη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας που μετράται σε Ah, ενώ το I συμβολίζει το ρεύμα εκφόρτισης των κυκλωμάτων της μπαταρίας.

Τα τρία πιο ευρέως διαδεδομένα μοντέλα χωρητικότητας όπως αναφέρονται στο [15] είναι τα ακόλουθα:

1. Γραμμικό μοντέλο – 1^{ης} Γενιάς

Στο γραμμικό μοντέλο, η μπαταρία συμπεριφέρεται σαν γραμμική μονάδα αποθήκευσης. Η μέγιστη χωρητικότητα επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από την τιμή του ρυθμού εκφόρτισης. Το απλό μοντέλο επιτρέπει στο χρήστη να παρατηρήσει την πληροφορία του ποσού της ενέργειας που καταναλώνεται. Η υπολειπόμενη χωρητικότητα μετά τη διάρκεια λειτουργίας χρόνου t_d μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη εξίσωση 2:

$$E_{remaining}(\text{σε Ah}) = C = C' - \int_{t=t_0}^{t_0+t_d} I(t)dt \quad (2)$$

όπου C' είναι η προηγούμενη τιμή της χωρητικότητας και $I(t)$ είναι η στιγμιαία τιμή του ρεύματος εκφόρτισης του κυκλώματος της μπαταρίας στο χρόνο t .

Στο γραμμικό μοντέλο μπαταρίας υποθέτουμε ότι το $I(t)$ θα παραμείνει ίδιο για το χρονικό διάστημα t_d , εάν η κατάσταση λειτουργίας του κυκλώματος παραμείνει σταθερή, για παράδειγμα η κατάσταση της CPU να αλλάξει από ενεργή σε idle. Με αυτή την υπόθεση η εξίσωση (2) γίνεται:

$$C = C' - \int_{t=t_0}^{t_0+t_d} I(t)dt = C' - I * t_d \quad (3)$$

Η συνολική υπολειπόμενη χωρητικότητα υπολογίζεται όταν ο ρυθμός εκφόρτισης των κυκλωμάτων αλλάξει. Εφόσον το γραμμικό μοντέλο είναι το πιο απλό συχνά δεν είναι ιδιαίτερα ακριβές στην απεικόνιση της συμπεριφοράς μιας πραγματικής μπαταρίας με χαρακτηριστικά όπως ο βαθμός ανεξαρτησίας μεταξύ χωρητικότητας και εκφόρτισης (relaxation) της μπαταρίας.

2. Μοντέλο εξαρτημένο από το ρυθμό εκφόρτισης – 2^{ης} Γενιάς

Ενώ το γραμμικό μοντέλο λειτουργίας υποθέτει ότι η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας δεν επηρεάζεται από το ρυθμό εκφόρτισης, το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη του την επίδραση του ρυθμού εκφόρτισης στον υπολογισμό της χωρητικότητας της μπαταρίας. Στις εργασίες [16], [17] και [18] αναλύεται ο τρόπος μείωσης της χωρητικότητας, όσο αυξάνεται ο ρυθμός εκφόρτισής της. Προκειμένου να εξετάσουμε το πώς επιδρά ο ρυθμός εκφόρτισης, μπορούμε να εισάγουμε έναν παράγοντα k , που ουσιαστικά είναι ο παράγοντας που δηλώνει την αποδοτικότητα, η οποία καθορίζεται και συσχετίζεται με τον συγκεκριμένο ρυθμό.

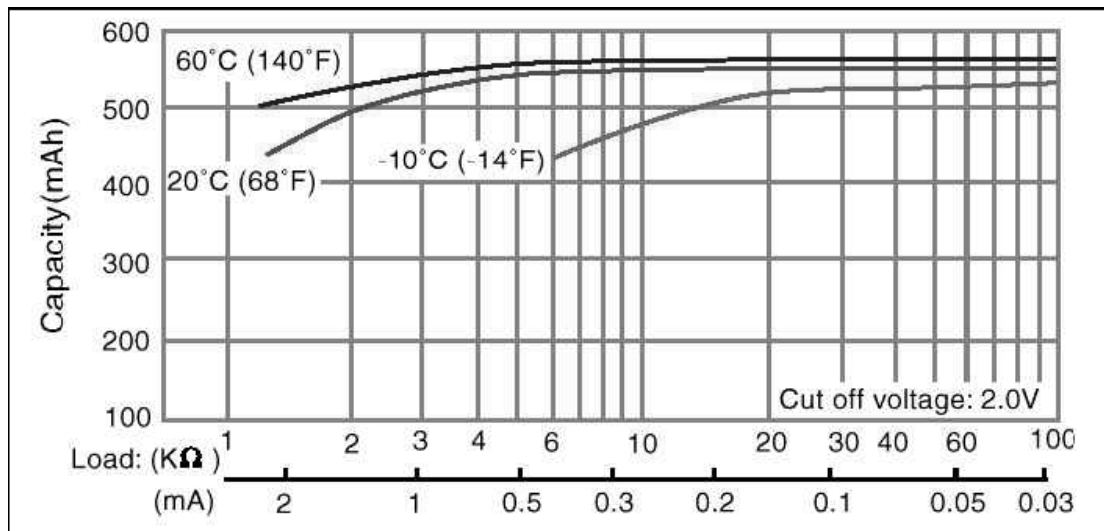
Το k υπολογίζεται ως εξής:

$$k = \frac{C_{eff}}{C_{max}} \quad (4)$$

όπου C_{eff} εκφράζει την ενεργή χωρητικότητα της μπαταρίας, ενώ ο παράγοντας C_{max} παρουσιάζει τη μέγιστη χωρητικότητα, ενώ και οι δύο όροι μετρούνται σε Ah (Ampere*hour). Η εξίσωση (2) για την περίπτωση του μοντέλου μπαταρίας που είναι εξαρτημένο από το ρυθμό εκφόρτισης παίρνει την εξής μορφή:

$$C = C' - I * t_d \quad (5)$$

Η αποδοτικότητα του παράγοντα k ποικίλει με την τρέχουσα τιμή του I να είναι κοντά στη μονάδα όσο ο ρυθμός εκφόρτισης παραμένει χαμηλός, ενώ προσεγγίζει το 0 όταν ο ρυθμός γίνεται μεγαλύτερος. Ένας τρόπος για να διευκρινιστεί ο λόγος ύπαρξης του παράγοντα k , είναι να αναλογιστεί κανείς τη χρήση καθοδηγούμενης από πίνακα μεθόδου, για διαφορετικές τιμές του I , όπως παρουσιάζεται στο [19]. Πιο αναλυτικά με αυτή τη μέθοδο ο παράγοντας k μπορεί να αναζητηθεί μέσω της γραφικής παράστασης που εμφανίζεται στην Εικόνα 6, η οποία παρουσιάζεται στο φύλλο δεδομένων (data sheet) του εκάστοτε κατασκευαστή, όπως παρουσιάζεται στο [20].



Εικόνα 6: Υπολογισμός k με χρήση καθοδηγούμενης από πίνακα μεθόδου.

Αυτό που ουσιαστικά εμφανίζεται στη συγκεκριμένη γραφική παράσταση είναι οι αλλαγές του παράγοντα C_{eff} σε σχέση με τους διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης I . Οποιαδήποτε στιγμή κριθεί αναγκαίος ο υπολογισμός της υπολειπόμενης χωρητικότητας, με χρήση της εξίσωσης (5), η τιμή του παράγοντα k μπορεί να εξαχθεί από τη γραφική λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική αποδοτικότητα της χωρητικότητας μπαταρίας για την τρέχουσα τιμή του I . Ένα μειονέκτημα του μοντέλου λειτουργίας μπαταρίας που αναλύουμε είναι ότι δεν απεικονίζει την πλήρη συμπεριφορά μιας πραγματικής μπαταρίας, αγνοώντας την επίδραση του φαινομένου της εκφόρτισης.

3. Μοντέλο Relaxation – 3^{ης} Γενιάς

Οι πραγματικές μπαταρίες επιδεικνύουν ένα γενικό φαινόμενο το οποίο αποκαλείται relaxation και παρουσιάζεται αναλυτικά στις εργασίες [16], [17] και [21]. Όταν διατηρηθεί ο συγκεκριμένος ρυθμός σε υψηλό επίπεδο, τότε η μπαταρία φτάνει στο τέλος της «ζωής» της, παρά το γεγονός ότι μπορεί κάποια από τα ενεργά στοιχεία της να είναι διαθέσιμα. Παρόλα αυτά, αν το φέρον εκφόρτισης της μπαταρίας σταματήσει ή μειωθεί κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, ο ρυθμός διάδοσης και μεταφοράς των ενεργών υλικών αυξάνεται με την εξάντληση των υλικών. Αυτό το φαινόμενο καλείται εξάντληση και παρέχει τη δυνατότητα στη μπαταρία να επανακάμψει την απώλεια χωρητικότητας κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης.

2.1.2 Μοντελοποίηση απωλειών ενέργειας κατά τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων

Σύμφωνα με την εργασία [22] εφόσον η ενέργεια είναι σπάνιος και μη ανανεώσιμος πόρος για τα ασύρματα ad hoc δίκτυα, η σχεδίαση ενεργητικά αποδοτικών πρωτοκόλλων είναι από τους πιο βασικούς στόχους και τις πιο σημαντικές προτεραιότητες. Η σχεδίαση και η ανάλυση της απόδοσης αυτών των πρωτοκόλλων, απαιτούν κατάλληλη μοντελοποίηση των παραγόντων κατανάλωσης ενέργειας. Στις εργασίες [10] και [12] παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης για διαφορετικές δικτυακές διεπαφές. Ως καταστάσεις λειτουργίας ενός κόμβου αναγνωρίζονται αυτές που προαναφέρθηκαν και στις προηγούμενες εργασίες (transmit, receive, idle και sleep).

Το κόστος που σχετίζεται με κάθε πακέτο σε ένα κόμβο παρουσιάζεται σαν το άθροισμα ενός αυξανόμενου παράγοντα κόστους m , ο οποίος αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος του πακέτου και ενός προκαθορισμένου κόστους b που σχετίζεται με το κανάλι. Οπότε προκύπτει η ακόλουθη συνάρτηση κόστους:

$$Cost = m * size + b \quad (6)$$

Βασίζόμενοι σε αυτό το ενεργειακό μοντέλο οι συγγραφείς G'eraud Allard et al, παρέθεσαν ένα απλό μοντέλο υπολογισμού της καταναλισκόμενης ενέργειας σε κάθε κόμβο, εξαιτίας των ροών δεδομένων του δικτύου. Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες τιμές για κατανάλωση ισχύος σε περιπτώσεις μετάδοσης και λήψης το προτεινόμενο μοντέλο δίνει με ακρίβεια τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας, σε ένα ιδανικό όμως δίκτυο, δηλαδή σε ασύρματο περιβάλλον όπου δεν υπάρχουν παρεμβολές και συγκρούσεις στην αποστολή δεδομένων. Οι συγγραφείς μέσα στην συγκεκριμένη εργασία παρουσίασαν και την περίπτωση αποτύπωσης της ενεργειακής κατανάλωσης σε ένα μη ιδανικό περιβάλλον, προκειμένου να έχουν σαφείς ενδείξεις για την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης λύσης.

Βάσει της ερευνητικής τους εργασίας, κατέληξαν ότι η ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε κόμβο εξαιτίας της ροής δεδομένων μπορεί να υπολογιστεί με έναν απλό τρόπο. Λαμβάνοντας υπόψη την αναπαράσταση της Εικόνα 7 και ανάλογα με το αν ο κόμβος N ανήκει σε μια ροή ή όχι και εάν στη ροή ο M επηρεάζει, τότε η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο N εξαιτίας του M μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

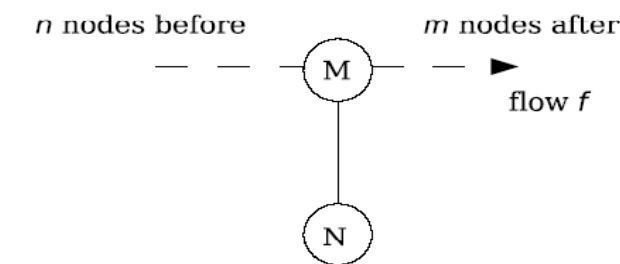
$$E_{N/M} = 1_{n>0} (1_{M=N} E_{Tack} + 1_{M \neq N} E_{Rack}) + 1_{m>0} (1_{M=N} E_{Tpck} + 1_{M \neq N} E_{Rpck})$$

όπου

- $E_{N/M}$ εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται στον κόμβο N εξαιτίας του κόμβου M ,
- E_{Tack} εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται κατά την μετάδοση ενός πακέτου επιβεβαίωσης (ACK)
- E_{Tpck} εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται για μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων
- E_{Rack} εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται για τη λήψη ενός πακέτου επιβεβαίωσης (ACK)
- E_{Rpck} εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται για τη λήψη ενός πακέτου δεδομένων

$$1_p = \begin{cases} 1 & \text{εάν το } p \text{ είναι αληθές} \\ 0 & \text{εάν το } p \text{ είναι ψευδές} \end{cases}$$

Η συγκεκριμένη μαθηματική μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε απλοποιεί τη διαδικασία ανταλλαγής πακέτων λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα και ACK πακέτα μόνο. Σε περίπτωση που συμπεριληφθούν και άλλα πακέτα, όπως RTS/CTS και ARP (Address Resolution Protocol), το σχετικό κόστος για τα συγκεκριμένα πακέτα πρέπει να συμπεριληφθεί για να επεκταθεί στο μοντέλο.



Εικόνα 7: Επίδραση στον κόμβο N εξαιτίας του κόμβου M λόγω ροής f

Στην εργασία [13] παρουσιάζεται μια αναλυτική μοντελοποίηση του κόστους απώλειας ενέργειας κατά τη μετάδοση και τη λήψη πακέτων σε ένα ασύρματο ad hoc περιβάλλον. Το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζεται στην εξίσωση (6) προσφέροντας μια γραμμική αναπαράσταση για τον υπολογισμό της απώλειας ενέργειας στην ανταλλαγή πακέτων. Το κόστος υπολογίζεται προσθετικά από τα κόστη της αποστολής πακέτων στους κόμβους-αποστολείς, έστω s και το αντίστοιχο λήψης στους κόμβους-παραλήπτες. Το σύνολο των πιθανών παραληπτών αποτελείται από τους point-to-point κόμβους προορισμού, έστω d , καθώς και κόμβους που βρίσκονται μέσα στην ακτίνα εκπομπής του αποστολέα s ($n \in S$) καθώς και τους κόμβους που βρίσκονται εντός ακτίνας εκπομπής του προορισμού d ($n \in D$). Τα σύνολα S και D είναι ιδιαίτερα δυναμικά στη δημιουργία τους.

Σε αυτό το σημείο προκειμένου να αναλυθούν διεξοδικότερα οι συναρτήσεις που σχετίζονται με την κατανάλωση ισχύος σε ένα ad hoc δίκτυο θα πρέπει να αναφερθούμε στην απώλεια ενέργειας κατά την ευρυεκπομπή κίνησης, την από άκρο σε άκρο κίνηση και την απόρριψη κίνησης.

- **Απώλεια ενέργειας κατά την ευρυεκπομπή δεδομένων**

Για την περίπτωση της IEEE 802.11 ευρυεκπομπή δεδομένων ο αποστολέας αφουγκράζεται την κίνηση στο κανάλι. Αν είναι ελεύθερος ο δίαυλος για μετάδοση, τότε ένα μήνυμα στέλνεται και παραλαμβάνεται από όλους τους κόμβους εντός ακτίνας μετάδοσης. Αν όμως ο δίαυλος δεν είναι ελεύθερος ο αποστολέας πρέπει να υποχωρήσει και να ξαναπροσπαθήσει μεταγενέστερα, η συγκεκριμένη περίπτωση δεν περιλαμβάνεται στην προτεινόμενη από την [13] μοντελοποίηση. Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 δεν καθορίζει ευρυεκπομπή μηνυμάτων επιβεβαίωσης (ACK) ή επαναμεταδόσεις. Αν ορίσουμε σαν προκαθορισμένο κόστος απώλειας ενέργειας στο κανάλι κατά τη μετάδοση σε bsend για την αποστολή μηνύματος και brecv για την παραλαβή και το αυξανόμενο φορτίο κόστους σε m_{send} και m_{recv} αντίστοιχα τότε η εξίσωση (6) θα γίνει:

$$Cost = m_{send} * size + b_{send} + \sum_{n \in S} (m_{recv} * size + b_{recv}) \quad (7)$$

- **Απώλεια ενέργειας κατά την από άκρο σε άκρο επικοινωνία**

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η σταθερά που υποδηλώνει το αυξανόμενο κόστος φορτίου msend και mrecv έχουν την ίδια τιμή με την αντίστοιχη της απώλειας ενέργειας κατά την ευρυεκπομπή δεδομένων. Για την από άκρο σε άκρο κίνηση, το προκαθορισμένο κόστος εμπεριέχει τόσο το κόστος για την πρόσβαση στο κανάλι όσο και την απώλεια που προκύπτει από τις διαπραγματεύσεις σε επίπεδο MAC (Medium Access Control – Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου), διαπραγματεύσεις που σχετίζονται με την πρόσβαση στο μέσο. Το κόστος πρόσβασης στο κανάλι θεωρείται το ίδιο με αυτό της περίπτωσης ευρυεκπομπής. Στο IEEE 802.11 MAC πρωτόκολλο, η πηγή-αποστολέας στέλνει ένα μήνυμα ελέγχου (RTS-Request To Send) υποδεικνύοντας τον προορισμό, ενώ από την πλευρά του ο κόμβος-προορισμός απαντά στέλνοντας στην πηγή ένα μήνυμα (CTS-Clear To Send). Με την παραλαβή του μηνύματος CTS η πηγή αποστέλλει τα δεδομένα, αναμένοντας ένα μήνυμα επιβεβαίωσης (ACK) από τον προορισμό. Για μεγαλύτερη απλότητα τα μικρά μηνύματα ελέγχου υποθέτουμε ότι έχουν τα ίδια προκαθορισμένα κόστη ($b_{sendctl}$) και ($b_{recvctl}$).

Το κόστος απώλειας ενέργειας στον αποστολέα θα είναι:

$$Cost = b_{sendctl} + b_{recvctl} + m_{send} * size + b_{send} + b_{recvctl} \quad (8)$$

Το κόστος απώλειας ενέργειας στον παραλήπτη θα είναι:

$$Cost = b_{recvctl} + b_{sendctl} + m_{recv} * size + b_{recv} + b_{sendctl} \quad (9)$$

Στην πράξη όμως τα μηνύματα μπορεί να χαθούν εξαιτίας συγκρούσεων ή άλλων απωλειών και το πρωτόκολλο παρέχει για το επίπεδο MAC επαναμετάδοση. Για αυτό το λόγο, κάθε στοιχείο του πρωτοκόλλου που εμφανίζεται στις εξισώσεις (8) μέχρι και (9) εμπεριέχουν έναν παράγοντα που δεν εμφανίζεται αλλά υπονοείται. Ο συγκεκριμένος παράγοντας αφορά $1+N_{\text{επαναμεταδόσεις/διπλοεγγραφές}}$. Χωρίζοντας τα μηνύματα ελέγχου με αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτός ο υπολογισμός των επαναμεταδόσεων.

• **Απώλεια ενέργειας κατά την απόρριψη δεδομένων**

Σε αυτή την περίπτωση οι κόμβοι που δεν αποτελούν προορισμούς και βρίσκονται στην εμβέλεια μετάδοσης είτε του αποστολέα είτε του παραλήπτη, «ακούν τυχαία» ένα μέρος ή όλη την κίνηση στο δίκτυο. Οι κόμβοι εντός εμβέλειας της πηγής, αλλά όχι του προορισμού, βάσει του προβλήματος του εκτεθειμένου τερματικού, «ακούν» μόνο τις μεταδόσεις του αποστολέα της ακολουθίας. Αντίστοιχα οι κόμβοι που βρίσκονται στην εμβέλεια του προορισμού, αλλά όχι του αποστολέα, σύμφωνα με το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού, «ακούν» αποκλειστικά και μόνο την αποστολή μηνυμάτων από την πλευρά του προορισμού.

Όπως τονίζεται στην συγκεκριμένη εργασία το ενεργειακό κόστος της απόρριψης δεδομένων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υλοποίηση του MAC επιπέδου. Για το IEEE 802.11 MAC πρωτόκολλο, οι κόμβοι εντός εμβέλειας του αποστολέα «ακούν» το RTS μήνυμα και δεδομένα και κόμβοι εντός εμβέλειας του παραλήπτη «ακούν» τα CTS και ACK μηνύματα.

Το κόστος απώλειας ενέργειας στους κόμβους που δεν αποτελούν προορισμό υπολογίζεται ως εξής:

$$Cost = \sum_{n \in S} b_{\text{discardctl}} + \sum_{n \in D} b_{\text{discardctl}} + \sum_{n \in S} (m_{\text{discard}} * \text{size} + b_{\text{discard}}) + \sum_{n \in D} b_{\text{discardctl}} \quad (10)$$

Στη χειρότερη περίπτωση τα m_{discard} και b_{discard} έχουν την ίδια τιμή με τα m_{recv} και b_{recv} αντίστοιχα. Ουσιαστικά αυτό που εννοείτε είναι ότι οι κόμβοι λαμβάνουν, και εν συνεχεία απορρίπτουν οποιοδήποτε πακέτο, για το οποίο αναγνωρίζουν ότι δεν είναι ο προορισμός. Μια πιο αποδοτική στρατηγική θα ήταν να επιτρέπεται στους κόμβους που δεν αποτελούν προορισμούς να εισέρχονται σε μια κατάσταση μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της δικτυακής κάρτας Lucent WaveLAN IEEE 802.11 χρησιμοποιείται η στρατηγική που περιγράφεται στο [10]. Βασισμένοι στο μέγεθος της πληροφορίας του μηνύματος ελέγχου, οι κόμβοι που δεν αποτελούν προορισμούς και βρίσκονται εντός εμβέλειας του αποστολέα εισέρχονται σε κατάσταση μειωμένης ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς μεταδίδονται τα δεδομένα. Μόνο οι κόμβοι εντός εμβέλειας του προορισμού δεν εφαρμόζουν την συγκεκριμένη τεχνική και απλά απορρίπτουν την πλευρά που δηλώνει προορισμό στο MAC πρωτόκολλο.

Στην εξίσωση (10) το προκαθορισμένο κόστος b_{discard} εμπεριέχει το κόστος που σχετίζεται με την κατάσταση μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας κατά την αποστολή δεδομένων. Η τιμή του m_{discard} είναι αρνητική, επειδή η συγκεκριμένη κατάσταση απαιτεί λιγότερη ενέργεια από την αντίστοιχη που απαιτείται στην idle κατάσταση, που είναι η προκαθορισμένη.

Όσο μεγαλύτερη χρονικά είναι η μετάδοση των δεδομένων τόσο περισσότερο χρονικό διάστημα παραμένει ο κόμβος στην συγκεκριμένη κατάσταση. Ειδικότερα,

για την περίπτωση της κάρτας Lucent WaveLAN IEEE 802.11 η κατάσταση μετάδοσης, απαιτεί λιγότερη κατανάλωση ενέργειας από ότι η idle, αλλά περισσότερο από την αντίστοιχη sleep. Ένας κόμβος που δεν αποτελεί προορισμό «ακούει» όλα τα δεδομένα κίνησης, είτε αποτελεί τον προορισμό είτε όχι, η συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας χαρακτηρίζεται στη βιβλιογραφία σαν promiscuous. Η διαφορά ανάμεσα στα b_{recv} , m_{recv} και $b_{discard}$, $m_{discard}$ αποτελεί μια απόδειξη της επιπρόσθετης ενεργειακής κατανάλωσης που σχετίζεται με τη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας.

Για κόμβους που δεν αποτελούν προορισμούς και λειτουργούν στην promiscuous κατάσταση, το κόστος απώλειας υπολογίζεται ως εξής:

$$Cost = \sum_{npromiscuous \in S} b_{discardctl} + \sum_{npromiscuous \in D} b_{discardctl} + \sum_{npromiscuous \in S} (m_{recv} * size + b_{recv}) + \sum_{npromiscuous \in D} b_{discardctl} \quad (11)$$

Τιμές συντελεστών που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς απώλειας ενέργειας

Οι προδιαγραφές των διεπαφών ασύρματων καρτών δικτύων δεν παρέχουν συντελεστές όπως καθορίζονται παραπάνω. Στην εργασία [24] παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις, που προέκυψαν μέσα από μια σειρά πειραμάτων, για την κατανάλωση της ισχύος ποικίλων (προ-IEEE 802.11) ασύρματων δικτυακών διεπαφών. Στα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος για τη μέτρηση της εισερχόμενης τάσης, ενώ διαφορετικών μεγεθών πακέτα στέλνονται και λαμβάνονται στο δίκτυο. Γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των συντελεστών απώλειας ενέργειας ανά πακέτο. Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας μιας ασύρματης δικτυακής διεπαφής βασισμένης στο IEEE 802.11, όπως αναλύεται στη σχετική εργασία [23]. Εξαιτίας της έμμεσης φύσης των υπολογισμών οι συγκεκριμένες τιμές παρουσιάζουν υψηλό βαθμό αβεβαιότητας, περίπου στο 10 με 15%. Παρόλα αυτά, παρέχουν μια καλή υπόδειξη για τον υπολογισμό κόστους πολύ σημαντικών για υψηλού επιπέδου αναλύσεις. Τα αποτελέσματα για τον υπολογισμό του γραμμικού μοντέλου συντελεστών για την αποστολή, λήψη και απόρριψη κίνησης εμφανίζονται στον Πίνακα 2. Ο συγκεκριμένος πίνακας, παρουσιάζει τις τιμές των συντελεστών που προκύπτουν και χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις (8) – (11).

Τέσσερα είναι τα βασικά ερωτήματα για τα οποία θα πρέπει οι σχεδιαστές πρωτοκόλλων να βρουν απαντήσεις:

1) Είναι το κόστος παραλαβής μηνύματος σημαντικό;

Το κόστος παραλαβής πακέτων είναι σημαντικό. Αν ληφθεί ένα μήνυμα ευρυστοιχίας από περισσότερους του ενός γείτονες, τότε το συνολικό κόστος της παραλαβής πακέτου είναι μεγαλύτερο από το κόστος αποστολής του. Το κόστος παραλαβής είναι πιθανό να αυξηθεί σύμφωνα με την τάση προς μεγαλύτερη ευαισθησία και τις δυνατότητες επεξεργασίας σήματος στον κόμβο-παραλήπτη.

2) Ποια είναι τα αντίστοιχα κόστη για μεγάλα ή μικρά πακέτα;

Το προκαθορισμένο κόστος αποστολής και παραλαβής πακέτου είναι σχετικά μεγάλο συγκρινόμενο με το οριακό κόστος. Για μικρά πακέτα μεγέθους 130 bytes όταν πρόκειται για ευρυστοιχία ή 230 bytes όταν η μετάδοση αφορά από άκρο σε άκρο επικοινωνία, το προκαθορισμένο κόστος είναι μεγαλύτερο από το οριακό κόστος αποστολής και παραλαβής. Αυτό υπονοεί ότι η δημιουργία και αποστολή μιας αίτησης μικρής διαδρομής ή ακόμα και ενός “hello” μηνύματος, είναι ιδιαίτερα

ακριβός μηχανισμός. Ουσιαστικά προτείνεται οι επικεφαλίδες της δρομολόγησης πηγής να είναι ανέξοδη αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας.

3) Ποιο είναι το κόστος απόρριψης πακέτων;

Απορρίπτοντας ένα πακέτο είναι γενικά πολύ λιγότερο δαπανηρό από ότι παραλαμβάνοντάς το. Αυτό βρίσκει πλήρη εφαρμογή στην περίπτωση των μεγάλων μηνυμάτων, επειδή οι κόμβοι που δεν αποτελούν προορισμό μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης των δεδομένων. Θα πρέπει να τονιστεί ότι κάποια από τα αποθέματα προκύπτουν από το εξαιρετικά υψηλό κόστος της idle διεπαφής κάρτας δικτύου και το γεγονός ότι οι ad hoc κόμβοι είναι εξαρχής διαμορφωμένη σε κατάσταση idle (και όχι σε sleep) κατάσταση. Παρόλα αυτά, ακόμα και αν το mdiscard ήταν 0, η παραλαβή κίνησης δεδομένων σε promiscuous κατάσταση παραλαβής θα ήταν περισσότερο ακριβή από ότι η απόρριψή της.

4) Ποιο το αντίστοιχο κόστος για ευρυεκπομπή και απ' άκρο σε άκρο κίνηση;

Όταν το κόστος της παραλαβής είναι σημαντικό, το αντίστοιχο της ευρυεκπομπής κίνησης, καθορίζεται από το κόστος στους κόμβους-παραλήπτες. Αυτό είναι ιδιαίτερα υψηλό σε ένα πυκνό δίκτυο. Η απ' άκρο σε άκρο κίνηση έχει υψηλότερο κόστος αποστολής (σχεδόν δύο φορές) και παραλαβής (σχεδόν έξι φορές) από ότι η κίνηση ευρυεκπομπής, αλλά επιτρέπει σε κόμβους που δεν αποτελούν προορισμούς να απορρίψουν την κίνηση. Αν το κόστος απόρριψης είναι υψηλό, τότε το πρωταρχικό πλεονέκτημα της απ' άκρο σε άκρο κίνησης είναι η αποφυγή σύγκρουσης και η αναγνώριση των δεδομένων. Αν από την άλλη είναι χαμηλό, τότε υπάρχουν σημαντικά ενεργειακά αποθέματα.

	$\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{byte}(\text{excl.MACheader})$	$\mu\text{W}\cdot\text{s}$
point-to-point send	$\text{Cost} = 1.9 \times \text{size} +$	420
broadcast send	$\text{Cost} = 1.9 \times \text{size} +$	250
point-to-point recv	$\text{Cost} = 0.42 \times \text{size} +$	330
broadcast recv	$\text{Cost} = 0.50 \times \text{size} +$	56
Κόμβοι που δεν αποτελούν προορισμούς $n \in S, D$		
promiscuous recv	$\text{Cost} = 0.39 \times \text{size} +$	140
Discard	$\text{Cost} = -0.49 \times \text{size} +$	97
Κόμβοι που δεν αποτελούν προορισμούς $n \in S, n \notin D$		
promiscuous recv	$\text{Cost} = 0.54 \times \text{size} +$	66
Discard	$\text{Cost} = -0.58 \times \text{size} +$	24
Κόμβοι που δεν αποτελούν προορισμούς $n \notin S, n \in D$		
promiscuous recv	$\text{Cost} = 0.0029 \times \text{size} +$	63
Discard	$\text{Cost} = -0.0058 \times \text{size} +$	56
Idle	$\text{Cost} = 808 \text{ mW}$	

Πίνακας 2: Παρουσίαση των τιμών των μετρήσεων για direct sequence spread spectrum γραμμικό μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας της κάρτας Lucent IEEE 802.11 WaveLAN PC card 2.4 GHz

Τιμές σταθερών που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις

Msend	1.89 mW·s/byte
Bsend	246 mW·s

Mrecv	0.494 mWs/byte
Brecv	56.1 mWs
mdiscard	-0.490 mW·s/byte
bdiscard	97.2 mW·s
mrecv_promisc	0.388 mW·s/byte
brecv_promisc	136 mW·s
bsendctl	120 mW·s
brecvctl	29.0 mW·s

Πίνακας 3: Τιμές σταθερών που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις

2.1.3 Αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη τους ενέργεια σε επίπεδο δικτύου

Αρκετές λύσεις έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία που σχετίζονται με τη διαδικασία διατήρησης ενέργειας και ελέγχου της κατανάλωσης. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι, λαμβάνοντας υπόψη τους τον τρόπο κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών, βάσει της χρήσης, αλλά και του διπλού ρόλου που παρουσιάζουν, προτείνουν σχήματα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, κατά την εκπομπή και την παραλαβή μηνυμάτων σε διαφορετικά επίπεδα διαστρωμάτωσης.

Στο επίπεδο δικτύου έχουν προταθεί αρκετά πρωτόκολλα που ενσωματώνουν στην πληροφορία δρομολόγησης επιπρόσθετη πληροφορία. Τα επιπλέον δεδομένα σχετίζονται με τον υπολογισμό της δαπανούμενης ενέργειας. Η συγκεκριμένη πληροφορία, ανάλογα με την προτεινόμενη υλοποίηση, υπολογίζεται με διαφορετικούς τρόπους. Το αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας επιλογής της βέλτιστης ενεργειακά διαδρομής, οδηγώντας στη μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου [62] [63].

Σε πρώτο στάδιο θα παρουσιάσουμε τις υλοποιήσεις που επέκτειναν γνωστούς αλγορίθμους δρομολόγησης. Όπως παρουσιάζεται στην εργασία [25], οι αλγόριθμοι ελέγχου τοπολογίας, υπολογίζουν μια δικτυακή τοπολογία με βασική τους θεώρηση ότι κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνεί με κάθε άλλο κόμβο χρησιμοποιώντας την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος μετάδοσης. Στην εργασία [26], δίνεται μια αναλυτική μαθηματική μοντελοποίηση για τον καθορισμό της εμβέλειας μετάδοσης r . Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στη θεώρηση του δικτύου ως πλήρως συνδεδεμένο, κάτι που στη θεωρία γράφων αναφέρεται σαν k -connected. Εναλλακτικά, στην [27] παρουσιάζεται μια μέθοδος υπολογισμού του μικρότερου από τους υπο-γράφους δικτύου. Ο συγκεκριμένος υπο-γράφος, ο οποίος περιέχει τη μικρότερη διαδρομή από το σύνολο των διαδρομών του δικτύου μεταξύ ζευγών κόμβων, εκλαμβάνεται ως η ελάχιστη τοπολογία ενέργειας.

Στην εργασία [28] παρουσιάζεται μια μέθοδος δύο φάσεων, η οποία αρχικά στο πρώτο βήμα επιλέγει έναν κόμβο σαν σημείο συγκέντρωσης πληροφοριών για όλους τους κόμβους του δικτύου. Εν συνεχεία εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος διατήρησης ενέργειας, προκειμένου να δημιουργηθεί η ελάχιστη τοπολογία ισχύος μεταξύ του συγκεκριμένου κόμβου και όλων των υπολοίπων. Αναλυτικότερα κάθε κόμβος αρχικά επιλέγει τα πιθανά σύνολα από άμεσους γείτονες όπου η δρομολόγηση διαμέσου αυτών γίνεται με την ελάχιστη απαίτηση ενέργειας. Επιπρόσθετα κάθε κόμβος θα μεταδώσει το κόστος κατανάλωσης ενέργειας στους γείτονές του ώστε να διευκολύνει τον κατανεμημένο αλγόριθμο εύρεσης μονοπατιού Bellman-Ford, στην επιλογή του γείτονα με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους κατανάλωσης

ενέργειας. Οι αλγόριθμοι πλέγματος-ομαδοποίησης επιτυγχάνουν διατήρηση ενέργειας χρησιμοποιώντας ένα συντονιστή συμπλέγματος για να καθορίσουν χρονικά με χρονοπρογραμματισμό την κατάσταση sleeping/wakeup και προώθησης /buffer πακέτων για τα μέλη της ομάδας. Ένας αλγόριθμος για το πρόβλημα των συνδεδεμένων κυρίαρχων συνόλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή συντονιστή μιας ομάδας, όπως αναφέρεται στην εργασία [29]. Όπως περιγράφεται στην εργασία [30], καθώς η τιμή αλλαγής κατάστασης είναι υψηλή, ένα σχήμα χρονοπρογραμματισμού μπορεί να σχεδιαστεί για να προγραμματιστούν χρονικά οι κόμβοι για τις καταστάσεις sleep και awake με τρόπο ώστε ένας κόμβος που θέλει να μεταδώσει, του επιτρέπεται να το κάνει, για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, πριν αλλάξει η κατάσταση του από κόμβος-αποστολέα σε παραλήπτη. Ένας διπλός μηχανισμός ομαδοποίησης προτάθηκε στην εργασία [31], όπου ο συντονιστής της ομάδας πρώτα επιλέγει τα μέλη της βασισμένος σε επίπεδα λαμβανόμενης ισχύος από τους υπόλοιπους κόμβους. Οι κόμβοι που δεν αποτελούν μέλη δεν θα συνδεθούν στο δίκτυο. Όταν ο συντονιστής αναθέσει κανάλια στα μέλη, θα ξεκινήσει τη διαδικασία δεύτερης ανάθεσης καναλιών με όσα του έχουν απομείνει μετά την πρώτη καταχώρηση. Οι κόμβοι που δεν είναι μέλη και είχαν απορριφθεί στον πρώτο γύρο, μπορούν να επιβεβαιώσουν την ύπαρξή τους για δεύτερη φορά ώστε να επιλεγθούν. Οι συντονισμένες προσπάθειες για διατήρηση ενέργειας όπως αναφέρεται στην εργασία [32] βοηθούν στην ίδρυση μιας δικτυακής υποδομής με τους κόμβους υποδομής να είναι υπεύθυνοι για τον συντονισμό αποκλειστικά και μόνο των δραστηριοτήτων sleeping και awake των κόμβων που δεν ανήκουν στην υποδομή.

Για να προστατευθούν οι κόμβοι υποδομής από την υπερβολική εξάντληση, εξαιτίας των επιπρόσθετων δραστηριοτήτων συντονισμού πρέπει εκ περιτροπής να αναλαμβάνουν το ρόλο τους σαν κόμβοι υποδομής. Στην εργασία [33] αναλύεται μια επέκταση του αλγορίθμου δρομολόγησης βάσει πηγής, του γνωστού DSR (Dynamic Source Routing). Η συγκεκριμένη επέκταση αφορά την εισαγωγή της απαιτούμενης ενέργειας στους υπολογισμούς για την εύρεση της αιτούμενης διαδρομής, ενώ η αρχιτεκτονική που προκύπτει ονομάζεται PSR (Power-aware Source Routing).

Ο PSR προσπαθεί να βρει μια διαδρομή wz, με τρόπο ώστε οι καθορισμένες συναρτήσεις κόστους της διαδρομής να ελαχιστοποιηθούν. Όλοι οι κόμβοι εκτός από τον προορισμό υπολογίζουν τα κόστη των συνδέσμων τους και τα προσθέτουν στο κόστος διαδρομής, πρόσθεση που πραγματοποιείται στην ετικέτα του πακέτου Route Request του DSR (RREQ πακέτο). Οποιοσδήποτε ενδιαμέσος κόμβος λαμβάνει ένα RREQ πακέτο καταγράφει την ανανεωμένη και μικρότερου κόστους πληροφορία αντίστροφης διαδρομής, βάσει της πληροφορίας, για το κόστος διαδρομής που περιέχεται στην ετικέτα του RREQ πακέτου. Ο κόμβος προορισμός θα απαντήσει με την πληροφορία μικρότερου κόστους προς την πηγή εντός ενός προκαθορισμένου χρονικού ορίου. Ο PSR θα σταθεροποιήσει τη διαδρομή ακόμα και αν η τιμή της ενέργειας ενός κόμβου πέσει κάτω από ένα προ-καθορισμένο όριο, το οποίο τίθεται συνήθως πάνω από την περίπτωση διακοπής της σύνδεσης.

Μια διαφορετική προσέγγιση για τη συντήρηση της ενέργειας στο επίπεδο δικτύου σχετίζεται με τη χρησιμοποίηση τεχνικών συνεργασίας. Το αντικείμενο των συγκεκριμένων μεθόδων, είναι να επιβάλλουν τη συνεργασία μεταξύ των κόμβων, στην προώθηση πακέτων δεδομένων, ώστε κανένας κόμβος να μην χρησιμοποιηθεί με υπερβολικό και άδικο τρόπο, οδηγώντας σε γρήγορη ενεργειακή εξάντληση.

Τα συστήματα Nuglet [34] και [35], καθώς και SPRITE [36], προτείνουν μια μέθοδο ανταμοιβής, όπου κάθε κόμβος χρειάζεται πίστωση για να μεταδώσει ένα πακέτο που δημιούργησε ο ίδιος. Μπορεί όμως να κερδίσει την απαιτούμενη πίστωση, μέσω της

προώθησης πακέτων που αφορούν άλλους κόμβους. Η διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων έγκειται στο γεγονός ότι ενώ το Nuglet χρησιμοποιεί κρυπτογραφημένο λογισμικό/ υλικό για τη δημιουργία προστατευμένων ετικετών ασφαλείας, το SPRITE καταργεί την επιπρόσθετη απαιτούμενη ασφάλεια λογισμικού/ υλικού σε κάθε κόμβο, χρησιμοποιώντας ένα κεντρικό εξυπηρετητή για την έκδοση και τον υπολογισμό των πιστώσεων.

Το CONFIDANT [37] είναι ένα σύστημα τιμωρίας, στο οποίο, αν ένας κόμβος αρνηθεί να συνεργαστεί στην προώθηση πακέτων για άλλους, στιγματίζεται. Στη συνέχεια, οι υπόλοιποι κόμβοι δεν βοηθούν στην προώθηση πακέτων αυτούς που έχουν στιγματιστεί. Ένα πρόβλημα που ανακύπτει για το συγκεκριμένο σύστημα είναι ότι, αν κάποιος κόμβος δεν επιθυμούν να επικοινωνήσουν ή δεν χρειάζεται να βασιστούν σε άλλους κόμβους, τότε δεν τους ενοχλεί να στιγματιστούν προκειμένου να διατηρήσουν την ενέργειά τους για προσωπική χρήση.

Στην εργασία [25] όπως και στην [65], επιλέγεται ο AODV(Ad hoc On Demand distance Vector), ο οποίος επεκτείνεται προκειμένου η αναζήτηση διαδρομής να γίνεται με χρήση ενεργειακών κριτηρίων. Η επιλογή βασίστηκε στο γεγονός ότι πρόκειται για έναν αποδοτικό αλγόριθμο δρομολόγησης που δεν δημιουργεί κίνηση παρά μόνο αν είναι απολύτως αναγκαίο και αφαιρεί γρήγορα οποιαδήποτε πληροφορία θεωρείται παρωχημένη και δεν είναι χρήσιμη. Επιπλέον ο AODV μπορεί να αντιδράσει άμεσα σε τυχόν μεταβολές της τοπολογίας που επηρεάζουν τις ενεργές διαδρομές. Λαμβάνοντας υπόψη τις αναλύσεις – μετρήσεις αποδεικνύεται ότι ο AODV λειτουργεί καλύτερα σε σενάρια με περισσότερο φόρτο ή/και υψηλότερη κινητικότητα κόμβων, ενώ όσο αυξάνεται η κλιμάκωση, δηλαδή μεγαλώνει το δίκτυο, λειτουργεί αποδοτικότερα από τον DSR, όπως αναφέρεται και στην εργασία [38].

Στο προτεινόμενο σχήμα του AODV που λαμβάνει υπόψη του την κατανάλωση ενέργειας ή αλλιώς του PAW-AODV όπως χαρακτηρίζεται, δημιουργείται μια συνάρτηση κόστους που βασίζεται στη διαθέσιμη ενέργεια μπαταρίας κόμβου. Στην εξίσωση (12) που περιγράφεται η συγκεκριμένη συνάρτηση το $c_i(t)$ και το $b_i(t)$ εκφράζουν τη συνάρτηση κόστους και την υπολειπόμενη ενέργεια μπαταρίας αντίστοιχα για τον κόμβο n_i τη χρονική στιγμή t . Αν χρησιμοποιηθεί η (12), θα δημιουργηθεί ένα ενημερωτικό μήνυμα αλλαγής κόστους, σε οποιαδήποτε στιγμή μειωθεί η διαθέσιμη ισχύς μπαταρίας και η διαθέσιμη ενέργεια μπαταρίας, ενώ ταυτόχρονα η συνάρτηση κόστους του κόμβου μεταβάλλεται για κάθε κόμβο. Με αυτό τον τρόπο ο έλεγχος της κίνησης που δημιουργείται εξαιτίας της διαδικασίας σύνθεσης και αποστολής μηνυμάτων-ανακοινώσεων θα είναι δύσκολος με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο φόρτος του δικτύου. Επιπρόσθετα η συνάρτηση κόστους του κόμβου δεν θα έχει τη δυνατότητα να σταθεροποιηθεί εξαιτίας των συχνών αλλαγών που θα υποστεί. Επειδή η λύση αυτή δεν έχει τα αναμενόμενα πρακτικά αποτελέσματα στη συγκεκριμένη εργασία προτάθηκε η έννοια του διαχωρισμού της συνάρτησης κόστους σε διαφορετικές ζώνες.

$$c_i(t) = \frac{1}{b_i(t)} \quad \text{για κάθε κόμβο } n_i \quad (12)$$

Η συγκεκριμένη ιδέα οδηγεί στον καθορισμό ζωνών, βάσει ενός συγκεκριμένου εύρους διαθεσιμότητας ενέργειας και εν συνεχεία αναθέτει ένα προκαθορισμένο κόστος κόμβου σε κάθε ζώνη. Το κόστος ζώνης δεν μεταβάλλεται για όσο χρονικό διάστημα το όριο της ζώνης δεν υπερβαίνεται. Στην εξίσωση (13) που ακολουθεί αναφέρονται οι διαφορετικές περιπτώσεις και οι αντίστοιχες τιμές για τη συνάρτηση κόστους, ανάλογα με την επιλεγμένη ζώνη.

$$c_i(t) = \begin{cases} CR & \text{για } b_i(t) > 0.3B \\ 2CR & \text{για } 0.2B < b_i(t) \leq 0.3B \\ 4CR & \text{για } 0.1B < b_i(t) \leq 0.2B \\ \infty & \text{για } b_i(t) \leq 0.1B \end{cases} \quad (13)$$

Ο παράγοντας B αναφέρεται στην τιμή της αρχικής ενέργειας όταν η μπαταρία είναι γεμάτη, ενώ το CR δηλώνει το προκαθορισμένο κόστος ενός κόμβου, το οποίο μπορεί να τεθεί σε $CR=1$ χωρίς βλάβη της γενικότητας. Όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση 13 υπάρχουν 4 ζώνες κόστους που σχετίζονται με την συνάρτηση $c_i(t)$. Αυτό είναι ιδιαίτερα αποδοτικό, όταν βασίζεται στην τρέχουσα διαθέσιμη ισχύς μπαταρίας $b_i(t)$ του κόμβου n_i , έχοντας σαν αναφορά το επίπεδο μέγιστης ισχύος μπαταρίας. Το συγκεκριμένο επίπεδο τίθεται στην τιμή B .

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση όπου ο κόμβος έχει ικανοποιητικά υψηλή ισχύ ($b_i(t) > 0.3B$), στην περιοχή της λευκής ζώνης). Σε αυτή την περίπτωση ο προτεινόμενος αλγόριθμος PAW-AODV συμπεριφέρεται ακριβώς όπως ο AODV, όπου η συνάρτηση κόστους είναι το ίδιο αποδοτική όσο η περίπτωση άμεσης σύνδεσης, ενός βήματος, μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Όταν η διαθέσιμη ενέργεια ενός κόμβου κατατάσσεται σε μια από τις επόμενες ζώνες (π.χ. την κίτρινη ζώνη) το κόστος προσεγγίζει τιμή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σύνδεσης ενός βήματος ανάμεσα σε άμεσα προσβάσιμους γειτονικούς κόμβους. Το συγκεκριμένο υψηλό κόστος θα αποθαρρύνει τους κόμβους – πηγές από τη δρομολόγηση διαμέσου των αντίστοιχων που εισήλθαν στην κίτρινη ζώνη συναγερμού. Ο αριθμός των «κίτρινων» ζωνών συναγερμού που θα υλοποιηθεί εξαρτάται από τον αριθμό των ορίων επιπέδων ενέργειας που θέλει ένας σχεδιαστής συστήματος να υλοποιήσει. Βέβαια στη συγκεκριμένη εργασία έχουν υλοποιηθεί μόνο 2 «κίτρινες» ζώνες συναγερμού. Η κόκκινη ζώνη ($b_i(t) < 0.1B$) προσεγγίζεται όταν η διαθέσιμη ισχύς του κόμβου είναι πολύ χαμηλή. Όταν ένας κόμβος βρίσκεται σε αυτή τη ζώνη αυτόματα υποδεικνύεται ότι έχει πολύ υψηλό κόστος αποτρέποντας άλλους να δρομολογήσουν πακέτα μέσω αυτού. Η συνάρτηση κόστους που περιγράφεται στην εξίσωση (14) αφορά το άθροισμα των συναρτήσεων κόστους του κόμβου (13) των ενδιάμεσων κόμβων της διαδρομής. Χρησιμοποιώντας αυτό τον τρόπο καθορισμού του κόστους διαδρομής, ο σκοπός του PAW-AODV είναι να συνδυάσει τους κατάλληλους αλγορίθμους ανίχνευσης διαδρομής στον AODV, προκειμένου να βρει μια διαδρομή r με το ελάχιστο κόστος $c(r, t)$, ή με το υψηλότερο επίπεδο υπολειπόμενης ενέργειας. Η συνάρτηση κόστους $c(r, t)$ περιγράφεται ακολούθως:

$$c(r, t) = \sum c_i(t) \text{ για κάθε κόμβο } n_i \text{ που βρίσκεται στη διαδρομή } r \quad (13)$$

Ανακάλυψη διαδρομής με χρήση του PAW-AODV

Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί η διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής στο προτεινόμενο σχήμα του AODV με ενεργειακές προεκτάσεις. Η συγκεκριμένη διαδικασία εκκινείται όποτε ένας κόμβος – πηγή θέλει να επικοινωνήσει με έναν κόμβο – προορισμό για τον οποίο δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες δρομολόγησης στον αντίστοιχο πίνακα. Ο κόμβος προορισμός θα στείλει με ευρυεκπομπή ένα πακέτο αιτήματος (RREQ) δρομολόγησης στους γείτονές του. Η επέκταση του AODV ουσιαστικά προτείνει την ενσωμάτωση ενός πεδίου $TcrpREQ$ στο RREQ, προσθετικά στα ορίσματα και τα πεδία που περιέχονται στο αρχικό RREQ μήνυμα του αλγορίθμου. Η αρχική τιμή του πεδίου είναι 0, ενώ όταν το RREQ δημιουργείται από την πηγή και το περιεχόμενό του χτίζεται από κόμβο σε κόμβο αποτυπώνοντας το άθροισμα από τα κόστη των κόμβων διαμέσου των οποίων περνάει το RREQ μήνυμα καθώς μεταδίδεται στο δίκτυο.

Στον PAW-AODV όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος παραλάβει ένα RREQ μήνυμα που αναγνωρίζει ότι το έχει παραλάβει σε προηγούμενη αποστολή, π.χ. ένα RREQ που έχει το ίδιο αναγνωριστικό ευρυ-εκπομπής ή την ίδια διεύθυνση πηγής, απλά απορρίπτει το πακέτο και δεν το προωθεί.

Για τον καθορισμό της αντίστροφης διαδρομής, αν το RREQ πακέτο έχει περισσότερες σχετικές πληροφορίες ανανέωσης ή αν η τιμή του $TcrRREQ$ είναι μικρότερη από αυτή που έχει καταγραφεί στο $TcrRoutingTable$, τότε η τιμή του πεδίου της υπάρχουσας αντίστροφης διαδρομής στον πίνακα δρομολόγησης ενός κόμβου, θα ανανεωθεί. Αν ένας ενδιαμέσος κόμβος n_i έχει μια ανανεωμένη διαδρομή προώθησης, τότε μόλις παραληφθεί ένα RREQ πακέτο, ο κόμβος θα απαντήσει με ένα πακέτο απάντησης διαδρομής (RREP). Οι πιο σημαντικές από τις προς μετάδοση πληροφορίες διαδρομής, εμπεριέχουν τις τιμές $TcrRREQ$ το κόστος της αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή, το κόστος για την διαδρομή προώθησης προς τον κόμβο προορισμό, καθώς και το κόστος για τον κόμβο $c_i(t)$ που βρίσκεται μέσα στο πεδίο $TcrRREP$ του RREP πακέτου. Η τελευταία πληροφορία χρησιμοποιείται προκειμένου να υποδείξει το συνολικό κόστος διαδρομής από την πηγή στον προορισμό. Αν το RREQ πακέτο φτάσει στον προορισμό, ενώ κανένας ενδιαμέσος κόμβος δεν έχει τις πληροφορίες δρομολόγησης ο προορισμός θα απαντήσει με ένα RREP πακέτο. Το συγκεκριμένο πακέτο περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες προώθησης διαδρομής του AODV. Η τιμή του πεδίου $TcrRREQ$, που προέκυψε κατά τον υπολογισμό του κόστους της διαδρομής από την πηγή στον προορισμό, θα αντιγραφεί στο πεδίο $TcrRREP$. Όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος παραλάβει ένα RREP πακέτο θα καταγράψει ή θα ανανεώσει τις πληροφορίες προώθησης διαδρομής του AODV στον πίνακα δρομολόγησης, μέσω του πεδίου $TcrRoutingTable$ όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (14). Η αρχική τιμή του $AcrrRp$ είναι η τιμή του $TcrRREQ$ όταν ένας κόμβος (ενδιάμεσος ή προορισμός) δημιουργεί ένα πακέτο RREP κατά την παραλαβή ενός RREQ πακέτου.

$$\begin{aligned} TcrRoutingTable &= TcrRREP - AcrrREP \\ AcrrREP &= AcrrREP - c_i(t) \end{aligned} \quad (14)$$

Ανακεφαλαιώνοντας, ο PAW-AODV είναι ένας ενεργειακά αποδοτικός αλγόριθμος για MANETs. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, πιστοποιείται ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορεί να μεταδώσει περισσότερα πακέτα, εφόσον λαμβάνει υπόψη του την ενέργεια, χωρίς να προκαλεί φαινόμενα αύξησης καθυστέρησης στο δίκτυο. Η κινητικότητα μπορεί να προκαλεί προβλήματα καθώς αναδιανέμονται τα ενεργειακά υπόλοιπα των κόμβων λόγω αλλαγής της θέσης τους. Πρακτικά μπορεί να αυξηθούν οι αποστολές πακέτων στο δίκτυο. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η συμφόρηση στο δίκτυο, θα μπορούσε να τεθεί ένα κατάλληλο όριο από αριθμό βημάτων, τόσο για τον AODV όσο και για τον PAW-AODV για τη διατήρηση της ενέργειας αυξάνοντας την αποστολή πακέτων σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα.

Αντίστοιχα στο [39] οι συγγραφείς προτείνουν την επέκταση του Dynamic Source Routing (DSR). Το DSR ανήκει στην κατηγορία των οδηγούμενων από τη ζήτηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Η διαδικασία αναζήτησης διαδρομής εκκινείται μετά από αίτημα της πηγής – αποστολέα. Το προτεινόμενο σχήμα της μελέτης, ονομάζεται Power-aware Source Routing (PSR) και στόχο έχει να επεκτείνει την ζωή ενός MANET, συνυπολογίζοντας στην διαδικασία αναζήτησης διαδρομής ενεργειακά κριτήρια. Προκειμένου να γίνει εφικτή η μεγιστοποίηση της ζωής ενός ασύρματου

δικτύου, προστατεύοντας του κόμβους από ενεργειακό «θάνατο», θα πρέπει να δημιουργηθεί μια συνάρτηση κόστους που θα επιλύει το πρόβλημα εύρεσης διαδρομής p σε χρόνο ανακάλυψης διαδρομής t και θα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$C(\pi, t) = \sum_{i \in \pi} C_i(t) \quad (15)$$

$$\text{όπου } C_i(t) = \rho_i \left(\frac{F_i}{R_i(t)} \right)^a \quad (16)$$

ρ_i : ισχύς μετάδοσης του κόμβου i

F_i : χωρητικότητα μπαταρίας πλήρως φορτισμένης του κόμβου i

R_i : υπολοιπόμενη χωρητικότητα μπαταρίας για τον κόμβο i στο χρόνο t

a : θετικός παράγοντας βαρών

Στον DSR η επιλογή διαδρομής γίνεται βάσει της μικρότερης διαδρομής π.χ. εύρεση της διαδρομής με τα λιγότερα βήματα, όπου το μόνο κριτήριο για να τεθεί ανενεργή είναι η κινητικότητα των κόμβων. Αντίθετα στον PSR τόσο η κινητικότητα όσο και η ενεργειακή εξάντληση των κόμβων μπορεί να προκαλέσει την ακύρωση μιας διαδρομής. Η ανακάλυψη αλλά και η διατήρηση μιας διαδρομής στον PSR είναι περισσότερο πολύπλοκη, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες διαδικασίες στον DSR. Στον DSR η διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής ξεκινά με τον κόμβο – πηγή να «πλημμυρίζει» το δίκτυο με πακέτα RREQ, όταν η πηγή επιθυμεί να στείλει δεδομένα. Ένας ενδιαμέσος κόμβος μεταδίδει με ευρυ-εκπομπή το RREQ πακέτο εκτός αν συμβεί κάτι από τα ακόλουθα:

- Βρεθεί μονοπάτι προς τον προορισμό από τη μνήμη του,
- Έχει επαναμεταδώσει το συγκεκριμένο RREQ πακέτο. Για να το κατανοήσει αυτό ο ενδιαμέσος κόμβος, θα πρέπει να ελεγχθεί ο ακολουθιακός αριθμός του RREQ καθώς και το αναγνωριστικό του αποστολέα.

Συνεπώς οι ενδιαμέσοι κόμβοι απλά προωθούν το πρώτο RREQ πακέτο που θα παραλάβουν. Ο κόμβος προορισμός απαντάει στο πρώτο RREQ που θα παραλάβει, εφόσον τα πακέτα τείνουν να ακολουθήσουν την πιο σύντομη διαδρομή.

Στον PSR όλοι οι κόμβοι εκτός από τον προορισμό υπολογίζουν το κόστος του συνδέσμου C_{ij} , που περιγράφεται στην εξίσωση 16 και την προσθέτουν στο κόστος μονοπατιού που περιέχεται στην ετικέτα του RREQ πακέτου, όπως περιγράφεται στην εξίσωση 15. Όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος παραλάβει ένα RREQ πακέτο, ξεκινάει μια χρονοσφραγίδα (Tr), που διατηρεί το κόστος στην ετικέτα του πακέτου σαν Min-Cost, δηλαδή ελάχιστο κόστος. Αν καταφθάσουν επιπρόσθετα RREQs με τον ίδιο προορισμό και τον ίδιο ακολουθιακό αριθμό, το κόστος των προσφάτως αφιχθέντων RREQ πακέτων, συγκρίνονται με το ελάχιστο κόστος (Min-Cost). Αν το νέο πακέτο που αφίχθηκε, έχει μικρότερο κόστος, τότε η παράμετρος Min-Cost θα μεταβληθεί λαμβάνοντας τη μικρότερη τιμή. Σε αντίθετη περίπτωση το νέο RREQ πακέτο απλά θα απορριφθεί.

Ο προορισμός αναμένει το όριο της χρονοσφραγίδας (Tr) για κάποια δευτερόλεπτα μετά την άφιξη του πρώτου RREQ πακέτου. Κατά τη διάρκεια του χρόνου αναμονής ο προορισμός ελέγχει το κόστος της διαδρομής για κάθε πακέτο RREQ που λαμβάνει. Όταν ο χρόνος εξαντληθεί ο κόμβος προορισμός επιλέγει τη διαδρομή με το ελάχιστο κόστος και απαντάει μέσω αυτής. Ακολουθώντας θα απορρίψει τα επόμενα RREQs. Η απάντηση θα περιέχει επιπρόσθετη πληροφορία με το κόστος των μονοπατιών που έχουν επιλεγεί για τη συγκεκριμένη επικοινωνία. Κάθε κόμβος που «ακούει» την απάντηση διαδρομής προσθέτει τη διαδρομή μαζί με το κόστος της, στον πίνακα της

μνήμης που περιέχει τις διαδρομές. Παρά το γεγονός ότι το σχήμα που έχει περιγραφεί μπορεί να αυξήσει την καθυστέρηση των δεδομένων που μεταφέρονται, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται. Η πιο σημαντική παράμετρος της μελέτης σχετίζεται με τη ζωή του δικτύου. Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν διαφορετικές παραμέτρους, προκειμένου να μελετήσουν τα αποτελέσματα που έχουν στη ζωή του δικτύου, που αποτελεί το βασικό κριτήριο της μελέτης.

Σε αυτό το σημείο καλό θα ήταν να αναλυθεί η έννοια της ζωής του δικτύου. Ο συγκεκριμένος όρος μπορεί να έχει διάφορες ερμηνείες:

- I. Μπορεί να καθοριστεί ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένα ποσοστό $K\%$ των κόμβων να τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω ενεργειακής εξάντλησης.
- II. Μπορεί να καθοριστεί ως ο χρόνος που απαιτείται μέχρι τον ενεργειακό «θάνατο» του πρώτου κόμβου.
- III. Μπορεί να καθοριστεί ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε όλοι οι κόμβοι του δικτύου να τεθούν εκτός λειτουργίας εξαιτίας ενεργειακής εξάντλησης.

Μετά την προσομοίωση του νέου αλγορίθμου του PSR τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι αυξάνεται η ζωή του δικτύου, κατά έως και 30%. Μια πολιτική απληστίας εφαρμόστηκε για να επιστρέφει μονοπάτια από την κρυφή μνήμη, προκειμένου να βεβαιωθεί ότι κανένα από τα μονοπάτια δεν θα χρησιμοποιηθεί σε υπερβολικό βαθμό. Επίσης απαιτείται προκειμένου να βεβαιωθεί ότι κάθε ένα από τα επιλεγμένα μονοπάτια έχει το ελάχιστος κόστος μπαταρίας, συγκρινόμενο με όλες τις υπόλοιπες πιθανές διαδρομές μεταξύ των δύο κόμβων, δηλαδή την πηγή και τον προορισμό.

2.1.4 Πρωτόκολλα ανακάλυψης διαδρομής βάσει υπολειπόμενης ενέργειας

Ο βασικός στόχος της εργασίας [40] είναι η επέκταση της ζωής ενός ad hoc κινητού δικτύου, κατανέμοντας με δίκαιο τρόπο το ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας κάθε κόμβου. Ταυτόχρονα η πρόταση οδηγεί σε μείωση της συνολικής ισχύος που καταναλώνεται κατά τη μετάδοση κάθε αιτήματος μέσω της ζεύξης. Αυτά τα δύο κριτήρια στις υπάρχουσες υλοποιήσεις και προτάσεις της βιβλιογραφίας δεν ικανοποιούνται. Στο συγκεκριμένο άρθρο παρουσιάζεται ένα καινούργιο πρωτόκολλο δρομολόγησης που βασίζεται στην ενέργεια, προκειμένου να ικανοποιήσει με τυχαίο τρόπο τους δύο περιορισμούς που αναφέρθηκαν.

Παρουσιάζονται συγκριτικά στοιχεία διαφορετικών τύπων πρωτοκόλλων δρομολόγησης που λαμβάνουν υπόψη τους ενεργειακούς περιορισμούς. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων επιβεβαιώνουν την ανάγκη αποκατάστασης ισορροπίας ανάμεσα στην διαθεσιμότητα της υπηρεσίας σε όλο το δίκτυο, έναντι της ζωής των κινητών συσκευών του ad hoc δικτύου.

Στο επίπεδο δικτύου, οι αλγόριθμοι δρομολόγησης πρέπει να επιλέξουν το καλύτερο μονοπάτι για να επιτευχθεί από τη μια πλευρά η μείωση της απαιτούμενης ισχύος κατά τη μετάδοση πακέτων δεδομένων και από την άλλη η μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου. Ακολουθώντας παρουσιάζονται τέσσερις προσεγγίσεις για την επιλογή διαδρομής, προσπαθώντας να καλυφθεί είτε ένας ή και οι δύο στόχοι που προαναφέρθηκαν.

2.1.4.1 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστης ισχύος μετάδοσης (Minimum Total Transmission Power – MTPR)

Στις ασύρματες επικοινωνίες η μετάδοση ραδιοσυχνότητας, μπορεί να μοντελοποιηθεί αποδοτικά, χρησιμοποιώντας τον παράγοντα μετάδοσης ισχύος $1/d^n$, όπου το n παίρνει την τιμή 2 για μικρή απόσταση, και την τιμή 4 για μεγαλύτερη απόσταση. Προκειμένου να θεωρηθούν επιτυχημένες οι αποστολές πακέτων δεδομένων θα πρέπει η αναλογία σήματος προς θόρυβο (signal to noise ration – SNR), για το σήμα που λαμβάνεται σε έναν κόμβο n_j , να είναι μεγαλύτερο από το όριο ψ_j που έχει προκαθοριστεί. Μάλιστα η τιμή του συγκεκριμένου κατωφλίου έχει τεθεί κοντά στο bit error rate (BER) του λαμβανόμενου σήματος.

Προκειμένου να θεωρούνται επιτυχημένες οι μεταδόσεις από τον κόμβο n_i στον κόμβο n_j θα πρέπει η τιμή του SNR για τον κόμβο n_j να είναι η ακόλουθη:

$$SNR_j = \frac{P_i G_{i,j}}{\sum_{k \neq i} P_k G_{k-j} + \eta_j} \Psi_j(BER) \quad (17)$$

όπου το P_i δηλώνει την ισχύ μετάδοσης του κόμβου n_i , το $G_{i,j}$ δηλώνει το κέρδος στο μονοπάτι μεταξύ των κόμβων n_i και n_j π.χ. $G_{i,j} = 1/d_{ij}^n$, ενώ το η_j υποδηλώνει το θόρυβο που προκαλείται από τη θερμότητα στον κόμβο n_j .

Για αυτό το λόγο, η ελάχιστη ισχύς μετάδοσης εξαρτάται τόσο από τον θόρυβο που προκαλείται τόσο από την παρεμβολή, όσο και από την απόσταση μεταξύ των κόμβων, αλλά και από το επιθυμητό BER. Για να γίνει εφικτή η εύρεση της διαδρομής που καταναλώνει την ελάχιστη συνολική ενέργεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βασικό κριτήριο, όπως αναφέρουν και οι συγγραφείς της μελέτης [41], η ενέργεια μετάδοσης μεταξύ των κόμβων n_i και n_j , $P(n_i, n_j)$. Η συνολική ισχύς μετάδοσης για μια διαδρομή l , P_l μπορεί να προκύψει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_l = \sum_{i=0}^{D-1} P(n_i, n_{i+1}) \quad (18)$$

για όλους τους κόμβους n_i που ανήκουν στη συγκεκριμένη διαδρομή.

Στην εξίσωση (18) το n_0 και το n_D υποδηλώνουν τους κόμβους πηγή και προορισμό αντίστοιχα. Για αυτό το λόγο η επιθυμητή διαδρομή k μπορεί να προκύψει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_k = \min_{l \in A} P_l \quad (19)$$

όπου το A συμβολίζει το σύνολο με όλες τις διαθέσιμες διαδρομές.

Η εξίσωση 19 μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας έναν από τους γνωστούς αλγόριθμους εύρεσης σύντομου μονοπατιού, όπως Dijkstra ή Bellman Ford. Στην μελέτη [42] παρουσιάζεται μια μετατροπή του αλγορίθμου Dijkstra, προκειμένου να υπολογίζεται τη διαδρομή ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι η ισχύς μετάδοσης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των κόμβων, η οποία είναι αντίστοιχη του d^n . Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος θα επιλέξει τη διαδρομή με τα περισσότερα βήματα, σε σχέση με άλλους αλγόριθμους. Αυτό συνεπάγεται αύξηση των ενδιάμεσων κόμβων μεταξύ πηγής και προορισμού και αντίστοιχα αύξηση του χρόνου καθυστέρησης απ' άκρο εις άκρο. Θα πρέπει να τονιστεί ότι μια διαδρομή με πολλούς ενδιάμεσους κόμβους, θεωρείται ασταθής, εξαιτίας της πιθανής κινητικότητας τους. Από την άλλη όμως αν χρησιμοποιηθεί σαν βασικό κριτήριο ο αριθμός βημάτων από την πηγή στον προορισμό τότε οι διαδρομές που δημιουργούνται δεν θεωρούνται πολύ ελκυστικές, εφαρμόζοντας τις προαναφερθείσες ενεργειακές επεκτάσεις στον dijkstra.

Προκειμένου να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, η ισχύς του πομπού, δηλαδή η ισχύς λήψης δεδομένων, καθώς και η ισχύς μετάδοσης πακέτων, μοντελοποιούνται με τη χρήση μιας συνάρτησης κόστους και της κατανεμημένης μορφής του αλγορίθμου Bellman-Ford, όπως παρουσιάζεται και στη μελέτη [43]. Η συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους για τον κόμβο n_j έχει την ακόλουθη μορφή:

$$C_{i,j} = P_{transmit}(n_i, n_j) + P_{tranceiver}(n_j) + Cost(n_j) \quad (20)$$

όπου n_i είναι ένας γειτονικός κόμβος του n_j , το $P_{tranceiver}(n_j)$ είναι η ισχύς λήψης δεδομένων στον n_j και $Cost(n_j)$ είναι το συνολικό ενεργειακό κόστος για τη διαδικασία μετάδοσης δεδομένων από την πηγή και λήψης από τον προορισμό. Στον κόμβο n_i ο υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος μετάδοσης-προώθησης των πακέτων δεδομένων υπολογίζεται ως εξής:

$$Cost(n_i) = \min_{j \in NH(i)} C_{i,j} \quad (21)$$

όπου $NH(i) = \{j, \text{ για } n_j \text{ γειτονικό κόμβος του } n_i\}$.

Το μονοπάτι που θα επιλεγεί από το συγκεκριμένο αλγόριθμο, θα είναι αυτό που ελαχιστοποιεί το κόστος, της χρησιμοποιούμενης συνάρτησης, από την πηγή στον κόμβο n_j . Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι επαναλαμβανόμενη μέχρι να βρεθεί ο προορισμός και να σχηματιστεί η διαδρομή. Στον αλγόριθμο ο παράγοντας $P_{tranceiver}(n_j)$ χρησιμοποιείται προκειμένου να βρεθεί η διαδρομή με τα λιγότερα βήματα, καθώς η ισχύς λήψης έχει την ίδια τιμή για περιπτώσεις κόμβων με ίδια χαρακτηριστικά πομποδέκτη.

2.1.4.2 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστου κόστους μπαταρίας (Minimum Battery Cost Routing – MBCR)

Η συνολική ισχύ μετάδοσης είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό κριτήριο, επειδή σχετίζεται με την ενεργειακή «ζωή» των κινητών κόμβων. Χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο κριτήριο μπορεί να μειωθεί η ενέργεια που καταναλώνεται συνολικά στο δίκτυο, κάτι τέτοιο όμως δεν αντανakλά άμεσα στην επέκταση ή τη διατήρηση της ζωής κάθε κόμβου ξεχωριστά. Αν οι διαδρομές ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας, δρομολογούνται διαμέσου ενός συγκεκριμένου κόμβου, τότε όπως είναι φυσικό η μπαταρία του συγκεκριμένου κόμβου θα εξαντληθεί γρήγορα. Για αυτό το λόγο η υπολειπόμενη χωρητικότητα μπαταρίας του κάθε κόμβου, είναι ένα πιο ακριβές κριτήριο για την περιγραφή της ζωής κάθε κόμβου του δικτύου [43].

Ας υποθέσουμε ότι το c_i^t είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας ενός κόμβου n_i για χρόνο t με εύρος 0 και 100. Η συνάρτηση κόστους για τον κόμβο n_i μπορεί να καθοριστεί σαν $f_i(c_i^t)$. Επίσης μπορούμε να υποθέσουμε ότι η πρόθεση ενός κόμβου να προωθήσει πακέτα αποτελεί συνάρτηση της υπολειπόμενης χωρητικότητας μπαταρίας. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της χωρητικότητας, τόσο πιο απρόθυμος θεωρείται ο κόμβος για μετάδοση.

Όπως έχει ήδη προταθεί μια πιθανή επιλογή μοντελοποίησης της συνάρτησης κόστους είναι:

$$f_i(c_i^t) = \frac{1}{c_i^t} \quad (22)$$

όσο μειώνεται η τιμή της χωρητικότητας, τόσο η τιμή της συνάρτησης κόστους για τον κόμβο n_i αυξάνεται. Η τιμή της συνάρτησης κόστους μπαταρίας R_j για τη διαδρομή i , που αποτελείται από D κόμβους, θα είναι:

$$R_j = \sum_{i=0}^{Dj-1} f_i(c_i^t) \quad (23)$$

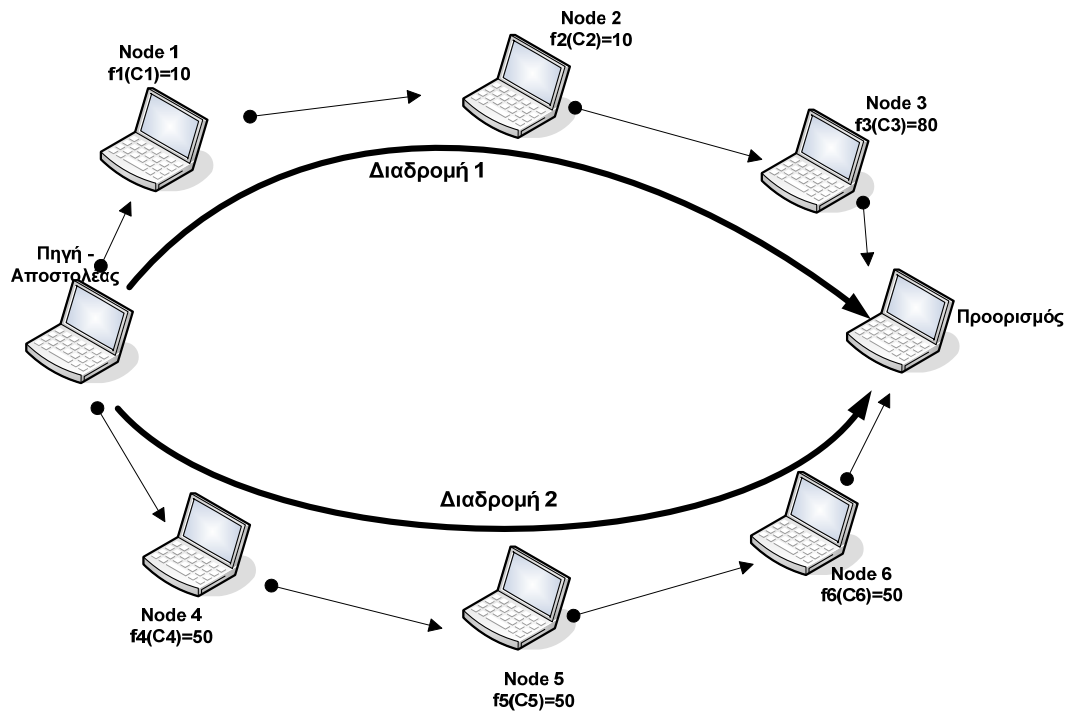
Για αυτό το λόγο, προκειμένου να βρεθεί μια διαδρομή με τη μέγιστη υπολειπόμενη χωρητικότητα μπαταρίας, θα πρέπει να επιλεγεί η διαδρομή i που θα έχει την ελάχιστη τιμή στη συνάρτηση κόστους μπαταρίας, δηλαδή θα πρέπει:

$$R_i = \min \{R_j \mid j \in A\} \quad (24)$$

όπου το A δηλώνει το σύνολο που περιέχει όλες τις πιθανές διαδρομές.

Εφόσον η χωρητικότητα της μπαταρίας ενσωματώνεται άμεσα στο πρωτόκολλο δρομολόγησης σαν βασική παράμετρος, καθορίζοντας το όριο χρήσης ενός κόμβου, προστατεύοντας με αυτό τον τρόπο τον κόμβο από υπερβολική χρήση, όπως σημειώνεται στην ίδια μελέτη. Στην περίπτωση όπου όλοι οι κόμβοι έχουν ίδια τιμή χωρητικότητας τότε η διαδρομή επιλέγεται βάσει άλλου κριτηρίου και πιο συγκεκριμένα βάσει του αριθμού βημάτων που απαιτούνται από την πηγή προς τον προορισμό. Επειδή λαμβάνεται υπόψη μόνο το άθροισμα των τιμών των συναρτήσεων κόστους μπαταρίας, θα επιλεγεί μια διαδρομή που περιέχει κόμβους με ελάχιστη υπολειπόμενη ενέργεια. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8 υπάρχουν δύο πιθανές διαδρομές ανάμεσα σε οποιονδήποτε κόμβο πηγή και προορισμό.

Παρά το γεγονός ότι ο κόμβος 3 έχει πολύ λιγότερη υπολειπόμενη χωρητικότητα ενέργειας σε σχέση με άλλους κόμβους, η τιμή της συνάρτησης κόστους μπαταρίας συνολικά στη διαδρομή 1 είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της διαδρομής 2. Για αυτό το λόγο τελικά βάσει του αλγορίθμου επιλέγεται η διαδρομή 1, η οποία όμως μειώνει τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής του κόμβου 3.



Εικόνα 8: Παράδειγμα παρουσίασης για χρήση κριτηρίου επιλογής διαδρομής ελάχιστου αριθμού βημάτων

2.1.4.3 Πρωτόκολλο δρομολόγησης ελάχιστου-μέγιστου κόστους μπαταρίας (Min-max battery cost routing – MMBCR)

Προκειμένου να γίνει σίγουρο ότι κανένας κόμβος δεν θα χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, η εξίσωση 23 μπορεί να μετατραπεί όπως αναφέρεται στη μελέτη [43]. Με

βάση τις προτεινόμενες μετατροπές τελικά η συνάρτηση κόστους της μπαταρίας θα είναι η εξής:

$$R_j = \max_{i \in \text{route}_j} f_i(c_i^t) \quad (25)$$

Αντίστοιχα η επιλογή της διαδρομής i ουσιαστικά θα γίνει σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_i = \min \{R_j \mid j \in A\} \quad (26)$$

Εφόσον ο αλγόριθμος προσπαθεί να αποφύγει τη διαδρομή που περιέχει κόμβους με την ελάχιστη υπολειπόμενη χωρητικότητα ανάμεσα σε όλους τους κόμβους, όλων των πιθανών διαδρομών, η μπαταρία θα χρησιμοποιηθεί πιο δίκαια συγκρινόμενη με τα προαναφερθέντα σχήματα. Αρχικά φαίνεται ότι η ζωή όλων των κόμβων θα αυξηθεί. Εξετάζοντάς όμως πιο αναλυτικά καταλήγουμε ότι εφόσον δεν υπάρχει καμιά εγγύηση, ότι θα επιλεγθούν σε κάθε περίπτωση τα μονοπάτια με τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, μπορεί τελικά η κατανάλωση ενέργειας να είναι μεγαλύτερη οδηγώντας στη μείωση των κόμβων του δικτύου.

2.1.4.4 Πρωτόκολλο δρομολόγησης με χρήση όρων μέγιστης-ελάχιστης χωρητικότητας μπαταρίας (Conditional Max-Min Battery Capacity Routing CMMBCR)

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος στόχο έχει να μεγιστοποιήσει τη ζωή του κάθε κόμβου, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα με δίκαιο τρόπο τις μπαταρίες των κόμβων. Όπως περιγράφουν και οι συγγραφείς της μελέτης αυτοί οι δύο στόχοι δεν μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση των προσεγγίσεων MTPR και MBCR που προαναφέρθηκαν. Ο MBCR μπορεί σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις να εκπληρώσει τους συγκεκριμένους στόχους. Για να επιλυθούν ταυτόχρονα και οι δύο στόχοι, προτείνεται η χρήση σαν κριτήριο επιλογής διαδρομής της χωρητικότητας μπαταρίας, αντί για τη συνάρτηση κόστους, και με αυτό τον τρόπο δημιουργείται το σχήμα του CMMBCR. Η βασική ιδέα του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ότι όταν όλοι οι κόμβοι στις πιθανές διαδρομές από την πηγή στον προορισμό έχουν ικανοποιητικό ενεργειακό υπόλοιπο, πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο, τότε θα επιλεγθεί η διαδρομή με την ελάχιστη ενέργεια μετάδοσης από το σύνολο των διαθέσιμων.

Αν όλες οι διαδρομές έχουν κόμβους με χαμηλή χωρητικότητα μπαταρίας, και μάλιστα χαμηλότερη από το προκαθορισμένο όριο, τότε οι διαδρομές που περιέχουν κόμβους με την πιο χαμηλή τιμή χωρητικότητας μπαταρίας θα πρέπει να αποφεύγονται, προκειμένου να αυξηθεί ο χρόνος ζωής των εν λόγω κόμβων. Η χωρητικότητα μπαταρίας R_j^c για τη διαδρομή j ορίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_j^c = \min_{i \in \text{route}_j} c_i^t \quad (27)$$

Αν θεωρήσουμε ότι το A υποδηλώνει το σύνολο που περιέχει όλες τις πιθανές διαδρομές και έστω ότι ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$R_j^c \geq \gamma \text{ για οποιαδήποτε διαδρομή } j \in A \quad (28)$$

όπου το γ συμβολίζει το προκαθορισμένο όριο το οποίο έχει εύρος τιμών μεταξύ 0 και 100.

Έστω ότι το Q συμβολίζει το σύνολο από όλες τις διαθέσιμες διαδρομές μεταξύ ενός καθορισμένου κόμβου πηγή και ενός κόμβου προορισμού, στο χρόνο t . Σε αυτή την περίπτωση :

- Αν $A \cap Q \neq \Phi$ σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι σε κάποιες διαδρομές διαθέτουν υπολειπόμενη χωρητικότητα μπαταρίας μεγαλύτερη από το προκαθορισμένο

όριο γ . Τότε η επιλογή από το σύνολο των διαδρομών που ανήκουν στο σύνολο $A \cap Q$ θα γίνει χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο MTPR.

- Σε κάθε άλλη περίπτωση επιλέγεται μια διαδρομή i με τη μέγιστη χωρητικότητα μπαταρίας $R_i^c = \max \{R_j^c \mid j \in Q\}$. Αν $\gamma=0$ τότε η εξίσωση (28) ισχύει πάντα και το κριτήριο που χρησιμοποιείται τελικά είναι το ίδιο με το αντίστοιχο του MTPR. Από την άλλη αν $\gamma=100$ τότε η εξίσωση (28) είναι πάντα μη αληθής και το χρησιμοποιούμενο κριτήριο είναι το ίδιο με το αντίστοιχο που χρησιμοποιείται στον MMBCR, επειδή τελικά αποφεύγονται οι διαδρομές που περιέχουν κόμβους με τη χαμηλότερη τιμή υπολειπόμενης χωρητικότητας μπαταρίας.

Το γ μπορεί να χαρακτηριστεί σαν όριο ασφαλείας. Αν η χωρητικότητα μπαταρίας κάποιων κόμβων είναι χαμηλότερη από αυτή την τιμή, τότε θα αποφευχθεί η επιλογή του συγκεκριμένου κόμβου. Συνεπώς η απόδοση του CMMBCR εξαρτάται από την τιμή του γ .

2.2 Ανακάλυψη υπηρεσίας (Service Discovery)

Ως *υπηρεσία (service)* θεωρούμε κάθε πόρο (είτε υλικό - hardware είτε λογισμικό - software) που θεωρείται προπελάσιμος μέσω δικτύου και είναι ικανός να αποστείλει ή να παραλάβει δεδομένα. Αναφερόμαστε στους κόμβους που «φιλοξενούν» υπηρεσίες ως «παρόχους υπηρεσιών» (service providers ή απλά servers) και στους κόμβους που «τρέχουν» εφαρμογές και υπηρεσίες ως «πελάτες» ή χρήστες (clients).

Η ανακάλυψη υπηρεσίας (service discovery) είναι η διαδικασία εύρεσης μιας υπηρεσίας που ικανοποιεί κάποιες επιθυμητές ιδιότητες και η αντιστοίχισή της με την τοποθεσία της υπηρεσίας (service location). Η τοποθεσία αποτελείται συνήθως από μια διεύθυνση και από τη θύρα όπου διοχετεύονται οι εισερχόμενες αιτήσεις (π.χ. 174.15.2.1:80). Επειδή μπορεί να υπάρχουν πολλαπλά αντίγραφα της ίδιας υπηρεσίας στο δίκτυο και καθώς μια περιγραφή υπηρεσίας μπορεί να ταιριάζει σε παρόμοιες υπηρεσίες, η διαδικασία ανακάλυψης υπηρεσίας οδηγεί σε πολλαπλές αντιστοιχίσεις. Ένας πελάτης επιλέγει ένα συγκεκριμένο πάροχο μεταξύ των πολλών διαθέσιμων αντιστοιχήσεων βάσει διαφόρων κριτηρίων. Τα πιο χαρακτηριστικά κριτήρια είναι οι συγκεκριμένες απαιτήσεις της υπηρεσίας (π.χ. ο λιγότερο «φορτωμένος» εκτυπωτής) ή οι παράμετροι του δικτύου (π.χ. εύρος ζώνης, βήματα μεταξύ των κόμβων).

Για να γίνει πιο κατανοητή η έννοια της ανακάλυψης υπηρεσίας, παραθέτουμε ένα παράδειγμα από την καθημερινότητα. Ας υποθέσουμε ότι αναζητούμε τον τηλεφωνικό αριθμό ενός προσώπου, τότε μπορούμε να τον αναζητήσουμε στην ατζέντα μας και αν υπάρχει μπορούμε να τον καλέσουμε. Σε περίπτωση όμως που ο τηλεφωνικός αριθμός δε βρίσκεται στην ατζέντα μας, μπορούμε να τον ψάξουμε στον τηλεφωνικό κατάλογο, να τον αναζητήσουμε σε μια σχετική ιστοσελίδα του διαδικτύου, να καλέσουμε τις πληροφορίες καταλόγου ή να ρωτήσουμε φίλους ή συγγενείς του. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε αναζήτηση της υπηρεσίας σε μια τοποθεσία (ατζέντα) και παράδοση της υπηρεσίας από έναν πάροχο, ενώ στην δεύτερη περίπτωση έχουμε πολλαπλούς παρόχους και τοποθεσίες για την εξυπηρέτηση του χρήστη.

Ωστόσο, στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα δεν υπάρχει πάντα αφθονία στην εξεύρεση διαθέσιμων παρόχων όπως φαίνεται και στη σχετική βιβλιογραφία [44] ή, ακόμα και όταν υπάρχει, θα πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος πάροχος. Έτσι στην περίπτωση τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, όπου πολλαπλές αντιστοιχίσεις της ίδιας υπηρεσίας παρέχονται από διαφορετικούς εξυπηρετητές (π.χ. υπάρχει η ίδια πληροφορία σε διαφορετικές τοποθεσίες), ο χρήστης πρέπει να επιλέξει έναν

συγκεκριμένο πάροχο της υπηρεσίας βάσει διαφόρων κριτηρίων. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του πελάτη, μπορεί να είναι είτε παράμετροι δικτύου είτε ο αριθμός των βημάτων από κόμβο σε κόμβο είτε η φυσική απόσταση μεταξύ εξυπηρετητή και πελάτη. Η τελευταία παράμετρος θα ήταν χρήσιμη σε κινητά περιβάλλοντα, όπου η δρομολόγηση είναι βασισμένη όχι μόνο στον αριθμό των βημάτων που θα κάνει ένα μήνυμα από την πηγή στον προορισμό, αλλά και στην απόσταση μεταξύ των κόμβων.

Η κυριότερη λοιπόν πρόκληση και απαίτηση είναι για τους χρήστες να ανακαλύπτουν υπηρεσίες, να τις εντοπίζουν μεταξύ χιλιάδων παρόμοιων και τελικά να αλληλεπιδρούν με ασφαλή τρόπο ώστε να τις χρησιμοποιήσουν. Αυτή η αλληλεπίδραση πρέπει να γίνει χωρίς προηγούμενη ή με ελάχιστη γνώση λεπτομερειών του δικτυακού περιβάλλοντος.

Διάφοροι ερευνητές τα περασμένα χρόνια έχουν ψάξει για λύσεις στο πρόβλημα της αυτόματης ανακάλυψης υπηρεσιών. Σήμερα, υπάρχουν δεκάδες πρωτόκολλα ανακάλυψης υπηρεσιών (Service Discovery Protocols). Ένας ορισμός τους δίνεται από τη wikipedia [45]: «**Service discovery** protocols are network protocols which allow automatic detection of devices and services offered by these devices on a computer network». Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα αναζήτησης υπηρεσίας θεωρούνται δικτυακά πρωτόκολλα, που επιτρέπουν τον αυτόματο εντοπισμό τόσο των συσκευών όσο και των προσφερόμενων υπηρεσιών σε ένα δίκτυο υπολογιστών. Κάποια από αυτά έχουν αναπτυχθεί εμπορικά όπως το SLP [46], το Jini [47], το Salutation [48], το Universal Plug and Play (UPnP) [49], και το Bluetooth SDP [50]. Άλλα έχουν προταθεί όπως το DEAPspace [51], το MARE [52], το Splendor [53] και το Konark [54]. Το σίγουρο είναι πως κανένα πρωτόκολλο δεν αντιμετωπίζει όλα τα πιθανά προβλήματα. Το κάθε πρωτόκολλο εξειδικεύεται και επιλύει μέρος των παρουσιαζόμενων προβλημάτων, και εφαρμόζεται καλύτερα σε διαφορετικά σύνολα δικτυακών παραμέτρων.

2.2.1 Ανακάλυψη υπηρεσίας σε MANETs

Τα ad hoc δίκτυα, όπως έχουμε πει, είναι δυναμικά δίκτυα και χαρακτηρίζονται από υψηλή κινητικότητα των κόμβων και συχνές αλλαγές στην τοπολογία τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με τους ενεργειακούς περιορισμούς, αποτρέπουν την εφαρμογή των κλασσικών πρωτοκόλλων ανακάλυψης υπηρεσιών. Συνεπώς αλγόριθμοι όπως το SLP και το Jini, δεν προσφέρουν αποδοτικές λύσεις για ανακάλυψη και παράδοση υπηρεσίας στα MANETs, τουλάχιστον με την παραδοσιακή κεντροποιημένη μορφή τους [61], [64].

Η ύπαρξη DAs (Directory Agents) από τη μία και Lookup servers αυξάνουν την πολυπλοκότητα στην εύρεση παρόχων. Επιπλέον η αποστολή μηνυμάτων για αίτηση υπηρεσίας (SrvReq) αυξάνει την κίνηση στο δίκτυο οδηγώντας ταυτόχρονα σε αύξηση της δαπανώμενης ενέργειας των κόμβων.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι πρέπει να βρεθούν λύσεις που προτείνουν αποκεντρωμένες (decentralized) αρχιτεκτονικές όπου ο κάθε κόμβος δεν πρέπει να εξαρτάται από άλλον για να διαφημίσει τις υπηρεσίες του. Κάθε υπηρεσία πρέπει να είναι αυτόνομη παρέχοντας τη δυνατότητα εύκολης και γρήγορης ανακάλυψης από τον χρήστη.

Οι προτεινόμενες λύσεις για ανακάλυψη υπηρεσίας σε ad hoc δίκτυα, βασίζονται στην υλοποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης που επιτυγχάνουν και προώθηση πακέτων και ανακάλυψη υπηρεσιών. Μηχανισμοί καθολικής (broadcast) και πολλαπλής (multicast) εκπομπής χρησιμοποιούνται ευρέως σε αυτά τα δίκτυα.

Παραδείγματα είναι το πρωτόκολλο Bluetooth SDP, το Konark, το GSD, και το DEAPspace. Λύση αποτελεί και η υλοποίηση του γνωστού SLP με μία αποκεντρωμένη (decentralized) προσέγγιση.

2.2.1.1 Bluetooth SDP

Το Bluetooth SDP [50] αναπτύχθηκε από το Bluetooth Special Interest Group (SIG). Το πρωτόκολλο αυτό βρίσκει εφαρμογή σε συσκευές που υποστηρίζουν τη τεχνολογία Bluetooth. Ο πελάτης αιτείται μιας υπηρεσίας απευθείας με τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της γνωρίσματα. Όλες οι αντίστοιχες υπηρεσίες απαντούν επιτρέποντας έτσι στο χρήστη να τις εντοπίσει. Διαμεσολαβητές (directories) δεν υπάρχουν. Το εν λόγω πρωτόκολλο όμως δεν επιτρέπει άμεση πρόσβαση και χρήση αυτών των υπηρεσιών, απαιτώντας τη συνεργασία με άλλους αλγορίθμους.

Ειδικότερα, το πρωτόκολλο αυτό ορίζει πώς ένας πελάτης μπορεί να ψάξει για μια υπηρεσία βασισμένος σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (attributes) αυτής. Ωστόσο, δε χρειάζεται να γνωρίζει εκ των προτέρων τις διαθέσιμες υπηρεσίες. Όλες οι πληροφορίες για μια υπηρεσία, διατηρούνται σε έναν SDP Server μέσα σε μία μοναδική εγγραφή (service record). Η εγγραφή αυτή περιλαμβάνει μια λίστα από τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας. Κάθε service attribute περιγράφει ένα γνώρισμα της συγκεκριμένης υπηρεσίας.

Στο Bluetooth SDP, η ανακάλυψη υπηρεσίας παίρνει δύο ερμηνείες. Η μία είναι το *searching for services* που σημαίνει αναζήτηση συγκεκριμένων υπηρεσιών. Η διαδικασία αυτή γίνεται από τους πελάτες που αναζητούν τιμές των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων κάθε υπηρεσίας. Παρέχεται η δυνατότητα αναζήτησης attributes, των οποίων η τιμή είναι συγκεκριμένο UUID. Το service search είναι λοιπόν μια λίστα από UUIDs που χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν τις υπηρεσίες που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις.

Η άλλη ερμηνεία είναι το *Browsing for Services* που σημαίνει η αναζήτηση του ποιες υπηρεσίες παρέχονται εκείνη τη στιγμή. Ο μηχανισμός του browsing βασίζεται σε ένα attribute που είναι κοινό σε όλες τις κλάσεις υπηρεσιών και τα οποίο καλείται BrowseGroupList attribute. Η τιμή του περιέχει μία λίστα από UUIDs. Κάθε UUID αναπαριστά μια ομάδα φυλλομέτρησης (browse group), με την οποία σχετίζεται μια υπηρεσία. Όταν ο πελάτης επιθυμεί να φυλλομετρήσει τις υπηρεσίες ενός SDP server, δημιουργεί ένα πλάνο εύρεσης υπηρεσίας. Το πλάνο αυτό περιέχει το UUID που αναπαριστά το αντίστοιχο browse group. Έτσι, όλες οι υπηρεσίες που προβάλλονται, θέτουν την τιμή του UUID του αντίστοιχου browse group ως τιμή του attribute BrowseGroupList.

2.2.1.2 Konark

Το Konark [54] είναι ένα πρωτόκολλο ανακάλυψης και παράδοσης υπηρεσίας, σχεδιασμένο για μεγάλα ασύρματα multi-hop ad hoc δίκτυα. Το Konark είναι βασισμένο σε peer-to-peer μοντέλα όπου κάθε συμμετέχων έχει τη δυνατότητα να φιλοξενεί υπηρεσίες, να τις διανέμει μέσω ενός HTTP server, να ρωτάει το δίκτυο για άλλες παρεχόμενες υπηρεσίες και τελικά να τις χρησιμοποιεί.

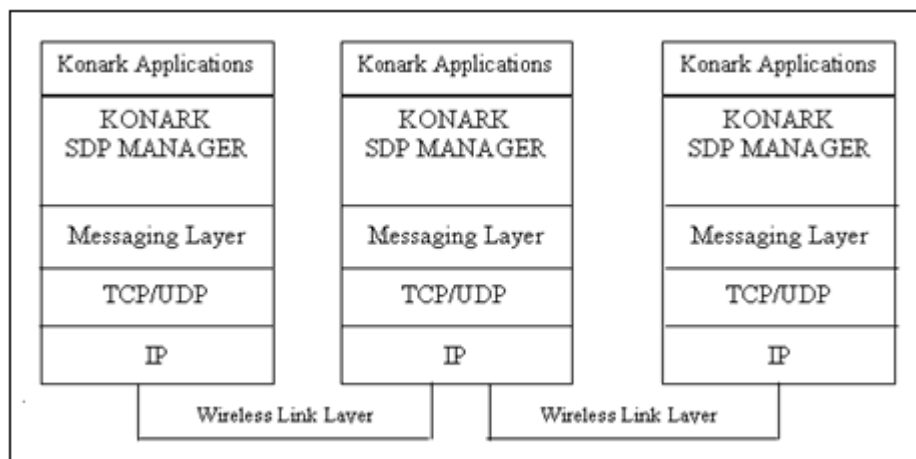
Το πρωτόκολλο Konark είναι ανεξάρτητο των κατώτερων στρωμάτων δικτύου που μπορεί να είναι είτε το 802.11, ή το IrDA, ή το Bluetooth είτε κάποιο άλλο πρωτόκολλο που υλοποιείται σε επίπεδο IP.

Σημαντικό ζήτημα στα SDPs είναι πώς θα διατίθενται στο δίκτυο οι πληροφορίες για υπηρεσίες. Το Konark υποστηρίζει τόσο τη διαφήμιση (advertisement) όσο και την

εύρεση (discovery). Οι πάροχοι υπηρεσιών προωθούν τις υπηρεσίες τους στο δίκτυο. Ο ρυθμός που γίνεται αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Άλλες φορές γίνεται σε περιοδική βάση, άλλες όταν εισέρχεται στο δίκτυο ένας νέος κόμβος και άλλοτε εξαρτάται από γεωγραφικούς ή χρονικούς παράγοντες. Τα διαφημιστικά αυτά μηνύματα περιέχουν τη πληροφορία time-to-live (TTL) ώστε να διατηρείται το δίκτυο ενημερωμένο. Οι πελάτες, αποθηκεύουν τις πληροφορίες με τις υπηρεσίες και μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν αργότερα.

Κάθε συσκευή περιλαμβάνει μια Εφαρμογή Konark (Konark Application) που διευκολύνει την ανθρώπινη παρέμβαση στην αρχικοποίηση, στον έλεγχο των διαδικασιών διαφήμισης και ανακάλυψης και στη χρήση των υπηρεσιών. Περιλαμβάνει επίσης SDP Managers και καταχωρητές (registries). Και οι δύο διατηρούν αντικείμενα υπηρεσιών και πληροφορίες που προσφέρονται από τους συμμετέχοντες κόμβους. Επίσης, όπως αναφέραμε και προηγούμενα, χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα HTTP και SOAP για την αποστολή των υπηρεσιών, η περιγραφή των οποίων γίνεται με τη γλώσσα XML.

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά το service discovery, χρησιμοποιείται η παρακάτω (Σχήμα 1) λίστα πρωτοκόλλων του Konark service discovery:

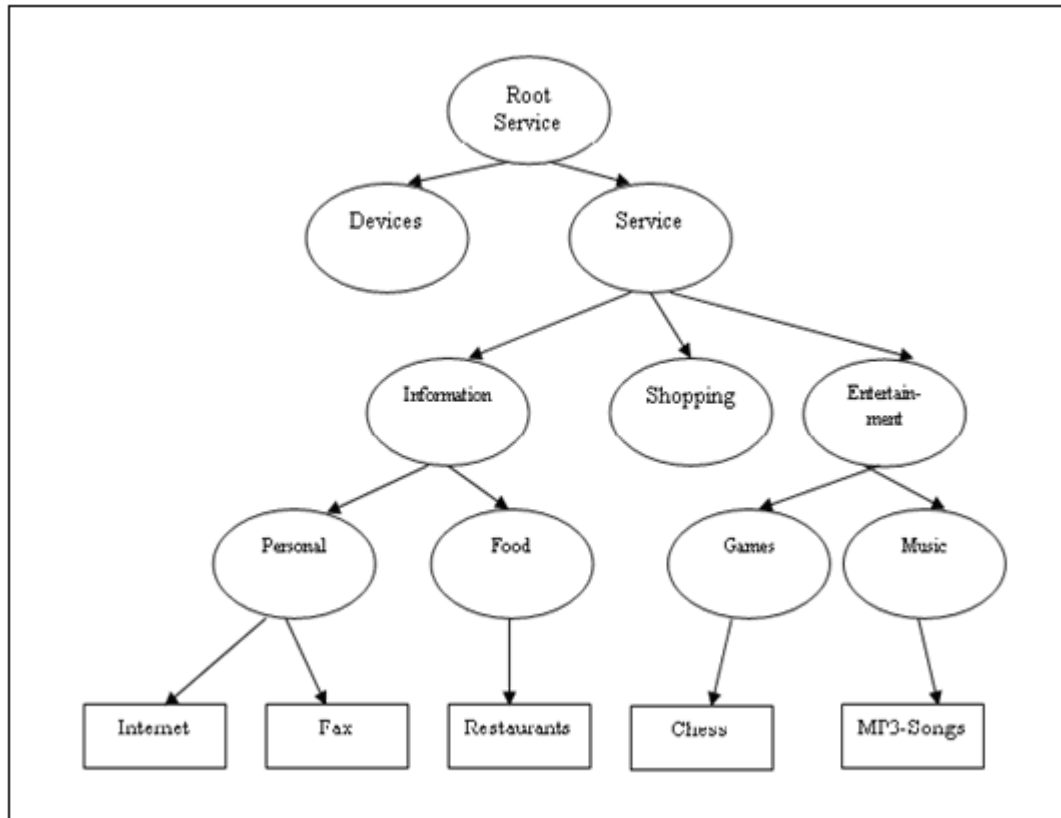


Σχήμα 1: Konark service discovery

Όπως βλέπουμε, ο Konark SDP Manager αλληλεπιδρά με το επίπεδο μηνυμάτων για να στείλει και να παραλάβει μηνύματα ανακάλυψης και διαφήμισης. Το επίπεδο messaging είναι πάνω από το επίπεδο μεταφοράς. Η διαδικασία του service discovery σχετίζεται με διαφημιστικούς μηχανισμούς και δομές καταχώρησης υπηρεσιών (service registry).

Το service registry είναι μια δομή που επιτρέπει σε συσκευές να αποθηκεύουν τις υπηρεσίες τους καθώς και να διατηρούν πληροφορίες για υπηρεσίες που έχουν ανακαλύψει ή παραλάβει. Ο Konark SDP Manager διατηρεί μια δενδρική δομή για τις καταχωρήσεις. Επιτρέπει στα μονοπάτια του δένδρου να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε μια ερώτηση ενός πελάτη ή σε διαφημιστικό μήνυμα.

Το δένδρο έχει έναν αριθμό επιπέδων που αναπαριστά την ταξινόμηση των υπηρεσιών. Καθώς μετακινούμαστε από τη ρίζα προς τα φύλλα, οι υπηρεσίες γίνονται πιο εξειδικευμένες. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο επόμενο Σχήμα 2:



Σχήμα 2: Παράδειγμα Δένδρου Υπηρεσιών

Το δένδρο υπηρεσιών (service tree) είναι χρήσιμο για τις συσκευές είτε ενεργούν ως πελάτες είτε ως πάροχοι υπηρεσιών. Οι εξυπηρετητές το χρησιμοποιούν για να αποθηκεύσουν τις τοπικές υπηρεσίες τους, να τις διαφημίσουν και να απαντήσουν σε αιτήσεις πελατών. Αντίστοιχα, οι πελάτες το χρησιμοποιούν για να ανακαλύψουν κάθε επιπέδου υπηρεσίες.

Η διαδικασία της ανακάλυψης έχει δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, ο πελάτης στέλνει μηνύματα ανακάλυψης σε μια σταθερή ομάδα (group). Στο δεύτερο βήμα, απαντούν όλοι οι πάροχοι που έχουν τις αντίστοιχες υπηρεσίες. Το μήνυμα ανακάλυψης που στέλνει ο πελάτης περιέχει είτε το μονοπάτι του service tree είτε μια λέξη-κλειδί. Το μονοπάτι χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις αναζήτησης γενικών υπηρεσιών. Η λέξη-κλειδί χρησιμοποιείται για αναζήτηση εξειδικευμένων υπηρεσιών. Αυτά τα μηνύματα έχουν επίσης και ένα πεδίο με τη θύρα στην οποία ο πελάτης δέχεται τις απαντήσεις των servers.

2.2.1.3 GSD

Το GSD (group-based distributed service discovery protocol) [55] έχει προταθεί για τα κινητά ad hoc δίκτυα και χρησιμοποιεί αποτελεσματικά το εύρος ζώνης του δικτύου για την εύρεση υπηρεσίας μέσα σε αυτό. Βασίζεται στην αρχή αποθήκευσης διαφημιστικών μηνυμάτων σε peer-to-peer δίκτυα και στην επιλεκτική group-based προώθηση αιτήσεων. Για την περιγραφή αυτών των αιτήσεων, το πρωτόκολλο εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες της DARPA Agent Markup Language (DAML), αυξάνοντας έτσι την ευκαμψία του δικτύου στην ανακάλυψη υπηρεσιών. Η peer-to-peer αποθήκευση υπηρεσιών, δίνει στο πρωτόκολλο μια κατανεμημένη (distributed) προσέγγιση, διαφορετική από τις κεντροποιημένες (centralized) αρχιτεκτονικές των

κλασσικών πρωτοκόλλων ανακάλυψης και παράδοσης υπηρεσίας. Πρόκειται για μια λύση που ταιριάζει στον ετερογενή χαρακτήρα των MANETs.

Αναλύοντας περισσότερο την αρχιτεκτονική του GSD, αξίζει να σημειωθεί ότι οι αιτήσεις υπηρεσιών εκφράζονται με χρήση της DARPA και αντιστοιχίζονται στις περιγραφές των υπηρεσιών μέσω ενός σχήματος «ταιριάσματος» υπηρεσίας (service-matching). Οι υπηρεσίες των κόμβων ταξινομούνται σε αρκετές ομάδες (group) με βάση την ιεραρχία των κλάσεων και υποκλάσεων της DAML. Έτσι, μια υπηρεσία ανήκει στην ιεραρχία ενός group ξεκινώντας από το αρχικό group που ονομάζεται «Service». Κάθε κόμβος διαφημίζει τις υπηρεσίες του στους γειτονικούς κόμβους που απέχουν n^1 βήματα. Συνεπώς, κάθε κόμβος δε χρειάζεται να διατηρεί στη μνήμη του όλες τις υπηρεσίες του δικτύου. Η διαφήμιση επίσης, περιλαμβάνει μια λίστα με τα group που ο κόμβος-αποστολέας έχει ανακαλύψει στην περιοχή κάλυψής του. Αυτό το group χρησιμοποιείται για να προωθήσει επιλεκτικά μια αίτηση σε άλλους κόμβους μέσα στο δίκτυο. Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία και τις δυνατότητες της DAML, μειώνουμε το φορτίο που κυκλοφορεί στο δίκτυο παρέχοντας παράλληλα εγγύηση ότι οι αιτήσεις θα φτάσουν στους κόμβους που έχουν την ζητούμενη υπηρεσία.

2.2.1.4 DEAPSpace

Το DEAPspace [51] προτάθηκε από την IBM Research για να λύσει το πρόβλημα του service discovery σε single-hop ad hoc δίκτυα. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου που απαιτείται για την ανακάλυψη νέων συσκευών στο δίκτυο χωρίς να υπάρχει σημαντική αύξηση της χρησιμοποίησης εύρους ζώνης και των ενεργειακών αναγκών.

Το πρωτόκολλο εφαρμόζει proactive τεχνική προώθησης των διαφημιστικών μηνυμάτων, όπως κάνουν όλα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης καθοδηγούμενα από πίνακα [56] για table-driven πρωτόκολλα). Ωστόσο, κάθε συσκευή όχι μόνο ανακοινώνει τις υπηρεσίες που η ίδια παρέχει, αλλά και αυτών που γνωρίζει από άλλες συσκευές. Αυτό εξασφαλίζει πως μια χαμένη διαφήμιση δεν θα επηρεάζει σημαντικά κάποιο κόμβο αφού εύκολα μπορεί να αποκτήσει την πληροφορία από αλλού. Το ίδιο συμβαίνει και όταν εισέρχεται στο δίκτυο μια συσκευή, όπου δεν χρειάζεται να περιμένει όλες τις άλλες να διαφημιστούν ώστε να αποκτήσει γνώση των υπηρεσιών στο δίκτυο.

2.2.1.5 Εφαρμογή SLP σε MANETs

Το Service Location Protocol, όπως έχει οριστεί στο RFC2608, δε μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά στα Mobile Ad Hoc Network (MANET). Χρειάζεται κάποιες τροποποιήσεις και προσθήκες, διατηρώντας ωστόσο τα βασικά στοιχεία του πρωτοκόλλου.

Παρακάτω, θα παρουσιάσουμε το Service Location Protocol για MANET (SLPManet), που είναι το γνωστό μας SLP προσαρμοσμένο για λειτουργία στα Ad Hoc δίκτυα. Το SLPManet υλοποιεί όλα τα απαραίτητα στοιχεία του SLP Version 2. Όλα τα στοιχεία που δεν υλοποιούνται στο SLPManet, περιγράφονται ως προαιρετικά στο RFC του SLP και έμειναν εκτός επειδή δε ταιριάζουν σε περιβάλλοντα κινητών δικτύων. Τα πιο αξιοσημείωτα σημεία που έχουν εξαιρεθεί είναι:

¹ Το n κυμαίνεται από 1 έως MAX ADVERTISEMENT DIAMETER

- *Directory Agents (DAs)*: Οι Directory Agents, όπως τους έχουμε περιγράψει, είναι κεντρικές μονάδες αποθήκευσης πληροφοριών των υπηρεσιών του δικτύου. Οι Directory agents υπάρχουν σε δίκτυα LANs ώστε να επαυξήσουν την απόδοση και να προσδώσουν μια κλιμάκωση στο πρωτόκολλο. Στα MANETs δεν υπάρχουν συνήθως DAs καθώς τέτοια δίκτυα λειτουργούν χωρίς την ύπαρξη κόμβων που προϋπάρχουν ή είναι μόνιμα παρόντες. Σαν συνέπεια αυτής της απουσίας, μόνο active discovery επιτελείται.
- *Authentication Blocks (Blocks Πιστοποίησης)*: Οι Agents ούτε είναι διαμορφωμένοι ώστε να παράγουν blocks πιστοποίησης ούτε τα επικυρώνουν. Αυτό το προαιρετικό στοιχείο χρειάζεται για να αποτρέπει των έλεγχο υπηρεσιών από εχθρικούς κόμβους. Στο SLPManet δεν υλοποιείται καθώς η ασφάλεια δεν είναι πρωταρχικός στόχος.
- *Optional SLP messages*: Μηνύματα όπως τα Attribute Request και Service Type Request δεν υλοποιούνται στο SLPManet. Και αυτό γιατί τέτοια επιπλέον στοιχεία προσθέτουν πολυπλοκότητα και καταναλώνουν αρκετές πηγές ενέργειας του δικτύου.

2.2.1.5.1 Περιγραφή πρωτοκόλλου

Λόγω της απουσίας των DAs, η διαδικασία αποστολής μηνυμάτων αίτησης και απάντησης γίνεται απευθείας μεταξύ των User Agents και των Service Agents. Ο UA εκπέμπει ένα μήνυμα 'Service Request' (SrvRqst) για λογαριασμό του πελάτη, ορίζοντας τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας που αναζητά ο πελάτης. Οι Service Agents που λαμβάνουν μια αίτηση για μια υπηρεσία την οποία διαφημίζουν, εκπέμπουν μόνο προς τον ενδιαφερόμενο κόμβο μία απάντηση που περιέχει την τοποθεσία της εν λόγω υπηρεσίας.

URLs, χρήση των Ports, Επαναμετάδοση SLP μηνυμάτων

Η χρησιμοποίηση των URL Entries στα MANETs γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που περιγράψαμε για τα IP δίκτυα. Το ίδιο συμβαίνει και για την χρήση των θυρών και της UDP ή TCP μεταφοράς δεδομένων. Επίσης, η περίπτωση της επαναμετάδοσης μηνυμάτων λειτουργεί χωρίς παραλλαγές.

SLPManet Μηνύματα

Διατηρώντας την ίδια επικεφαλίδα, τα μηνύματα που χρησιμοποιεί η υλοποίηση SLPManet είναι τρία:

Message Type	Abbreviation	Function-ID
Service Request	SrvRqst	1
Service Reply	SrvRply	2
SA Advertisement	SAAdvert	11

Σχήμα 3: SLP Μηνύματα σε ad hoc δίκτυα

Η μόνη διαφορά είναι πως δεν έχουμε μηνύματα DAAdvert ως απάντηση σε κάποιο μήνυμα SrvRqst.

Η κεντριοποιημένη έκδοση της αρχιτεκτονικής (CSLP) αποτελείται και από τις τρεις οντότητες, User Agent (UA), Service Agent (SA) και Directory Agent (DA) [57]. Στην κατανεμημένη έκδοση (DSLP) μόνο οι δύο οντότητες, οι UAs και SAs, περιλαμβάνονται. Όταν ένας UA επιχειρεί να χρησιμοποιήσει μια υπηρεσία, της οποίας ο σχηματισμός και η παρουσία δεν είναι ακόμα γνωστή, ξεκινά μια διαδικασία ανακάλυψης υπηρεσίας. Ο UA εκπέμπει broadcast ένα μήνυμα SrvRqst στο οποίο ορίζει τον τύπο της επιθυμητής υπηρεσίας.

2.3 Cross Layer

Στη μελέτη [58] παρουσιάζεται μια πρότυπη αρχιτεκτονική η οποία προσφέρει μια cross layer βελτιστοποίησης ([59], [60], [63], [66], [67]), που προσφέρει ένα συνδυασμό λειτουργιών ανακάλυψης υπηρεσίας με μηχανισμούς δρομολόγησης σε MANETs. Η συγκεκριμένη cross layer αρχιτεκτονική για ανακάλυψη υπηρεσίας αυξάνει τη συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου που έχει διαμορφωθεί από την υπάρχουσα κίνηση δρομολόγησης, προκειμένου να μειώσει το κόστος ανακάλυψης υπηρεσίας. Επίσης βελτιστοποιεί την επιλογή υπηρεσίας και μειώνει το κόστος για καταγραφή και αντίδραση σε αλλαγές της δικτυακής τοπολογίας.

Στη συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζονται σενάρια, όπου συγκρίνεται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική cross layer με ένα μοντέλο όπου χρησιμοποιείται το SLP για την ανακάλυψη υπηρεσίας πάνω από τους αλγόριθμους δρομολόγησης DSDV και DSR. Ο σχεδιασμός του προτεινόμενου cross layer σχήματος βασίζεται στην αξιοποίηση της κατανεμημένης δομής των ad hoc δικτύων. Με το CL_{dsr} και με το σύμβολο CL_{dsdv} θα συμβολίζεται η αρχιτεκτονική cross layer που επεκτείνει τον αλγόριθμο DSR και τον DSDV αντίστοιχα. Εν συνεχεία αναλύεται το κόστος του δικτύου κατά τη διαδικασία ανακάλυψης υπηρεσίας, για τα πρωτόκολλα που επεκτάθηκαν.

2.3.1 CL_{dsr}

Μια απλή επέκταση στο μηχανισμό ανακάλυψης διαδρομής του DSR, δίνει τη δυνατότητα στους κόμβους να βρίσκουν διαδρομές προς άλλους κόμβους που παρέχουν υπηρεσίες. Η CL_{dsr} αρχιτεκτονική υποστηρίζει ανακάλυψη υπηρεσίας με ευρυ-εκπομπή ενός πακέτου αίτησης που περιέχει περιγραφή της υπηρεσίας. Κατά την παραλαβή του συγκεκριμένου πακέτου, ο κόμβος παραλήπτης απαντάει και ενημερώνει εάν διαθέτει την υπηρεσία, ταιριάζοντας την περιγραφή της αιτούμενης υπηρεσίας με τις αντίστοιχες περιγραφές που διαθέτει. Σε αυτό το σημείο μπορούν να διαμορφωθούν δύο καταστάσεις:

- Αν ο κόμβος διαθέτει τη συγκεκριμένη υπηρεσία, τότε απαντά στην πηγή στέλνοντας ένα πακέτο απάντησης υπηρεσίας (service reply) ακολουθώντας την αντίθετη διαδρομή.
- Σε αντίθετη περίπτωση ο κόμβος προωθεί το αρχικό service request πακέτο με ευρυ-εκπομπή στους γειτονικούς του κόμβους.

Η συγκεκριμένη διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά. Στο τέλος, ο κόμβος που εκκίνησε την ανακάλυψη υπηρεσίας, μαθαίνει την ταυτότητα ενός ή περισσότερων κόμβων που έχουν ταιριάζει την περιγραφή με αυτές που διαθέτουν, καθώς και τις διαθέσιμες διαδρομές από την πηγή προς τους συγκεκριμένους κόμβους. Όπως ο DSR αντίστοιχα και ο CL_{dsr} μειώνει την καθυστέρηση και τη συχνότητα των ανακαλύψεων επιτρέποντας στους ενδιαμέσους κόμβους, να αποθηκεύουν πληροφορίες σχετικές με την ταυτοποίηση μεταξύ διαθέσιμων υπηρεσιών και αιτούμενων. Τις συγκεκριμένες πληροφορίες οι κόμβοι τις «ακούνε» από το μέσο

μετάδοσης και ανταποκρίνονται στις αιτήσεις, για τις οποίες έχουν αποθηκεύσει μια αντιστοιχίση. Το CL_{dsr} μαθαίνει τις πιθανές αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου, όταν μια διαδρομή πηγής διακοπεί ή όταν «ακούσει» μια απάντηση υπηρεσίας που περιέχει καινούργιες αντιστοιχίσεις.

2.3.2 CL_{dsdv}

Το DSDV μπορεί να επεκταθεί για να υποστηρίξει την ανακάλυψη υπηρεσίας ενσωματώνοντας τις περιγραφές, στις εισόδους του πίνακα δρομολόγησης. Στο πρωτόκολλο cross layer που προκύπτει και το οποίο είναι το CL_{dsdv}, κάθε είσοδος στον πίνακα δρομολόγησης έχει ένα επιπλέον πεδίο με τις περιγραφές υπηρεσιών, που προσφέρονται από τον κόμβο.

2.3.3 Υπολογισμός κόστους δικτύου για τις Cross-Layer υλοποιήσεις

Το συνολικό κόστος ανακάλυψης και επιλογής για την CL_{dsr} αρχιτεκτονική αποτελείται από το κόστος ευρυ-εκπομπής του πακέτου αίτησης ανακάλυψης και από το κόστος των unicast απαντήσεων για τους server, που έχουν αντιστοιχήσει την περιγραφή της υπηρεσίας με τις διαθέσιμες. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το κόστος ευρυ-εκπομπής μηνύματος για ανακάλυψη υπηρεσίας είναι παρόμοιο με αυτό της ευρυ-εκπομπής μηνύματος εύρεσης διαδρομής. Σε αυτή την περίπτωση το συνολικό κόστος θα είναι $b+s*u$, όπου b εκφράζει το κόστος ευρυ-εκπομπής σε επίπεδο δικτύου για εύρεση διαδρομής, το s εκφράζει το συνολικό αριθμό των διαθέσιμων server, ενώ το u χρησιμοποιείται για να δηλώσει το κόστος αποστολής unicast μηνύματος.

Εφόσον δεν αποστέλλονται επιπρόσθετα πακέτα στο δίκτυο το συνολικό κόστος της cross-layer ανακάλυψης και επιλογής του CL_{dsdv} θα είναι 0. Εντοπίζεται όμως αύξηση του κόστους για τον αλγόριθμο, καθώς θα πρέπει να αυξηθούν οι εισοδοί των πινάκων δρομολόγησης που δημιουργούνται.

2.3.4 Συμπεράσματα της υλοποίησης

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας που παρουσιάστηκε εντοπίστηκαν τρία βασικά προβλήματα για τις προτεινόμενες υλοποιήσεις σε επίπεδο εφαρμογής. Τα βασικά προβλήματα είναι, ο μεγάλος αριθμός μηνυμάτων ελέγχου και το αντίστοιχο κόστος που δημιουργείται, λόγω των διπλών μηνυμάτων-αιτημάτων υπηρεσίας. Δευτερευόντως δεν δίνουν δυνατότητα επιλογής υπηρεσίας σε περίπτωση που βρεθούν service providers, που παρέχουν ανταγωνιστικές υπηρεσίες με την ζητούμενη. Τέλος δεν προσφέρουν δυνατότητα επαναανακάλυψης υπηρεσίας, προσαρμοζόμενες στις αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου, από την αυξημένη κινητικότητα.

Η πρόταση της cross-layer αρχιτεκτονικής και η τόσο θεωρητική όσο και η πειραματική δοκιμή της, απέδειξε ότι υπερτερεί μιας αντίστοιχης υλοποίησης σε επίπεδο εφαρμογής, και πιο συγκεκριμένα μιας υλοποίησης που χρησιμοποιεί το μοντέλο αρχιτεκτονικής του SLP.

3 Προβλήματα που εμφανίζονται στα Mobile Ad Hoc Networks και παρουσίαση προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

Το παρόν κεφάλαιο θα επικεντρωθεί στην παρουσίαση των βασικών προβλημάτων, τα οποία ανακύπτουν σε διαφορετικές διαδικασίες των ad hoc δικτύων. Θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στα θέματα που θα προσπαθεί να επιλύσει η αρχιτεκτονική, η οποία προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

3.1 Φαινόμενα που επηρεάζουν την τοπολογία σε ένα MANET

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε σε προηγούμενες ενότητες εντοπίζονται αρκετά προβλήματα σε ασύρματα περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας. Τα προβλήματα υπάρχουν σε διαφορετικά επίπεδα και επηρεάζουν τις βασικές λειτουργίες του δικτύου.

Θα μπορούσαμε να επικεντρωθούμε στους περιορισμούς που εντοπίζονται σε ένα MANET, όσον αφορά την τοπολογία του δικτύου. Αρχικά, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η ίδια η κατανεμημένη δομή τους, θέτει πολλαπλούς περιορισμούς στις προτεινόμενες αρχιτεκτονικές. Τόσο η φορητότητα των συσκευών, όσο και η ενεργειακή εξάντληση των κόμβων προκαλούν συχνές και έντονες μεταβολές στη δομή του δικτύου, στις υπαρκτές διαδρομές και στη διαδικασία ανακάλυψης και παράδοσης υπηρεσίας.

Ειδικότερα, η σταδιακή μείωση του ενεργειακού υπολοίπου των συσκευών είναι ίσως το πιο έντονο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στα ad hoc δίκτυα. Οι κόμβοι χάνουν ενέργεια σε όλες τις διαδικασίες που συμμετέχουν. Στη συνέχεια θα δούμε αναλυτικότερα πού χάνεται η ενέργεια σε ένα MANET καθώς και πώς η συγκεκριμένη απώλεια επηρεάζει τις διαδικασίες της δρομολόγησης και της ανακάλυψης υπηρεσίας.

3.2 Ενεργειακή εξάντληση των κόμβων σε ένα MANET

Όπως έχει αναφερθεί και στη βιβλιογραφία το ενεργειακό υπόλοιπο ενός κόμβου μπορεί να μειωθεί με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την κατάσταση στην οποία λειτουργεί. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν οι καταστάσεις λειτουργίας sleep και idle καθώς και η κατανάλωση της ενέργειας ενός κόμβου όταν βρίσκεται σε κατάσταση μετάδοσης και παραλαβής μηνύματος. Τόσο κατά τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων, όσο και κατά την παραλαβή του, ένας κόμβος καταναλώνει ενέργεια. Η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται εξαρτάται από το μέγεθος του πακέτου και την ισχύ εκπομπής του κόμβου. Συνεπώς σε κάθε αποστολή νέου πακέτου ο κόμβος έχει μια συγκεκριμένη απώλεια ενέργειας. Ανάλογα με το μέγεθος και τον τύπο του πακέτου διαφοροποιείται και η δαπανώμενη ενέργεια για την αποστολή.

Στην περίπτωση της δρομολόγησης, όπου ο κόμβος επιζητά μια διαδρομή προς έναν προορισμό, εντοπίζονται τριών ειδών πακέτα. Πακέτα ελέγχου, που έχουν το ρόλο της αναγνώρισης ύπαρξης ενός κόμβου, πακέτα αίτησης διαδρομής καθώς και πακέτα απάντησης αιτημάτων.

Όταν ένας κόμβος αποστέλλει μηνύματα εύρεσης διαδρομής, ο μετατροπέας λειτουργώντας σαν διαδικασία front-end, παρέχει ενέργεια στον κόμβο ώστε να μεταδώσει το πακέτο αναζήτησης διαδρομής. Μας ενδιαφέρει τόσο η ισχύς

μετάδοσης αλλά και η ενέργεια λόγω θερμότητας που χάνεται στην κεραία και το μετατροπέα. Επιπλέον ενέργεια σπαταλάται και από την CPU της συσκευής, ειδικότερα κατά τη διάρκεια των διαδικασιών παραγωγής, προσαρμογής και κρυπτογράφησης του μεταδιδόμενου σήματος.

Όταν ο κόμβος βρίσκεται σε κατάσταση λήψης μηνύματος, καταναλώνει ενέργεια στη CPU, καθώς και στον ενισχυτή της κεραίας. Ο συγκεκριμένος ενισχυτής χρησιμοποιείται για να περιορίσει τον θόρυβο στην έξοδο της κεραίας. Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας ο κόμβος θα πρέπει μέσω της CPU του να αποκωδικοποιήσει, να προσαρμόσει, να αποκρυπτογραφήσει και τελικά να αποθηκεύσει το μήνυμα που έλαβε.

Εξαιτίας των συνεχών μεταβολών στην τοπολογία του δικτύου, εμφανίζεται ιδιαίτερη δυσκολία στη δρομολόγηση κάτι που οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση της ενέργειας. Όταν ένας κόμβος εξαντληθεί ενεργειακά, τότε όλο το μονοπάτι από την πηγή στον προορισμό μεταβάλλεται και θα πρέπει να εκκινήσει εκ νέου η διαδικασία ανεύρεσης μονοπατιού.

Εκτός όμως από τη διαδικασία της δρομολόγησης το συγκεκριμένο πρόβλημα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό και την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας. Όπως αναλύθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, οι υπάρχουσες υλοποιήσεις για την ανακάλυψη και μετάδοση υπηρεσίας που εφαρμόζονται σε τοπολογίες ενσύρματων δικτύων δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικές κατά την εφαρμογή τους σε ασύρματα περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας, όπως τα MANETs. Οι συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές, όπως το SLP, το Jini, το DearSpace με την υπάρχουσα δομή τους δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν επαρκώς τα φαινόμενα κινητικότητας κόμβων και ενεργειακής εξάντλησης του δικτύου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται προβλήματα στην αξιοπιστία μετάδοσης της υπηρεσίας, καθώς και στην ποιότητα αυτής. Με τις υπάρχουσες υλοποιήσεις των μηχανισμών ανακάλυψης υπηρεσίας, οι κόμβοι ενός MANET δεν μπορούν να γνωρίζουν τους γειτονικούς τους. Προκειμένου να μπορέσουν να επιλέξουν λοιπόν έναν πάροχο υπηρεσίας, θα αναγκαστούν να θεωρήσουν το περιβάλλον σαν στατικό, αγνοώντας τις πιθανές αλλαγές τοπολογίας. Όπως είναι φυσικό η ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας δεν θα συμπίπτει με τις απαιτήσεις του χρήστη.

Επίσης, οι μηχανισμοί αυτοί προϋποθέτουν την ύπαρξη μιας κεντρικής οντότητας που θα παρέχει πιο άμεση πληροφόρηση των διαθέσιμων πόρων και των αντίστοιχων παρόχων υπηρεσιών. Η κατανεμημένη δομή των ασύρματων ad hoc δικτύων καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την ύπαρξη μιας οντότητας με αυξημένες λειτουργίες, όπως για παράδειγμα ο Directory Agent που δημιουργείται στο SLP.

Επιπλέον, προσφέρουν τη δυνατότητα κατανεμημένης υλοποίησης χωρίς την ύπαρξη διαχειριστικού κόμβου. Κάτι τέτοιο προϋποθέτει μια αρχιτεκτονική με αυξημένη ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου, που σταδιακά οδηγεί σε αύξηση του αντίστοιχου κόστους λόγω των διπλών μηνυμάτων-αιτημάτων υπηρεσίας.

Η ανάγκη αποστολής με ευρυ-εκπομπή μηνυμάτων ανακάλυψης υπηρεσίας αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας, αγνοώντας πλήρως τους ενεργειακούς περιορισμούς των ad hoc κόμβων. Η ευρυ-εκπομπή μηνυμάτων – αιτημάτων ανακάλυψης υπηρεσίας οδηγούν σε επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας συνολικά στο δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το ποσοστό που δαπανάται κατά την αποστολή και παραλαβή μηνυμάτων όσο και το αντίστοιχο ποσοστό κατά την επεξεργασία του μηνύματος.

Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι οι μηχανισμοί αυτοί δεν παρέχουν δυνατότητα επαναανακάλυψης παρόχου υπηρεσίας. Η είσοδος νέων κόμβων μπορεί να προσφέρει περισσότερους διαθέσιμους παρόχους υπηρεσιών και η συγκεκριμένη

διαδικασία θα οδηγούσε στην ανακάλυψη ανταγωνιστικών υπηρεσιών σε σχέση με τη ζητούμενη.

3.3 Προτεινόμενη Λύση σε επίπεδο δρομολόγησης

Κρίνεται ως επιτακτική η ανάγκη βελτιστοποίησης της διαχείρισης των ενεργειακών πόρων του δικτύου. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίστηκε σε επεκτάσεις υπαρχουσών λύσεων, τόσο σε επίπεδο δρομολόγησης, όσο και σε επίπεδο ανακάλυψης και παράδοσης υπηρεσίας. Οι συγκεκριμένες επεκτάσεις λαμβάνουν υπόψη τους ενεργειακούς περιορισμούς που εντοπίστηκαν και αναλύθηκαν.

Σε επίπεδο δρομολόγησης η προτεινόμενη αρχιτεκτονική λαμβάνει υπόψη της την υπολειπόμενη ενέργεια της διαδρομής από την πηγή στον προορισμό. Οι υλοποιήσεις που υπάρχουν σε επίπεδο δρομολόγησης για τα MANET επικεντρώνονται στην εύρεση του πιο σύντομου μονοπατιού, βάσει του αριθμού των βημάτων που απαιτούνται. Η πιο σύντομη όμως διαδρομή δεν εγγυάται και την καλύτερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων του δικτύου.

Υπάρχει πιθανότητα ενδιάμεσοι κόμβοι να εξαντληθούν ενεργειακά σύντομα καθιστώντας τη διαδρομή ανενεργή και επισπεύδοντας την ανάγκη ανακάλυψης νέου ενεργού μονοπατιού. Για αυτό το λόγο στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική κατά την αίτηση μιας διαδρομής προς έναν προορισμό, απαιτείται από τους κόμβους που μετέχουν στη διαδρομή να ενημερώσουν την πηγή για την υπολειπόμενη ενέργειά τους.

Η διαρκής ενημέρωση σχετικά με την ενέργεια του κάθε κόμβου θα αποτελούσε μεγάλη επιβάρυνση για το δίκτυο καθώς θα αυξανόταν το μέγεθος του πακέτου, προκαλώντας αυξημένο φόρτο από τη διαρκή ανταλλαγή πακέτων. Η εναλλακτική λύση η οποία και χρησιμοποιήθηκε, σχετίζεται με τη διατήρηση αποκλειστικά και μόνο της ελάχιστης ενέργειας για το μονοπάτι. Η συγκεκριμένη τιμή προκύπτει από τη σύγκριση των τιμών των κόμβων που ανήκουν σε αυτό.

Πιο συγκεκριμένα επεκτείνεται το πακέτο αίτησης διαδρομής ώστε να περιλαμβάνει ένα πεδίο με την τιμή της υπολειπόμενης ενέργειας της πηγής. Το συγκεκριμένο πακέτο λαμβάνεται στο τελικό στάδιο από τον προορισμό ο οποίος με unicast τρόπο επιστρέφει απαντητικό μήνυμα στην πηγή. Ο προορισμός θα απαντήσει για όλες τις αιτήσεις που θα λάβει από την πηγή διαμορφώνοντας ξεχωριστό μήνυμα απάντησης. Σε κάθε απαντητικό μήνυμα εισάγεται και η υπολειπόμενη ενέργεια του προορισμού. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το μήνυμα απάντησης διαδρομής, ελέγχει την τιμή της υπολειπόμενης ενέργειας του και προβαίνει σε μια από τις ακόλουθες δύο ενέργειες:

1. αν η τιμή του είναι μεγαλύτερη από την υπάρχουσα στο πακέτο απλά αφήνει την τιμή που εμφανίζεται σε αυτό.
2. αν η τιμή του είναι μικρότερη από την υπάρχουσα στο πακέτο αντικαθιστά την τιμή του πακέτου με τη δική του.

Συνεπώς όταν το μήνυμα απάντησης ληφθεί από την πηγή του αιτήματος, τότε ο κόμβος που εκκίνησε τη διαδικασία εύρεσης διαδρομής θα αποθηκεύσει στον πίνακα δρομολόγησης του τις υπολειπόμενες ενέργειες των διαθέσιμων μονοπατιών. Έτσι θα μπορεί να επιλέξει στο τέλος την πιο κυρίαρχη ενεργειακά διαδρομή απορρίπτοντας τις περιπτώσεις όπου η υπολειπόμενη ενέργεια είναι αρκετά μικρή. Με αυτό τον τρόπο γίνεται πιο αποδοτική διαχείριση των ενεργειακών πόρων του δικτύου, καθώς περισσότεροι κόμβοι θα παραμείνουν ζωντανοί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Συνεπώς μεγιστοποιείται η διάρκεια ζωής των ζεύξεων και συνολικά του δικτύου.

3.4 Προτεινόμενη Λύση σε επίπεδο ανακάλυψης υπηρεσίας

Στο επίπεδο ανακάλυψης υπηρεσίας οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι για ενσύρματα δίκτυα δεν είναι ιδιαιτέρως αποδοτικοί, εξαιτίας της κατανεμημένης δομής των MANETs. Τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα λειτουργούν πιο αποδοτικά με την ύπαρξη κεντρικής οντότητας που αναλαμβάνει τη διαχείριση των υπηρεσιών και της ενημέρωσης των πελατών για τις διαθέσιμες υπηρεσίες. Το πρωτόκολλο SLPv2 μπορεί να λειτουργήσει και σε κατανεμημένη μορφή με χρήση ευρυ-εκπομπής, αναφορικά με τα μηνύματα αίτησης, απάντησης και διαφήμισης υπηρεσίας.

Σε κάθε περίπτωση οποιαδήποτε από τις υπάρχουσες υλοποιήσεις και αν χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να επεκταθεί προκειμένου να λειτουργήσει αποδοτικά για MANETs. Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική έγινε προσπάθεια να λαμβάνεται η απόφαση για την επιλογή του εξυπηρετητή, βάσει της υπολειπόμενης ενέργειάς του.

Στο μήνυμα απάντησης διαδρομής εισάγεται ένα επιπλέον πεδίο που περιέχει την υπολειπόμενη ενέργεια του εξυπηρετητή. Ο πελάτης συγκεντρώνει τις αντίστοιχες πληροφορίες και εν συνεχεία επιλέγει τον server με τη μεγαλύτερη υπολειπόμενη ενέργεια από τους διαθέσιμους. Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται είναι το SLPv2 και πιο συγκεκριμένα η κατανεμημένη του μορφή, δηλαδή χωρίς την παρουσία DAs (Directory Agent). Το επιπλέον πεδίο με την υπολειπόμενη ενέργεια του εξυπηρετητή εισάγεται στο μήνυμα SrvRply. Ουσιαστικά στην απάντηση που θα λάβει ο πελάτης από τον κάθε διαθέσιμο server θα εμπεριέχεται και η υπολειπόμενη ενέργειά του. Ο πελάτης μέσω του user agent θα επιλέξει τον πιο κυρίαρχο ενεργειακά εξυπηρετητή.

Η συγκεκριμένη υλοποίηση θα ενισχύσει τη διαδικασία παράδοσης υπηρεσίας καθώς εγγυάται την καλύτερη εξυπηρέτηση του χρήστη. Ο εξυπηρετητής θα είναι διαθέσιμος για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια, κάτι που μπορεί να εγγυηθεί και την αξιοπιστία του δικτύου, βελτιώνοντας την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας. Για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια θα είναι διαθέσιμη και η TCP σύνδεση μεταξύ πελάτη και εξυπηρετητή.

Ειδικότερα, η συγκεκριμένη υλοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί πάνω από τους ενεργειακούς αλγόριθμους που παρουσιάστηκαν και αποτελούν επεκτάσεις του AODV. Σε αυτή την περίπτωση το δίκτυο θα επιλέγει και τις πιο κυρίαρχες ενεργειακά διαδρομές ενώ και οι πελάτες θα απαιτούν να εξυπηρετηθούν από τους πιο κυρίαρχους ενεργειακά εξυπηρετητές.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται οι προτεινόμενες μετατροπές και συγκρίσεις μεταξύ τους προκειμένου να παρουσιαστούν τα αποτελέσματά τους, αναφορικά με τη διαχείριση των ενεργειακών πόρων του δικτύου.

4 Επίλυση του προβλήματος σε επίπεδο δικτύου

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το σημείο θα αναλύσουμε τον τρόπο αντιμετώπισης του προαναφερθέντος προβλήματος ενεργειακής εξάντλησης του δικτύου σε επίπεδο δικτύου και πιο συγκεκριμένα στη διαδικασία δρομολόγησης. Θα παρουσιαστεί ένας μηχανισμός εύρεσης διαδρομής που θα στοχεύει στη μέγιστη δυνατή διατήρηση της ενέργειας των κόμβων.

Στα MANETs υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αλγορίθμων δρομολόγησης. Ο διαχωρισμός τους γίνεται βάσει του τρόπου λειτουργίας τους. Λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένα κριτήρια, όπως η διαδραστικότητα και η δυναμικότητα, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης χωρίζονται σε proactive και reactive.

Στα proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης κάθε κόμβος επιχειρεί να διατηρήσει ένα συνεπή και ενημερωμένο πίνακα με πληροφορίες δρομολόγησης για κάθε κόμβο που ανήκει στο δίκτυο, έτσι ώστε όταν χρειαστεί να προωθήσει ένα πακέτο σε κάποιον προορισμό, η διαδρομή να είναι γνωστή εκ των προτέρων και να χρησιμοποιείται άμεσα. Ο συγκεκριμένος τρόπος δρομολόγησης είναι παρόμοιος στη θεωρία με τον αντίστοιχο των πρωτοκόλλων δρομολόγησης ενσύρματων δικτύων. Προκειμένου όμως να εφαρμοστούν σε ad hoc δίκτυα πραγματοποιούνται κάποιες μετατροπές. Κάθε αλγόριθμος είναι μοναδικός στον τρόπο διατήρησης του πίνακα δρομολόγησης (routing table) και στον τρόπο διασποράς των πληροφοριών δρομολόγησης.

Από την άλλη στα reactive πρωτόκολλα οι διαδρομές δημιουργούνται μόνο όταν είναι απαραίτητο, δηλαδή όταν ένας κόμβος-αποστολέας θέλει να στείλει πακέτα σε έναν κόμβο-προορισμό. Οι κόμβοι που δεν βρίσκονται σε ενεργά μονοπάτια ούτε προωθούν πακέτα ούτε διατηρούν πληροφορίες δρομολόγησης, εξοικονομώντας έτσι κατανάλωση μνήμης και ισχύος. Κάθε αλγόριθμος είναι μοναδικός στη διαδικασία εύρεσης διαδρομής αλλά και στη διατήρηση και διαγραφή των διαδρομών.

Τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα της πρώτης κατηγορίας είναι ο DSDV (Distance Sequence Distance Vector), ενώ της δεύτερης κατηγορίας ο AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) και ο DSR (Dynamic Source Routing). Εκτός από αυτές τις δύο κατηγορίες υπάρχουν και υβριδικοί αλγόριθμοι όπως ο ZRP (Zone Routing Protocol).

4.2 Επιλογή πρωτοκόλλου

Προκειμένου να επιλέξουμε το πρωτόκολλο δρομολόγησης για την αρχιτεκτονική, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τις συχνές τοπολογικές μεταβολές που υπάρχουν σε ένα MANET για ποικίλους λόγους. Η χρήση ενός πρωτοκόλλου proactive δεν πληροί τις προϋποθέσεις ενός περιβάλλοντος υψηλής κινητικότητας όπως ενός ad hoc δικτύου. Από την άλλη οι reactive αλγόριθμοι, επειδή είναι πιο άμεσα προσαρμόσιμοι, μπορούν να ανταποκριθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια σε απότομες αλλαγές των διαδρομών.

Οι συγκεκριμένες αλλαγές όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο στάδιο μπορούν να προκύψουν από διαφορετικές αιτίες. Μια από αυτές είναι η απότομη αποχώρηση ή είσοδος ενός κόμβου στο δίκτυο. Επίσης η αλλαγή θέσης ενός κόμβου στο χώρο λόγω κίνησης μπορεί να επαναπροσδιορίσει τις διαθέσιμες ζεύξεις. Τέλος η ενεργειακή εξασθένιση ενός κόμβου που συμμετέχει σε μια διαδρομή επικοινωνίας μπορεί να αναιρέσει τη συγκεκριμένη διαδρομή.

Η χρήση ενός proactive πρωτοκόλλου θα ανάγκαζε τους κόμβους να στέλνουν διαρκώς νέα ενημερωτικά μηνύματα για τη συμμετοχή τους στο δίκτυο, αυξάνοντας

το κόστος και την εξάντληση των διαθέσιμων ενεργειακών πηγών. Η χρήση όμως ενός reactive αλγορίθμου μειώνει την ανάγκη αποστολής ενημερωτικών μηνυμάτων, επικεντρώνοντας τη λειτουργία των κόμβων στη στοχευμένη εκπομπή πακέτων αναζήτησης διαδρομής.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έχει επιλεγεί ένα αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο της κατηγορίας reactive. Επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον της ερευνητικής εργασίας στη διατήρηση της ενέργειας των κόμβων του δικτύου επιλέγουμε τον AODV αλγόριθμο, εφαρμόζοντας συγκεκριμένες επεκτάσεις στη δομή και τη λειτουργία του. Η επιλογή μας στηρίχθηκε στα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά του AODV:

- 1) Προσφέρει ταχεία προσαρμογή σε δυναμικές αλλαγές ζεύξης.
- 2) Χαμηλό κόστος επεξεργασίας και overhead μνήμης.
- 3) Χαμηλή χρησιμοποίηση δικτύου.
- 4) Εξασφαλίζει την απουσία βρόχων δρομολόγησης.
- 5) Η δρομολόγηση είναι δυναμική και γίνεται κατ'απαίτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τον τρόπο λειτουργίας του AODV, βασίζοντας την ανάλυσή μας στα μηνύματα που ανταλλάσσονται από τους κόμβους κατά την αναζήτηση διαδρομής. Θα παρουσιάσουμε εκτενώς τη διαδικασία επιλογής διαδρομής, καθώς και τις προτεινόμενες επεκτάσεις. Τέλος θα συγκριθεί ο AODV με τις προτεινόμενες επεκτάσεις, στη βάση της διατήρησης ενέργειας και της καλύτερης διαχείρισης του ενεργειακού αποθέματος του δικτύου. Ο βασικός στόχος είναι η επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

4.3 Συνοπτική παρουσίαση του AODV

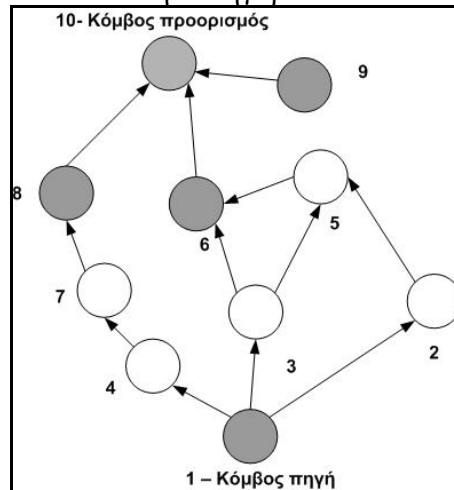
Το πρωτόκολλο Ad Hoc On Demand Distance Vector επιτρέπει τη δυναμική, αυτοεκκινούμενη, multihop δρομολόγηση μεταξύ κινητών κόμβων που επιθυμούν να δημιουργήσουν ένα Ad Hoc δίκτυο. Επιτρέπει στους κινητούς κόμβους να βρίσκουν γρήγορα διαδρομές για νέους προορισμούς. Δεν απαιτεί οι κόμβοι να διατηρούν τις διαδρομές με προορισμούς που δεν βρίσκονται σε ενεργή επικοινωνία, όπως άλλωστε κάθε reactive πρωτόκολλο. Επιτρέπει στους κόμβους να ανταποκρίνονται έγκαιρα σε διακοπές ζεύξεων και σε τοπολογικές αλλαγές.

Η λειτουργία του AODV είναι loop-free, προσφέροντας γρήγορη σύγκλιση όταν αλλάζει η τοπολογία του δικτύου. Όταν μια ζεύξη τίθεται εκτός λειτουργίας, το πρωτόκολλο ενημερώνει τους κόμβους που επηρεάζονται προκειμένου να ακυρώσουν τις διαδρομές που χρησιμοποιούν τη χαμένη ζεύξη.

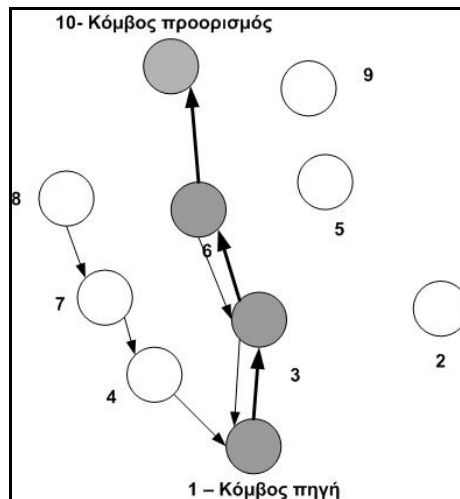
Ένα χαρακτηριστικό του AODV, είναι η χρήση του αριθμού ακολουθίας προορισμού (destination sequence number) για κάθε αποθηκευμένη διαδρομή. Ο αριθμός ακολουθίας προορισμού δημιουργείται από τον κόμβο-προορισμό για να συμπεριληφθεί μαζί με τις υπόλοιπες πληροφορίες της διαδρομής που στέλνει στους κόμβους. Η χρήση του συγκεκριμένου αριθμού πιστοποιεί την loop-free λειτουργία του αλγορίθμου, και είναι εύκολη στην υλοποίησή της. Όταν δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο διαδρομών για έναν προορισμό, ο κόμβος που ζήτησε τη διαδρομή υποχρεώνεται να επιλέξει εκείνη με τον μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας προορισμού.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί διαφορετικά πακέτα μηνυμάτων για την εύρεση και διατήρηση διαδρομών. Όταν ένας κόμβος επιχειρεί να βρει μια διαδρομή, εκπέμπει ένα μήνυμα Αίτησης Διαδρομής RREQ (Route Request) σε όλους τους γειτονικούς κόμβους. Το RREQ διαδίδεται μέσα στο δίκτυο μέχρι να φτάσει στον προορισμό ή

κάποιον κόμβο με μια πρόσφατη διαδρομή προς τον προορισμό. Η διαθέσιμη διαδρομή γίνεται γνωστή στην πηγή μέσω ενός μηνύματος RREP (Route Reply). Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί μηνύματα HELLO, που εκπέμπονται περιοδικά προς τους άμεσους γειτονικούς κόμβους. Αυτά τα μηνύματα είναι ενημερωτικά για την παρουσία του κόμβου και κοινοποιούνται προς τους γειτονικούς του προκειμένου να διατηρούνται ενεργές οι έγκυρες διαδρομές. Εάν τα μηνύματα HELLO σταματήσουν να εκπέμπονται από κάποιον συγκεκριμένο κόμβο, ο γειτονικός του υποθέτει ότι ο κόμβος απομακρύνθηκε και θεωρεί τη διαδρομή άκυρη, ειδοποιώντας παράλληλα τους κόμβους που επηρεάζονται. Η ενημέρωση γίνεται με την αποστολή μηνύματος Αποτυχίας Ζεύξης (link failure notice). Τόσο το μήνυμα Αποτυχίας Ζεύξης όσο και το μήνυμα HELLO, αποτελούν ειδική κατηγορία RREP πακέτου.



Εικόνα 9: Εκπομπή RREQ μηνύματος για αίτηση διαδρομής από την πηγή 1 στον προορισμό 10



Εικόνα 10: Διάδοση RREP και διαδρομή που δημιουργείται μεταξύ των κόμβων 1 και 10

Με τη χρήση του AODV ο κόμβος δημιουργεί και διαχειρίζεται έναν πίνακα διαδρομών (route table). Η πληροφορία του συγκεκριμένου πίνακα, πρέπει να διατηρείται ακόμη και για βραχυπρόθεσμες διαδρομές. Τέτοιες δημιουργούνται για την προσωρινή αποθήκευση αντίστροφων διαδρομών προς τις πηγές των RREQ μηνυμάτων. Κάθε εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης περιέχει τα ακόλουθα πεδία:

- Διεύθυνση IP του προορισμού (Destination IP Address)
- Αριθμός Ακολουθίας Προορισμού (Destination Sequence number)
- Σημαία Έγκυρου Αριθμού Ακολουθίας Διαδρομής (Valid Destination Sequence Number flag)
- Άλλες σημαίες διαδρομών και κατάστασης (π.χ. έγκυρη, άκυρη, επισκευάσιμη)
- Δικτυακή διεπαφή (Network Interface)
- Αριθμός Hop (ο αριθμός των hop που απαιτούνται για την άφιξη στον προορισμό)
- Επόμενο Hop (ο κόμβος που έχει επιφορτιστεί με την προώθηση των πακέτων για τη συγκεκριμένη καταχώρηση διαδρομής)
- Λίστα Πρόδρομων (List of Precursors, οι γειτονικοί κόμβοι στους οποίους προωθήθηκε ή δημιουργήθηκε ένα RREP)
- Χρόνος Ζωής (Lifetime, η διάρκεια ζωής μιας καταχώρησης διαδρομής)

Η διαχείριση του αριθμού ακολουθίας είναι απαραίτητη για την αποφυγή βρόχων δρομολόγησης, ακόμα και όταν μια ζεύξη τεθεί εκτός λειτουργίας. Ένας προορισμός καθίσταται ανέφικτος όταν μια ζεύξη τίθεται εκτός λειτουργίας ή απενεργοποιείται. Υπό αυτές οι συνθήκες, η διαδρομή ακυρώνεται με διαδικασίες που περιλαμβάνουν τον αριθμό ακολουθίας, ενώ η καταχώρηση στον πίνακα διαδρομών καταγράφεται ως άκυρη.

Το πλεονέκτημα του AODV σε σχέση με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι ότι μειώνει σημαντικά τα πληροφοριακά μηνύματα διαδρομών που στέλνονται στο δίκτυο. Συνεπώς αυξάνει σημαντικά την απόδοση του δικτύου ακόμα και σε περιπτώσεις με έντονες και συχνές τοπολογικές αλλαγές.

4.4 Ανάλυση μηνυμάτων RREQ, RREP και RERR

Σε αυτό το σημείο θα αναλύσουμε τα βασικά πακέτα που ανταλλάσσονται κατά την αναζήτηση διαδρομής με χρήση του AODV. Τα μηνύματα αυτά είναι το RREQ (Route Request - μήνυμα αίτησης διαδρομής), το RREP (Route Reply - μήνυμα απάντησης σε μια αίτηση διαδρομής), και το RERR (Route Error - μήνυμα που ενημερώνει για σφάλμα διαδρομής).

Κατά τη δημιουργία ενός πακέτου RREQ, ο κόμβος – πηγή αναμένεται να εισάγει τη IP διεύθυνση του, στο πεδίο Originator. Σε περίπτωση ευρυ-εκπομπής μηνύματος χρησιμοποιείται η διεύθυνση IP (255.255.255.255). Η λειτουργία του AODV απαιτεί τα RREQ μηνύματα να διανέμονται ευρέως, χρησιμοποιώντας όλο το εύρος του δικτύου. Το χρονικό διάστημα που διακινούνται τα μηνύματα αυτά υποδεικνύεται από το πεδίο TTL (Time To Live).

Για όσο χρόνο τα άκρα της επικοινωνίας διαθέτουν ενεργές διαδρομές μεταξύ τους ο AODV δεν αναλαμβάνει ουσιαστικά κάποιον ρόλο. Όταν όμως μια διαδρομή προς έναν νέο προορισμό απαιτηθεί, ο κόμβος εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις ένα RREQ πακέτο για να βρει μια ενεργή διαδρομή προς τον προορισμό. Μια νέα διαδρομή καθορίζεται με την άφιξη ενός RREQ πακέτου είτε άμεσα στον προορισμό είτε σε κάποιο ενδιάμεσο κόμβο. Η διαδρομή γίνεται διαθέσιμη μεταδίδοντας ένα RREP πακέτο στην πηγή. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα αίτημα, διατηρεί ένα μονοπάτι προς την πηγή της αίτησης, ώστε το RREP να μπορεί να μεταδοθεί unicast χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο μονοπάτι.

Η κατάσταση των συνδέσμων του κάθε κόμβου με τους γειτονικούς του παρακολουθείται. Όταν εντοπιστεί απότομη διακοπή σε μια ζεύξη ενεργής διαδρομής,

το RERR μήνυμα δημιουργείται για να ειδοποιήσει τους υπόλοιπους κόμβους ότι σταμάτησε η συγκεκριμένη σύνδεση. Το RERR μήνυμα ενημερώνει ότι οι προορισμοί που ανήκαν στο ανενεργό μονοπάτι δεν είναι πλέον προσβάσιμοι πλέον μέσω της συγκεκριμένης σύνδεσης.

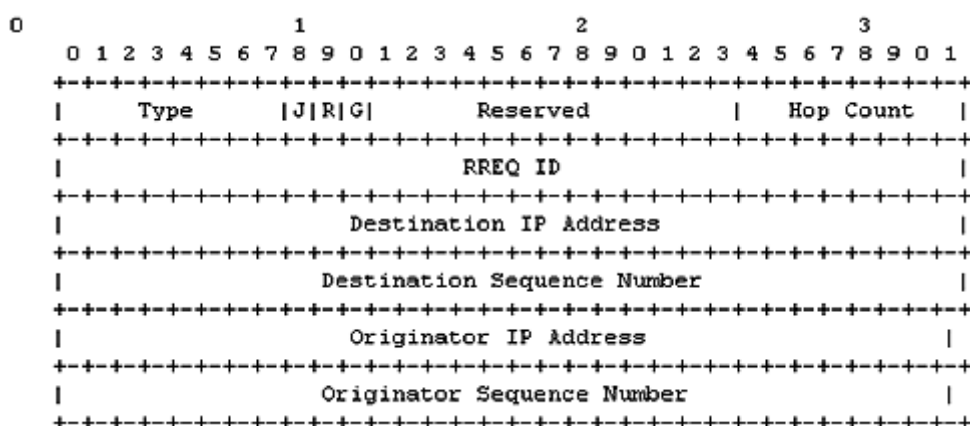
Προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αυτός κάθε κόμβος διατηρεί μια λίστα που περιέχει τις IP διευθύνσεις των γειτονικών του. Οι πληροφορίες της λίστας αυτής γίνονται πιο εύκολα προσβάσιμες κατά τη διαδικασία της δημιουργίας ενός RREP μηνύματος.

Ένα RREQ μήνυμα μπορεί να αποσταλεί σε μια IP διεύθυνση πολυδιανομής (multicast). Πρέπει να σημειωθεί ότι η πηγή ενός τέτοιου μηνύματος θα πρέπει να ακολουθήσει ειδικούς κανόνες. Είναι σημαντικό να ενεργοποιηθούν σωστά οι λειτουργίες πολυδιανομής από τους ενδιαμέσους κόμβους, τους οποίους δεν αφορά το συγκεκριμένο πακέτο.

Οι ακόλουθες παράγραφοι παρουσιάζουν τη μορφή που έχουν τα βασικά μηνύματα για τη δημιουργία μιας διαδρομής μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού.

4.4.1 Μορφή μηνύματος Route Request (RREQ)

Η μορφή του μηνύματος RREQ εμφανίζεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 11). Παρουσιάζονται τα πεδία του μηνύματος και αναλύεται η χρησιμότητα των συγκεκριμένων πεδίων στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4).



Εικόνα 11: Μορφή RREQ μηνύματος

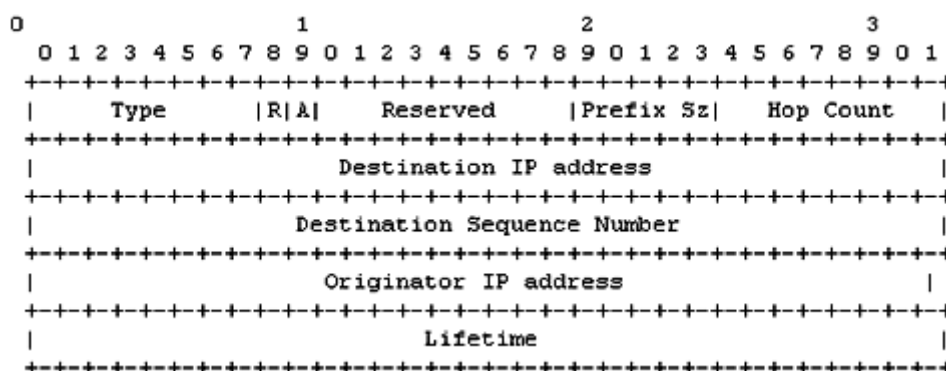
Πεδίο	Τρόπος χρησιμοποίησης
J	Σημαία ενοποίησης, κατειλημμένη για την περίπτωση πολυδιανομής
R	Σημαία επιδιόρθωσης, κατειλημμένη για την περίπτωση πολυδιανομής
G	Σημαία RREP, υποδεικνύει αν ένα ανέξοδο RREP πρέπει να μεταδοθεί unicast προς τον κόμβο που καθορίζεται στο πεδίο Destination IP Address
D	Σημαία αποκλειστική για τον προορισμό, υποδεικνύει μόνο τον προορισμό και

	μπορεί να απαντήσει σε συγκεκριμένο RREQ.
Reserved	Περιέχει την τιμή 0 και αγνοείται κατά την παραλαβή
Hop Count	Ο αριθμός των βημάτων από τον κόμβο – πηγή προς τον κόμβο που έχει λάβει την αίτηση
RREQ ID	Ένας αύξων ακολουθιακός αριθμός που είναι μοναδικός για κάθε διαφορετικό RREQ, όταν λαμβάνεται σε συνδυασμό με την IP διεύθυνση του κόμβου – πηγή
Destination IP Address	Πεδίο που υποδηλώνει την IP διεύθυνση του προορισμού για τον οποίο αναζητείται μια διαδρομή.
Destination Sequence Number	Ο τελευταίος ακολουθιακός αριθμός που λαμβάνεται στο παρελθόν από την πηγή για οποιαδήποτε διαδρομή προς το συγκεκριμένο προορισμό.
Originator IP Address	Η διεύθυνση του κόμβου – πηγή που δημιουργεί το μήνυμα Route Request
Originator Sequence Number	Δείχνει τον τρέχον αύξοντα ακολουθιακό αριθμό που θα χρησιμοποιηθεί στη διαδρομή του πίνακα δρομολόγησης που δείχνει προς την πηγή μιας αίτησης διαδρομής

Πίνακας 4: Ανάλυση των πεδίων του RREQ

4.4.2 Μορφή μηνύματος Route Reply (RREP)

Η μορφή του μηνύματος RREQ εμφανίζεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 12). Παρουσιάζονται τα πεδία του μηνύματος και αναλύεται η χρησιμότητα των συγκεκριμένων πεδίων στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5).



Εικόνα 12: Μορφή RREP μηνύματος

Πεδίο	Τρόπος χρησιμοποίησης
R	Σημαία επιδιόρθωσης, χρησιμοποιείται για πολυδιανομή
A	Πεδίο αναγνώρισης μηνύματος

Reserved	Τίθεται στην τιμή 0, απορρίπτεται κατά την παραλαβή του πακέτου
Prefix Size	Αν δεν είναι μηδέν, το μέγεθος του προθέματος καθορίζει ότι το επόμενο βήμα που υποδεικνύεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιουσδήποτε κόμβους με το ίδιο πρόθεμα δρομολόγησης (όπως καθορίζεται από το μέγεθος του προθέματος) όπως ο απαιτούμενος προορισμός.
Hop Count	Ο αριθμός των βημάτων από τον κόμβο πηγή προς τον κόμβο προορισμό. Οι δύο κόμβοι καθορίζονται σαν Originator IP Address και Destination IP Address αντίστοιχα. Για αιτήσεις διαδρομής που πολυδιανέμονται, αυτό το πεδίο καθορίζει τον αριθμό των βημάτων στα μέλη του δένδρου πολυδιανομής στέλνοντας το RREP.
Destination IP Address	Η διεύθυνση IP του προορισμού, που αποτελεί τον κόμβο ο οποίος εκίνησε τη διαδικασία εύρεσης διαδρομής.
Destination Sequence Number	Ο αύξων ακολουθιακός αριθμός που σχετίζεται με τη διαδρομή.
Originator IP Address	Η IP διεύθυνση του κόμβου που δημιουργεί το RREQ μήνυμα, για τον οποίο εντοπίζεται η διαδρομή.
Lifetime	Ο χρόνος σε msec για τον οποίο οι κόμβοι που λαμβάνουν το RREP θεωρούν ότι η διαδρομή είναι έγκυρη.

Πίνακας 5: Ανάλυση των πεδίων του RREP

Το μέγεθος του προθέματος επιτρέπει σε ένα δρομολογητή υποδικτύου να καταγράψει μια διαδρομή για κάθε κόμβο του υποδικτύου. Με αυτό τον τρόπο θα δίνει προσβασιμότητα στους προορισμούς που ανήκουν στο υποδίκτυό του.

Να σημειωθεί επίσης ότι το πεδίο 'A' χρησιμοποιείται όταν η ζεύξη μέσω της οποίας μεταδίδεται το RREP μήνυμα μπορεί να είναι ασταθής ή αναξιόπιστη. Όταν το RREP μήνυμα έχει συμπληρωμένο το πεδίο A, τότε ο παραλήπτης του RREP αναμένεται (και επιβάλλεται) να επιστρέψει ένα RREP-ACK μήνυμα.

4.5 Πλήρης περιγραφή λειτουργίας AODV

Προκειμένου να μεταδίδονται τα μηνύματα (RREQ, RREP, RERR) ορθά, πρέπει να διατηρούνται σε έναν πίνακα δρομολόγησης με τη μορφή εγγραφών συγκεκριμένες πληροφορίες κατάστασης για τους προορισμούς ενδιαφέροντος. Όλα τα μηνύματα AODV στέλνονται στην πόρτα (port) 654, χρησιμοποιώντας UDP (User Datagram Protocol).

4.5.1 Διατήρηση των ακολουθιακών αριθμών (sequence numbers)

Κάθε εγγραφή του πίνακα δρομολόγησης, πρέπει υποχρεωτικά να εμπεριέχει τις τελευταίες πληροφορίες όπως ο αύξων ακολουθιακός αριθμός για τον προορισμό. Ο συγκεκριμένος αριθμός καλείται “destination sequence number”, δηλαδή ακολουθιακός αριθμός προορισμού. Ο αριθμός αυτός ανανεώνεται όταν ένας κόμβος λαμβάνει νέα πληροφορία από τα RREQ, RREP ή RERR μηνύματα που αφορούν τον προορισμό. Ένας κόμβος – προορισμός αυξάνει τον ακολουθιακό του αριθμό σε μια από τις δύο ακόλουθες περιπτώσεις:

- πριν εκκινηθεί η διαδικασία αναζήτησης διαδρομής, όταν και πρέπει να αυξηθεί ο προσωπικός ακολουθιακός αριθμός προορισμού. Η συγκεκριμένη ενέργεια προστατεύει από τυχόν συγκρούσεις με προηγούμενα καθορισμένες διαδρομές προς την πηγή ενός RREQ.
- πριν ένας προορισμός ξεκινήσει την αποστολή ενός RREP πρέπει να ανανεώσει τον δικό του ακολουθιακό αριθμό στη μέγιστη τιμή ανάμεσα σε αυτήν του τρέχοντος αριθμού και του ακολουθιακού αριθμού προορισμού του RREQ πακέτου.

Ένας κόμβος μπορεί να αλλάξει τον ακολουθιακό αριθμό ενός προορισμού, για τον οποίο εντοπίζεται εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης σε μια από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Αν ο ίδιος αποτελεί προορισμό, και προσφέρει μια νέα διαδρομή προς τον εαυτό του ή
- Αν παραλάβει νέο AODV μήνυμα με ανανεωμένες πληροφορίες για τον ακολουθιακό αριθμό του προορισμού, ή τέλος
- Αν το μονοπάτι προς τον προορισμό εκπνεύσει ή διακοπεί.

4.5.2 Εγγραφές του πίνακα δρομολόγησης και λίστες precursor

Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο ελέγχου από γειτονικό του, ή δημιουργεί, ή ανανεώνει μια διαδρομή για έναν συγκεκριμένο προορισμό, ή υποδίκτυο, αναζητά στον πίνακα δρομολόγησης του μια έγκυρη εγγραφή προς το συγκεκριμένο προορισμό. Στην περίπτωση που δεν βρεθεί αντίστοιχη είσοδος στον πίνακα, τότε δημιουργείται μια νέα εγγραφή. Ο ακολουθιακός αριθμός είναι καθορισμένος από την πληροφορία που περιέχεται στο πακέτο ελέγχου. Ανανεώνεται μόνο αν ληφθεί ένας νέος ακολουθιακός αριθμός και συμβεί ένα από τα ακόλουθα:

1. είτε η τιμή του είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που έχει καταγραφεί στον πίνακα δρομολόγησης.
2. είτε η τιμή του είναι ίδια με την αντίστοιχη της εγγραφής, αλλά το άθροισμα των απαιτούμενων βημάτων είναι μικρότερο από το αντίστοιχο της εγγραφής του πίνακα δρομολόγησης.
3. ο ακολουθιακός αριθμός είναι άγνωστος.

Το πεδίο Lifetime της εγγραφής του πίνακα δρομολόγησης είτε καθορίζεται από το πακέτο ελέγχου είτε αρχικοποιείται στην τιμή ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT. Κάθε φορά που μια διαδρομή χρησιμοποιείται για να προωθήσει πακέτα δεδομένων, το πεδίο Lifetime της πηγής, του προορισμού, αλλά και του επόμενου κόμβου στο μονοπάτι, περιέχει τιμή μικρότερη από την αντίστοιχη του ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT. Το πεδίο lifetime για μια Active Route ανανεώνεται κάθε φορά που η διαδρομή χρησιμοποιείται ανεξάρτητα από το αν ο προορισμός είναι ένας απλός κόμβος ή ολόκληρο υποδίκτυο.

Για κάθε έγκυρη διαδρομή που διατηρείται στον πίνακα δρομολόγησης ενός κόμβου, διατηρείται και μια λίστα από precursors, δηλαδή ενδιάμεσους κόμβους, που μπορούν να προωθούν πακέτα στη διαδρομή. Οι precursors ειδοποιούνται από τον κόμβο κατά την απώλεια κάποιας ζεύξης στη διαδρομή.

4.5.3 Δημιουργία Αιτημάτων Εύρεσης Διαδρομής (Route Requests)

Ένας κόμβος διανέμει ένα RREQ πακέτο όταν απαιτηθεί μια διαδρομή για έναν προορισμό, χωρίς να είναι διαθέσιμη. Αυτό μπορεί να συμβεί αν ο προορισμός δεν είναι εκ των προτέρων γνωστός ή αν μια διαδρομή που ήταν έγκυρη έχει καταστεί ανενεργή.

Η τιμή του ακολουθιακού αριθμού προορισμού η οποία αντιγράφεται στον πίνακα δρομολόγησης, περιέχεται στο πακέτο και σχετίζεται με τον τελευταίο αριθμό που λήφθηκε. Ο συγκεκριμένος αριθμός αυξάνεται βάσει προτεραιότητας λήψης RREQs μηνυμάτων.

Το πεδίο RREQ ID αυξάνεται από την τιμή 1 μέχρι το τελευταίο RREQ ID που χρησιμοποιείται από τον τρέχοντα κόμβο. Κάθε κόμβος διατηρεί μόνο ένα RREQ ID, ενώ το πεδίο Hop Count τίθεται στην τιμή 0. Πριν την ευρυ-εκπομπή του RREQ, ο κόμβος πηγή καταχωρεί το RREQ ID καθώς και την IP διεύθυνση της πηγής, του RREQ για το PATH_DISCOVERY_TIME. Με αυτό τον τρόπο όταν ο κόμβος λαμβάνει το πακέτο ξανά από τους γείτονές του, δεν θα επαναμεταδώσει ή επαναπροωθήσει το πακέτο.

Η επικοινωνία μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού είναι αμφίδρομη. Ουσιαστικά θα πρέπει και ο προορισμός να διαθέτει μια διαδρομή προς την πηγή. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό με αποδοτικό τρόπο, η δημιουργία ενός RREP από έναν ενδιάμεσο κόμβο, θα πρέπει να συνοδεύεται από συγκεκριμένες ενέργειες που ενημερώνουν τον προορισμό για μια διαδρομή προς την πηγή. Ο αποστολέας επιλέγει το συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας για τους ενδιάμεσους κόμβους ορίζοντας μια σημαία που αναφέρεται σαν σημαία G.

Το πεδίο RREQ_RATELIMIT καθορίζει το μέγιστο αριθμό RREQ μηνυμάτων που δύναται να δημιουργήσει ένας κόμβος. Μετά την εκπομπή ενός RREQ, η πηγή αναμένει ένα RREP πακέτο ή άλλο μήνυμα ελέγχου με τις τρέχουσες πληροφορίες για τη διαδρομή προς τον προορισμό. Αν μια διαδρομή δεν έχει ληφθεί εντός του χρόνου που προσδιορίζεται στο πεδίο NET_TRAVERSAL_TIME, τότε ο κόμβος μπορεί να προσπαθήσει ξανά με επανεκπομπή άλλου RREQ. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές κριθεί σκόπιμο. Ο μέγιστος αριθμός επανεκπομπών, καθορίζεται από το πεδίο RREQ_RETRIES. Οι επανεκπομπές πρέπει να γίνουν εντός του χρόνου που καθορίζεται από το TTL. Κάθε νέα προσπάθεια πρέπει να αυξάνει ή να ανανεώνει το RREQ ID.

Η καταχώρηση των διαδρομών ακολουθούν την τεχνική FIFO (First-In, First-Out). Μπορεί να μην ανακαλυφθεί κάποια διαδρομή ακόμα και αν επιχειρηθούν τόσες επανεκπομπές όσες καθορίζονται από το πεδίο RREQ_RETRIES μέσα στο χρονικό διάστημα TTL. Ουσιαστικά αν δεν ληφθεί ένα RREP μήνυμα τότε όλα τα πακέτα δεδομένων με κατεύθυνση τον προορισμό θα απορριφθούν και ένα μήνυμα Destination Unreachable θα παραδοθεί στην πηγή.

4.5.4 Έλεγχος της διανομής των μηνυμάτων αίτησης διαδρομής

Προκειμένου να προστατευθεί το δίκτυο από ανούσια διανομή RREQ μηνυμάτων, η πηγή πρέπει να χρησιμοποιεί μια επεκταμένη τεχνική αναζήτησης δακτυλίου. Στη συγκεκριμένη τεχνική η πηγή αρχικά χρησιμοποιεί ένα $TTL = TTL_START$ το οποίο εισάγεται στην επικεφαλίδα του RREQ. Ταυτόχρονα θέτει την τιμή του timeout για την παραλαβή του RREP σε $RING_TRAVERSAL_TIME$. Το πεδίο TTL_VALUE που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του $RING_TRAVERSAL_TIME$ έχει την τιμή του αντίστοιχου πεδίου της επικεφαλίδας. Αν το RREQ σταματήσει χωρίς πρώτα να έχει ληφθεί αντίστοιχο RREP, τότε η πηγή επανεκπέμπει το RREQ, αυξάνοντας την τιμή του TTL. Η συγκεκριμένη αύξηση πραγματοποιείται μέσω του πεδίου $TTL_INCREMENT$. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το πεδίο TTL να πάρει την τιμή του $TTL_THRESHOLD$ του RREQ. Για κάθε νέα απόπειρα το TTL θα πρέπει να τεθεί στην τιμή $NET_DIAMETER$. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι την παραλαβή ενός RREP είναι ίση με την τιμή του πεδίου $RING_TRAVERSAL_TIME$. Η αποθηκευμένη τιμή του Hop Count σε μια άκρη είσοδο του πίνακα δρομολόγησης δείχνει την αντίστοιχη τελευταία τιμή που λήφθηκε και αποθηκεύτηκε στον πίνακα δρομολόγησης για τον συγκεκριμένο προορισμό. Όταν εμφανιστεί μια νέα διαδρομή για τον ίδιο προορισμό απαιτείται σε μεταγενέστερο στάδιο, όπως για παράδειγμα κατά την απώλεια της διαδρομής, τόσο το TTL που υπάρχει στην επικεφαλίδα IP του RREQ, το οποίο αρχικά έχει τεθεί στην τιμή του Hop Count αυξημένο κατά το $TTL_INCREMENT$.

Για αυτό το λόγο, ακολουθώντας κάθε παύση το TTL αυξάνεται κατά $TTL_INCREMENT$ μέχρι να φτάσει στο όριο του $TTL_THRESHOLD$. Αν ξεπεραστεί το συγκεκριμένο όριο τότε η τιμή του TTL θα οριστεί ίση με το $NET_DIAMETER$ ενώ ο χρόνος αναμονής για το RREP θα τεθεί ίσος με το $NET_TRAVERSAL_TIME$.

Μια είσοδος του πίνακα δρομολόγησης που έχει λήξει δεν πρέπει να διαγραφεί πριν να συμπληρωθεί το χρονικό διάστημα που καθορίζεται από την τιμή του τρέχοντος χρόνου προσαυξημένη κατά το χρόνο $DELETE_PERIOD$. Σε διαφορετική περίπτωση η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η διαδρομή, για παράδειγμα η τελευταία ενημέρωση για το άθροισμα των κόμβων, θα χαθεί. Επιπρόσθετα μπορεί να διαμορφωθεί και να τεθεί σε μεγαλύτερη τιμή ο χρόνος απαλοιφής για μια είσοδο του πίνακα δρομολόγησης. Οποιοδήποτε χρονικό διάστημα αποδοθεί στο χρόνο αναμονής ενός RREP μηνύματος για μια είσοδο του πίνακα δρομολόγησης δεν πρέπει να ξεπερνά το άθροισμα του τρέχοντος χρόνου και της διπλής τιμής του $NET_TRAVERSAL_TIME$.

4.5.5 Επεξεργασία και προώθηση αιτημάτων διαδρομών – Route Request

Όταν ένας κόμβος λάβει ένα RREQ μήνυμα, πρώτα δημιουργεί ή ανανεώνει μια διαδρομή βάσει των προηγούμενων βημάτων χωρίς ένα έγκυρο ακολουθιακό αριθμό και εν συνεχεία ελέγχει αν είχε ληφθεί κάποιο μήνυμα RREQ που έχει αποσταλεί από τον ίδιο κόμβο πηγή καθώς και τα RREQ ID των αιτήσεων που έχει λάβει εντός χρόνου ίσου με το $PATH_DISCOVERY_TIME$. Αν έχει ληφθεί RREQ μήνυμα με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά τότε ο κόμβος απορρίπτει το νεοαφιχθέν RREQ μήνυμα.

Σε περίπτωση που το μήνυμα γίνει δεκτό αρχικά αυξάνεται κατά ένα, η τιμή του μετρητή βημάτων στο RREQ μήνυμα προκειμένου να συμπεριληφθούν τα νέα βήματα της διαδρομής μέσα από τους ενδιαμέσους κόμβους. Στη συνέχεια ο κόμβος

αναζητά την αντίστροφη διαδρομή προς τον κόμβο – πηγή, με αντιστοίχιση του μεγαλύτερου προθέματος. Αν κριθεί αναγκαίο η διαδρομή δημιουργείται ή ανανεώνεται χρησιμοποιώντας τον ακολουθιακό αριθμό της πηγής από την εγγραφή του RREQ μηνύματος στον πίνακα δρομολόγησης. Η συγκεκριμένη αντίστροφη διαδρομή θα απαιτηθεί αν ο κόμβος λάβει ένα RREP μήνυμα πίσω στον κόμβο που ξεκίνησε - δημιούργησε το RREQ. Όταν η αντίστροφη διαδρομή δημιουργηθεί ή ανανεωθεί, οι ακόλουθες διεργασίες θα λάβουν χώρα στη διαδρομή:

1. ο ακολουθιακός αριθμός της πηγής για το RREQ συγκρίνεται με τον αντίστοιχο ακολουθιακό αριθμό του προορισμού που βρίσκεται στην είσοδο του πίνακα δρομολόγησης και αν είναι μεγαλύτερο από την αποθηκευμένη τιμή αντιγράφεται στη θέση της.
2. το πεδίο του έγκυρου ακολουθιακού αριθμού τίθεται στην τιμή true.
3. το επόμενο βήμα στον πίνακα δρομολόγησης αποτελεί ο κόμβος από τον οποίο λαμβάνεται το RREQ. Η συγκεκριμένη πληροφορία αντλείται από την IP διεύθυνση της πηγής, πληροφορία που βρίσκεται στην επικεφαλίδα IP. Συνήθως η συγκεκριμένη διεύθυνση δεν είναι ίδια με την IP διεύθυνση της πηγής του RREQ μηνύματος.
4. ο μετρητής βημάτων αντιγράφεται από το πεδίο Hop Count του RREQ μηνύματος.

Σε οποιαδήποτε στιγμή λαμβάνεται ένα RREQ μήνυμα, η ζωή της εισόδου για την αντίστροφη διαδρομή προς τη διεύθυνση IP της πηγής τίθεται στη μέγιστη μεταξύ των δύο τιμών ExistingLifetime και MinimalLifetime, όπου το MinimalLifetime καθορίζεται από τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

$$\text{MinimalLifetime} = \text{currenttime} + 2 * \text{NET_TRAVERSAL_TIME} - 2 * (\text{HopCount} * \text{NODE_TRAVERSAL_TIME})$$

Ο τρέχων κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει την αντίστροφη διαδρομή για να προωθήσει πακέτα δεδομένων με τον ίδιο τρόπο όπως για οποιαδήποτε άλλη διαδρομή στον πίνακα δρομολόγησης. Αν ένας κόμβος δεν παράγει ένα RREP, ακολουθώντας τους κανόνες επεξεργασίας και αν οι εισερχόμενες επικεφαλίδες IP έχουν TTL μεγαλύτερο από το 1, ο κόμβος ανανεώνεται και ευρυ-εκπέμπει το RREQ πακέτο στη διεύθυνση 255.255.255.255 σε κάθε μία από τις διαμορφωμένες διεπαφές. Για να ανανεωθεί το RREQ το TTL ή το πεδίο που καθορίζει το όριο των βημάτων για την εξερχόμενη IP επικεφαλίδα μειώνεται κατά ένα, ενώ το πεδίο Hop Count του RREQ μηνύματος αυξάνεται κατά ένα, για την καταμέτρηση του νέου βήματος διαμέσου του νέου βήματος μέσω του νέου ενδιάμεσου κόμβου.

Στο τέλος ο ακολουθιακός αριθμός του προορισμού για τον αιτούμενο προορισμό τίθεται στο μέγιστο της αντίστοιχης τιμής που λαμβάνεται στο RREQ μήνυμα και την τιμή του αντίστοιχου ακολουθιακού αριθμού του προορισμού που έχει διατηρηθεί από τον κόμβο και αφορά τον προορισμό. Παρόλα αυτά ο κόμβος που προωθεί δεν πρέπει να μεταβάλλει την τιμή που έχει διατηρηθεί για τον ακολουθιακό αριθμό του προορισμού, ακόμα και αν η συγκεκριμένη τιμή που λήφθηκε από το εισερχόμενο RREQ είναι μεγαλύτερη από την τιμή που έχει διατηρηθεί από τον ενδιάμεσο κόμβο που προωθεί το μήνυμα.

Σε αντίθετη περίπτωση εάν ένας κόμβος δημιουργεί ένα RREP μήνυμα, τότε ο κόμβος απορρίπτει το RREQ. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι αν η απάντηση του ενδιάμεσου κόμβου σε κάθε μετάδοση μηνυμάτων RREQ για ένα ιδιαίτερο προορισμό, θα αποδειχθεί ότι ο προορισμός δεν λαμβάνει κανένα μήνυμα ανακάλυψης. Σε αυτή την κατάσταση ο προορισμός δεν μαθαίνει από το RREQ μήνυμα για μια διαδρομή προς τον κόμβο – πηγή. Αυτό μπορούσε να προκαλέσει τον προορισμό να εκκινήσει μια ανακάλυψη διαδρομής, για παράδειγμα αν η πηγή

επιχειρήσει να εγκαθιδρύσει μια TCP σύννοδο. Προκειμένου ο προορισμός να «μάθει» τις διαθέσιμες διαδρομές προς τον κόμβο – πηγή, η πηγή πρέπει να θέσει τη σημαία “gratuitous RREP” (‘G’), στο RREQ μόνο εάν για οποιοδήποτε λόγο ο προορισμός είναι πιθανό να χρειαστεί μια διαδρομή προς την πηγή. Αν σε απάντηση ενός RREQ που έχει θέσει τη σημαία ‘G’, ένας ενδιάμεσος κόμβος επιστρέφει ένα RREP, τότε πρέπει επίσης να επιστρέψει με unicast ένα RREP στον κόμβο προορισμό.

4.5.6 Δημιουργία απαντήσεων διαδρομών (Route Replies - RREP)

Ένας κόμβος δημιουργεί RREP σε μια από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

1. εάν αποτελεί ο ίδιος τον προορισμό του μηνύματος ή
2. εάν έχει μια ενεργή διαδρομή προς τον προορισμό, οπότε και ο αντίστοιχος ακολουθιακός αριθμός προορισμού που θα είναι αποθηκευμένος στον πίνακα δρομολόγησης θα είναι έγκυρος και μεγαλύτερος ή ίσος με τον αντίστοιχο που αναγράφεται στο πεδίο Destination Sequence Number του RREQ μηνύματος, ενώ η σημαία ‘D’ του πεδίου “destination only” δεν θα τεθεί σε κάποια τιμή.

Όταν δημιουργηθεί ένα RREP μήνυμα, ένας κόμβος αντιγράφει την IP διεύθυνση του προορισμού και τον ακολουθιακό αριθμό της πηγής για το RREQ μήνυμα στα αντίστοιχα πεδία του RREP μηνύματος. Η επεξεργασία διαφοροποιείται ελάχιστα και εξαρτάται από το αν ο κόμβος είναι ο αιτούμενος προορισμός ή αν είναι ενδιάμεσος κόμβος μιας νέας διαδρομής προς τον προορισμό.

Όταν δημιουργηθεί ένα RREP μήνυμα μεταδίδεται με unicast τρόπο στο επόμενο βήμα προς την πηγή του RREQ, τότε το πεδίο Hop Count αυξάνεται κατά ένα σε κάθε βήμα. Παρόλαυτά όταν ένα RREP φτάνει στον προορισμό, το Hop Count αναπαριστά την απόσταση, σε βήματα, του προορισμού από την πηγή.

4.5.7 Δημιουργία Route Reply από τον προορισμό

Αν ο κόμβος που δημιουργεί το RREP αποτελεί τον προορισμό, τότε πρέπει να αυξήσει τον δικό του ακολουθιακό αριθμό κατά ένα αν ο ακολουθιακός αριθμός του RREQ πακέτου είναι ίσος με την αυξημένη τιμή. Σε αντίθετη περίπτωση ο προορισμός δεν μεταβάλλει τον ακολουθιακό αριθμό πριν τη δημιουργία του RREP μηνύματος. Ο κόμβος προορισμός τοποθετεί, τον ακολουθιακό αριθμό του που έχει προσφάτως ανανεωθεί στο πεδίο Destination Sequence Number του RREP μηνύματος και προσθέτει την τιμή 0 στο πεδίο Hop Count του RREP.

Ο κόμβος προορισμός αντιγράφει την τιμή του MY_ROUTE_TIMEOUT στο πεδίο Lifetime του RREP. Κάθε κόμβος μπορεί να επαναπροσδιορίσει την τιμή του για το MY_ROUTE_TIMEOUT, ακολουθώντας όμως συγκεκριμένους περιορισμούς.

4.5.8 Δημιουργία Route Reply από ενδιάμεσο κόμβο

Εάν ο κόμβος που δημιουργεί το RREP δεν είναι ο προορισμός, αλλά ένας ενδιάμεσος στη διαδρομή προς την πηγή, αντιγράφει το δικό του γνωστό ακολουθιακό αριθμό για τον προορισμό στο πεδίο Destination Sequence Number του RREP μηνύματος.

Ο ενδιάμεσος κόμβος ανανεώνει την είσοδο με τη διαδρομή προώθησης του μηνύματος τοποθετώντας το τελευταίο βήμα, από το οποίο έλαβε το RREQ, όπως υποδείχτηκε από το πεδίο της επικεφαλίδας IP, που περιέχει την IP της πηγής, στη λίστα με τους precursor για την είσοδο του πίνακα δρομολόγησης που περιέχει τη διαδρομή προώθησης π.χ. την είσοδο για το Destination IP Address. Ο ενδιάμεσος κόμβος ανανεώνει τις διαθέσιμες διαδρομές του προς την πηγή του RREQ, στον πίνακα δρομολόγησης του. Τοποθετεί το επόμενο βήμα προς τον προορισμό στην

λίστα precursor της εγγραφής που αφορά την αντίστροφη διαδρομή από τον προορισμό στην πηγή.

Ο ενδιαμέσος κόμβος τοποθετεί την απόστασή του σε βήματα από τον προορισμό, όπως καθορίζεται από την εγγραφή του μετρητή βημάτων στον πίνακα δρομολόγησης. Η συγκεκριμένη εγγραφή καθορίζεται από το πεδίο Count του RREP πακέτου. Το πεδίο Lifetime του RREP υπολογίζεται αφαιρώντας τον τρέχον χρόνο από το χρόνο λήξης του μηνύματος που έχει αποθηκευτεί στον πίνακα δρομολόγησης.

4.6 Ενεργειακός υπολογισμός AODV με χρήση ns-2

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα ενός αριθμού σεναρίων για τη λειτουργία του AODV. Τα σενάρια που θα παρουσιαστούν θα προσομοιωθούν με τη χρήση του εργαλείου ns-2 (network simulator) και πιο συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί η έκδοση 2.30. Η πλατφόρμα αυτή είναι διαθέσιμη για ερευνητικούς σκοπούς στη θέση <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> και έχει δημιουργηθεί από το Information Science Institute του πανεπιστημίου Southern California. Η έκδοση αυτή επιλέχθηκε γιατί λαμβάνει υπόψη της την ενεργειακή εξάντληση των κόμβων εξαιτίας της μετάδοσης.

Πιο συγκεκριμένα στη διανομή του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε συμπεριλαμβάνονται τα αρχεία energy.h και energy.cc. Τα συγκεκριμένα αρχεία υλοποιούν τις απαιτούμενες συναρτήσεις για τον υπολογισμό της ενεργειακής πτώσης του κόμβου ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας του.

Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιείται η αρχική ενέργεια του κόμβου μαζί με το χρόνο που βρίσκεται στην αντίστοιχη κατάσταση λειτουργίας. Για παράδειγμα αν ο κόμβος μεταδίδει με μια προκαθορισμένη αρχική ενέργεια για καθορισμένο χρονικό διάστημα, συγκεκριμένο αριθμό πακέτων, τότε η ενεργειακή εξάντληση του κόμβου θα υπολογίζεται σαν το γινόμενο της απαιτούμενης για τη μετάδοση ενέργειας επί το χρονικό διάστημα που ο κόμβος μεταδίδει για σταθερό μέγεθος πακέτου.

Μέσω του tel σεναρίου καθορίζεται η αρχική ενέργεια των κόμβων. Στη συνέχεια κατά τη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών των κόμβων, καθορίζεται η ποσότητα ενέργειας που δαπανάται για τον κόμβο σε κάθε μία από τις 3 καταστάσεις. Ένα απλό σενάριο tel εμφανίζεται στον ακόλουθο πίνακα. Τα σημεία που αφορούν τον ενεργειακό υπολογισμό εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα.

set opt(chan)	Channel/WirelessChannel	
set opt(prop)	Propagation/TwoRayGround	
set opt(netif)	Phy/WirelessPhy	
#set opt(mac)	Mac/802_11	;/# MAC type
set opt(mac)	Mac/SMAC	;/# MAC type
set opt(ifq)	Queue/DropTail/PriQueue	
set opt(ll)	LL	
set opt(ant)	Antenna/OmniAntenna	
set opt(x)	800	;/# X dimension of the topography
set opt(y)	800	;/# Y dimension of the topography
set opt(cp)	"../mobility/scen/cbr-50-10-4-512"	
set opt(sc)	"../mobility/scen/scen-670x670-50-600-20-0"	
set opt(ifqlen)	50	;/# max packet in ifq
set opt(nn)	2	;/# number of nodes
set opt(seed)	0.0	
set opt(stop)	700.0	;/# simulation time

```

set opt(tr)           MyTest.tr      ;# trace file
set opt(nam)          MyTest.nam     ;# animation file
set opt(rp)            DumbAgent      ;# routing protocol script
set opt(lm)            "off"         ;# log movement
set opt(agent)         Agent/DSDV
set opt(energymodel)   EnergyModel   ;
#set opt(energymodel)  RadioModel    ;
set opt(radiomodel)    RadioModel    ;
set opt(initialenergy) 1000           ;# Initial energy in Joules
#set opt(logenergy)    "on"          ;# log energy every 150 seconds

```

Mac/SMAC set syncFlag_ 1

Mac/SMAC set dutyCycle_ 10

```

set ns_      [new Simulator]
set topo     [new Topography]
set tracefd  [open $opt(tr) w]
set namtrace [open $opt(nam) w]
set prop     [new $opt(prop)]

```

\$topo load_flatgrid \$opt(x) \$opt(y)

ns-random 1.0

\$ns_ trace-all \$tracefd

#\$ns_ namtrace-all-wireless \$namtrace 500 500

#

Create god

#

create-god \$opt(nn)

καθορισμός των χαρακτηριστικών του κόμβου

#global node setting

```

$ns_ node-config -adhocRouting DumbAgent \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -channelType $opt(chan) \
    -topoInstance $topo \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace ON \
    -energyModel $opt(energymodel) \
    -idlePower 1.0 \
    -rxPower 1.0 \
    -txPower 1.0 \
    -sleepPower 0.001 \

```

```

-transitionPower 0.2 \
-transitionTime 0.005 \
-initialEnergy $opt(initialenergy)

$ns_ set WirelessNewTrace_ ON
#set AgentTrace ON
#set RouterTrace OFF
#set MacTrace ON

for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0
}

# $node_(1) set agentTrace ON
# $node_(1) set macTrace ON
# $node_(1) set routerTrace ON
# $node_(0) set macTrace ON
# $node_(0) set agentTrace ON
# $node_(0) set routerTrace ON

set udp_(0) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(0) $udp_(0)
set null_(0) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(1) $null_(0)
set cbr_(0) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_(0) set packetSize_ 512
$cbr_(0) set interval_ 10.0
$cbr_(0) set random_ 1
$cbr_(0) set maxpkts_ 50000
$cbr_(0) attach-agent $udp_(0)
$ns_ connect $udp_(0) $null_(0)

$ns_ at 1.00 "$cbr_(0) start"
#$ns_ at 177.000 "$node_(0) set ifqLen"

#
# Tell all the nodes when the simulation ends
#
for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $opt(stop) "$node_($i) reset";
}
$ns_ at $opt(stop) "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"

set b [$node_(0) set mac_(0)]
#set c [$b set freq_]
set d [Mac/SMAC set syncFlag_]

#set e [$node_(0) set netif_(0)]

```

```
#set c [$e set L_]
set c [Mac/SMAC set dutyCycle_]
#puts $tracefd "M 0.0 nn $opt(nn) x $opt(x) y $opt(y) rp $opt(rp)"
#puts $tracefd "M 0.0 sc $opt(sc) cp $opt(cp) seed $opt(seed)"
#puts $tracefd "M 0.0 prop $opt(prop) ant $opt(ant)"
#puts $tracefd "V $b : $c : $d : "
puts "Starting Simulation..."
$ns_run
```

Πίνακας 6 : Παράδειγμα tcl script που εισάγει ενεργειακό μοντέλο

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η αρχική ενέργεια τίθεται στα 1000 joules, ενώ καθορίζονται και οι τιμές ενεργειακής κατανάλωσης για κάθε μια από τις καταστάσεις.

**-idlePower 1.0 **
**-sleepPower 0.001 **
**-transitionPower 0.2 **

Επίσης διαμορφώνεται ο χρόνος μετάβασης μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας, αλλά και η ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομπό και το δέκτη σε κάθε μετάδοση/παραλαβή μηνύματος.

**-transitionTime 0.005 **
**-txPower 1.0 **
**-rxPower 1.0 **

4.6.1 Παρουσίαση σεναρίων προσομοίωσης

Για να δοκιμαστεί η λειτουργία του AODV σε διαφορετικές συνθήκες δημιουργήθηκαν διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης. Οι προσομοιώσεις βασίζονται στην αναπαράσταση της ενεργειακής κατανάλωσης του δικτύου για διαφορετικό αριθμό κόμβων. Το βασικό κριτήριο αξιολόγησης είναι η υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων του δικτύου, που συμμετέχουν σε ενεργές διαδρομές, καθώς και η μέση ενέργεια του δικτύου, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Εξετάζεται η συμπεριφορά του AODV σε ένα MANET λαμβάνοντας υπόψη την κλιμάκωση του δικτύου. Τα σενάρια αφορούν τον τρόπο λειτουργίας του AODV για ένα δίκτυο 10 κόμβων που κινούνται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως μέγιστη ταχύτητα, αλλά τυχαίο τρόπο μέσα σε ένα χώρο 500 x 500 m². Τα σενάρια κίνησης των κόμβων στο χώρο δημιουργούνται με χρήση της εντολής **setdest** που παρέχεται από τον ns-2.30. Το σενάριο των 10 κόμβων δοκιμάζεται για 2 διαφορετικές περιπτώσεις κίνησης.

Στην πρώτη περίπτωση οι κόμβοι θεωρούνται ακίνητοι καθώς η μέγιστη ταχύτητα ορίζεται σε 0. Η εντολή για τη δημιουργία του αντίστοιχου αρχείου είναι η ακόλουθη:

./setdest -v 1 -n 10 -p 0.0 -M 0.0 -t 200 -x 500 -y 500 > scen-10-max0

όπου:

-v	έκδοση
-n	αριθμός κόμβων
-p	χρονικό διάστημα παύσης κίνησης κόμβων
-M	μέγιστη ταχύτητα κίνησης των κόμβων
-t	χρονικό διάστημα προσομοίωσης
-x	άξονας x του πλέγματος
	κίνησης των κόμβων
-y	άξονας y του πλέγματος
	κίνησης των κόμβων

Το αρχείο που δημιουργείται στην προκειμένη περίπτωση έχει την ακόλουθη μορφή όπως φαίνεται στον Πίνακα 7:

```
#
# nodes: 10, pause: 0.00, max speed: 0.10, max x: 500.00, max y:
500.00
#
$node_(0) set X_ 400.243712414683
$node_(0) set Y_ 420.058584393045
$node_(0) set Z_ 0.000000000000
$node_(1) set X_ 334.370955137806
$node_(1) set Y_ 458.503230095066
$node_(1) set Z_ 0.000000000000
$node_(2) set X_ 131.555169556168
$node_(2) set Y_ 439.575826034828
$node_(2) set Z_ 0.000000000000
$node_(3) set X_ 417.497908309932
$node_(3) set Y_ 263.649874911451
$node_(3) set Z_ 0.000000000000
$node_(4) set X_ 218.341066132985
$node_(4) set Y_ 468.236582212432
$node_(4) set Z_ 0.000000000000
.....
.....
```

Πίνακας 7: Περιεχόμενα αρχείου με πληροφορίες κίνησης των κόμβων

Στη δεύτερη περίπτωση η μέγιστη ταχύτητα κίνησης των συσκευών του δικτύου καθορίζεται στα 20m/s. Η εντολή για τη δημιουργία του αντίστοιχου αρχείου είναι η ακόλουθη:

```
./setdest -v 1 -n 10 -p 0.0 -M 20.0 -t 200 -x 500 -y 500 > scen-10-max20
```

Αντίστοιχα θα σχηματιστούν σχετικά αρχεία κίνησης δεδομένων μεταξύ των κόμβων. Θεωρώντας την κίνηση των πακέτων σαν σταθερή – constant bitrate (CBR) τα αντίστοιχα αρχεία θα δημιουργηθούν με χρήση της εντολής:

```
ns cbrgen.tcl [-type cbr|tcp] [-nn nodes] [-seed seed] [-mc connections]
[-rate rate]
```

όπου:

-type	τύπος κίνησης δεδομένων
-nn	αριθμός κόμβων
-seed	μεταβλητή που καθορίζει την αρχική τιμή της γεννητριας παραγωγής δεδομένων
-mc	μέγιστος αριθμός συνδέσεων που πραγματοποιούνται
-rate	χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των αποστολών πακέτων δεδομένων ανάμεσα στους κόμβους

Για τις ανάγκες της προσομοίωσής μας θα δημιουργηθούν 4 αρχεία κίνησης δεδομένων. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις που εξετάζονται θα αλλάζει και μια από τις διαθέσιμες παραμέτρους, επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον μας στο μέγιστο αριθμό συνδέσεων, καθώς και στο χρονικό διάστημα μεταξύ των αποστολών πακέτων ανάμεσα στους κόμβους.

Στην πρώτη περίπτωση ο αριθμός των μέγιστων ζεύξεων καθορίζεται στις 10, ενώ το rate που καθορίζει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των μεταδόσεων των πακέτων του αλγορίθμου ορίζεται στα 8 sec. Το συγκεκριμένο αρχείο δημιουργείται με την ακόλουθη εντολή:

```
ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 10 -seed 1.0 -mc 10 -rate 0.125 > cbr-10-0.125
```

Το αρχείο που προκύπτει θα έχει την μορφή που εμφανίζεται στον Πίνακα 8:

```
#
# nodes: 10, max conn: 10, send rate: 8.0, seed: 1.0
#
#
# 1 connecting to 2 at time 2.5568388786897245
#
set udp_(0) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(1) $udp_(0)
set null_(0) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(2) $null_(0)
set cbr_(0) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_(0) set packetSize_ 512
$cbr_(0) set interval_ 8.0
$cbr_(0) set random_ 1
$cbr_(0) set maxpkts_ 10000
$cbr_(0) attach-agent $udp_(0)
$ns_ connect $udp_(0) $null_(0)
$ns_ at 2.5568388786897245 "$cbr_(0) start"
#
# 4 connecting to 5 at time 56.333118917575632
#
set udp_(1) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(4) $udp_(1)
set null_(1) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(5) $null_(1)
set cbr_(1) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_(1) set packetSize_ 512
$cbr_(1) set interval_ 8.0
$cbr_(1) set random_ 1
$cbr_(1) set maxpkts_ 10000
$cbr_(1) attach-agent $udp_(1)
$ns_ connect $udp_(1) $null_(1)
$ns_ at 56.333118917575632 "$cbr_(1) start"
#
...
```

Πίνακας 8: Παρουσίαση του αρχείου δημιουργίας κίνησης πακέτων δεδομένων μεταξύ των κόμβων

Στην δεύτερη περίπτωση ο αριθμός των μέγιστων ζεύξεων καθορίζεται στην τιμή 10, ενώ το χρονικό διάστημα rate ορίζεται στα 4 sec. Το συγκεκριμένο αρχείο δημιουργείται με την εντολή:

```
ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 10 -seed 1.0 -mc 10 -rate 0.25 > cbr-10-0.25
```

Στην τρίτη περίπτωση ο αριθμός των μέγιστων ζεύξεων καθορίζεται στις 5, ενώ το rate ορίζεται στα 4 sec. Το συγκεκριμένο αρχείο δημιουργείται με την εντολή:

```
ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 10 -seed 1.0 -mc 5 -rate 0.25 > cbr-5-0.25
```

Στην τέταρτη περίπτωση ο αριθμός των μέγιστων ζεύξεων καθορίζεται στις 8, ενώ το rate 4 sec. Το συγκεκριμένο αρχείο δημιουργείται με την εντολή:

```
ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 10 -seed 1.0 -mc 8 -rate 0.25 > cbr-8-0.25
```

Όλοι οι συνδυασμοί αρχείων κίνησης κόμβων και δεδομένων θα χρησιμοποιηθούν σε είσοδοι σε ένα αρχείο tcl με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 9:

set val(rp)	AODV	; # πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται
set val(nn)	10	; # αριθμός κινητών κόμβων
...		
set val(cp)	"../cbr-10-0.25"	; # σενάριο κίνησης πακέτων δεδομένων
set val(sc)	"../scen-10-max0"	; # σενάριο κίνησης κόμβων
set val(stop)	250	
set val(rxPower)	10	; # Ισχύς σε watt
set val(txPower)	100	; # Ισχύς μετάδοσης σε W
set val(energymodel)	EnergyModel	;
set val(initialenergy)	100	; # Αρχική ενέργεια σε Joules
set val(sleeppower)	0.5	; # ενέργεια σε W που δαπανάται από τον κόμβο όταν βρίσκεται σε κατάσταση sleep W 15uA $P=I \cdot R=11.25 \cdot 10E-9$ W
set val(tp)	0.5	; # ισχύς (Watt) που καταναλώνεται κατά τη μετάβαση του κόμβου από την κατάσταση sleep στην idle (ενεργή)
set val(tt)	0.05	; # χρόνος (second) που απαιτείται για τη μετάβαση από την κατάσταση λειτουργίας sleep σε idle
set val(ip)	0.5	; # ισχύς ενεργής κατάστασης 8 mA όπου $P=0.0032$ σε Watt

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά που διαμορφώνονται στα εισαγωγικά του αρχείου .tcl

Επίσης οι κόμβοι διαμορφώνονται σύμφωνα με τα ακόλουθα:

```

$ns_ node-config      -adhocRouting $val(rp) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -energyModel $val(energymodel) \
    -idlePower $val(ip) \
    -rxPower $val(rxPower) \
    -txPower $val(txPower) \
    -sleepPower $val(sleeppower) \
    -transitionPower $val(tp) \
    -transitionTime $val(tt) \
    -initialEnergy $val(initialenergy) \
    -channelType $val(chan) \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace OFF \
    -movementTrace OFF \

```

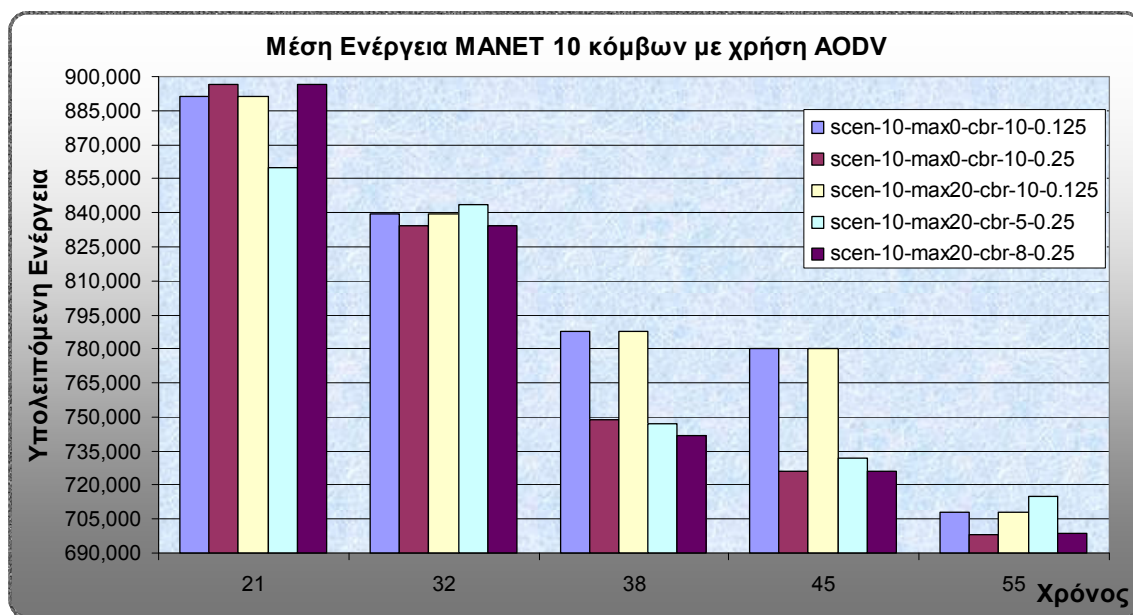
Πίνακας 10: Διαμόρφωση των χαρακτηριστικών των κόμβων του δικτύου προσομοίωσης

Εν συνεχεία τα αρχεία tr που προκύπτουν τα επεξεργαζόμαστε με ένα αρχείο .awk για να αντληθούν οι τιμές ενέργειας του κάθε κόμβου, καθώς και οι τιμές μέσης ενέργειας του δικτύου. Η μέση ενέργεια του δικτύου υπολογίζεται αθροιστικά,

λαμβάνοντας υπόψη τις υπολειπόμενες ενέργειες των συσκευών που συμμετέχουν στο δίκτυο. Στους πίνακες που ακολουθούν εμφανίζονται τα αποτελέσματα μέσης ενέργειας του δικτύου για κάθε συνδυασμό αρχείων που χρησιμοποιήθηκαν για 10, 30 και 50 κόμβους, καθώς και τα αντίστοιχα γραφήματα. Σε όλα τα γραφήματα που ακολουθούν ο άξονας x αφορά τις χρονικές βαθμίδες της προσομοίωσης για τις οποίες συλλέχθηκαν τα αποτελέσματα, ενώ ο άξονας y την υπολειπόμενη ενέργεια του δικτύου για τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Οι τιμές του άξονα x είναι σε δευτερόλεπτα (sec), ενώ του άξονα y σε Joules.

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου				
Αρχείο κίνησης	Αρχείο δεδομένων	21 sec	32 sec	38 sec	45 sec	55 sec
scen-10-max0	cbr-10-0.125	891.342	839.338	787.487	780.253	707.755
scen-10-max0	cbr-10-0.25	896.641	834.137	748.579	725.844	698.197
scen-10-max20	cbr-10-0.125	891.342	839.338	787.487	780.253	707.755
scen-10-max20	cbr-5-0.25	859.815	843.644	746.836	731.647	715.113
scen-10-max20	cbr-8-0.25	896.641	834.137	742.012	725.976	698.605

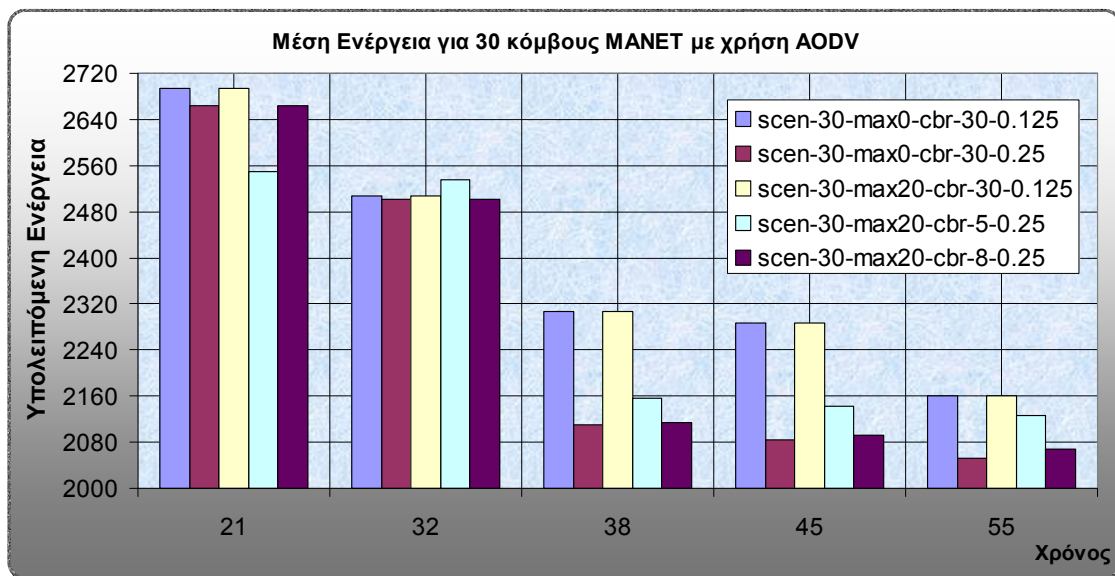
Πίνακας 11: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 10 κόμβων



Εικόνα 13: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 10 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου				
Αρχείο κίνησης	Αρχείο δεδομένων	21 sec	32 sec	38 sec	45 sec	55 sec
scen-30-max0	cbr-30-0.125	2694.47	2507.9	2307.62	2287.44	2160.86
scen-30-max0	cbr-30-0.25	2664.81	2500.8	2109.75	2083.79	2052.03
scen-30-max20	cbr-30-0.125	2694.47	2507.9	2307.62	2287.44	2160.86
scen-30-max20	cbr-5-0.25	2548.82	2534.82	2156.57	2141.85	2126.54
scen-30-max20	cbr-8-0.25	2664.81	2500.8	2114.76	2092.41	2069.15

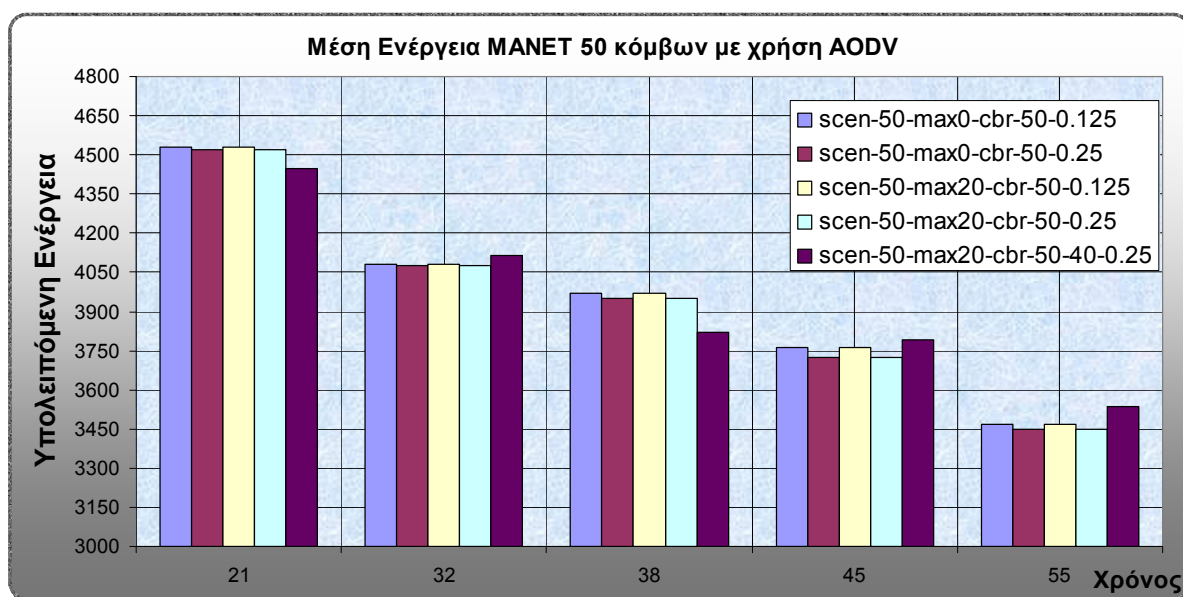
Πίνακας 12: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 30 κόμβων



Εικόνα 14: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 30 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου				
Αρχείο κίνησης	Αρχείο δεδομένων	21 sec	32 sec	38 sec	45 sec	55 sec
scen-50-max0	cbr-50-0.125	4531.59	4079.79	3969.63	3761.32	3467.1
scen-50-max0	cbr-50-0.25	4522.52	4074	3949.54	3722.87	3449.14
scen-50-max20	cbr-50-0.125	4531.59	4079.79	3969.63	3761.32	3467.1
scen-50-max20	cbr-50-0.25	4522.52	4074	3949.54	3722.87	3449.14
scen-50-max20	cbr-50-40-0.25	4446.08	4112.92	3819.41	3792.68	3535.3

Πίνακας 13: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 50 κόμβων



Εικόνα 15: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 50 κόμβων για τα 4 διαφορετικά σενάρια

4.7 Ενεργειακές αλλαγές – Βελτιστοποιήσεις του αλγορίθμου

Δημιουργήθηκαν δύο νέες εκδόσεις του πρωτοκόλλου δρομολόγησης AODV. Οι συγκεκριμένες αλλαγές έχουν στόχο να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση του πρωτοκόλλου. Πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες αλλαγές:

1. στα πακέτα AODV που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων και πιο συγκεκριμένα στο RREQ και το RREP.
2. στην καταχώρηση που γίνεται στον πίνακα δρομολόγησης
3. στη λειτουργία του πρωτοκόλλου.

Στην πρώτη περίπτωση προστέθηκαν δύο νέα πεδία στις επικεφαλίδες των πακέτων. Τα συγκεκριμένα πεδία στόχο έχουν να καταγράψουν και να διατηρήσουν τιμές ενέργειας των κόμβων που συμμετέχουν σε μια διαδρομή. Αναλύοντας τον τρόπο λειτουργίας στο ένα πεδίο συγκρατείται η τιμή της ελάχιστης ενέργειας της διαδρομής που ακολούθησε το πακέτο και στο άλλο πεδίο η δεύτερη μικρότερη ενέργεια. Ως ελάχιστη ενέργεια διαδρομής θεωρείται η τιμή της ενέργειας του κόμβου με το μικρότερο υπόλοιπο. Η εισαγωγή του δεύτερου πεδίου έγινε προκειμένου να ξεπεραστεί η πιθανότητα η ελάχιστη ενέργεια να ανήκει στον κόμβο που εκίνησε τη διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής, δηλαδή στην πηγή του μηνύματος RREQ ή RREP. Άλλωστε αν αυτός ο κόμβος έχει το μικρότερο ενεργειακό υπόλοιπο τότε δεν θα μπορεί ο αλγόριθμος να πάρει απόφαση για την κυρίαρχη ενεργειακά διαδρομή, καθώς όλα τα πακέτα θα έχουν την ίδια τιμή.

Επιπλέον προστέθηκαν δύο νέα πεδία στον πίνακα δρομολόγησης για να εισάγονται και να διατηρούνται οι δύο αυτές τιμές για την κάθε διαδρομή. Αναφορικά με την τρίτη μετατροπή ο κόμβος που επιθυμεί μια διαδρομή, είναι δηλαδή η πηγή μιας πληροφορίας, εκπέμπει με ευρυ-εκπομπή (broadcast) ένα μήνυμα AODV request με συγκεκριμένο αναγνωριστικό bid (broadcast id) και μοναδικό αριθμό πηγής sequence number. Στο συγκεκριμένο μήνυμα το πεδίο της ελάχιστης ενέργειας συμπληρώνεται με την τρέχουσα ενέργειά του.

Οι κόμβοι που θα λάβουν το μήνυμα request, ελέγχουν αρχικά στον πίνακα δρομολόγησης τους αν έχουν διαδρομή προς την πηγή του πακέτου. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποια καταχώρηση δημιουργείται μια νέα με τον αριθμό των βημάτων και το sequence number της πηγής. Αν όμως η διαδρομή υπάρχει και εφόσον αυτή που μόλις έφτασε έχει μεγαλύτερο sequence number, πρόκειται δηλαδή για νεότερη τότε συγκρίνεται με την υπάρχουσα διαδρομή. Σε περίπτωση μάλιστα που η νεότερη διαδρομή διαθέτει μικρότερο αριθμό βημάτων (hops) από την ήδη υπάρχουσα καταχώρηση, τότε ο πίνακας δρομολόγησης του κόμβου ανανεώνεται σύμφωνα με την πιο πρόσφατη και βελτιωμένη τουλάχιστον από άποψη βημάτων, πληροφορία.

Σύμφωνα με τις προτεινόμενες επεκτάσεις που πραγματοποιήσαμε στην περίπτωση που δεν υπάρχει διαδρομή τότε καταχωρείται μια νέα διαδρομή που εκτός από τις υπάρχουσες πληροφορίες (hops, sequence number) διατηρεί και την ενέργεια της διαδρομής. Στην περίπτωση που υπάρχει πλήρη καταχώρηση στον πίνακα τότε ελέγχεται και η ενέργεια της εγγραφής σε σχέση με την αντίστοιχη του πακέτου που μόλις αφήχθη. Εφόσον το πακέτο έχει υψηλότερη τιμή ενέργειας αυτή τοποθετείται στον πίνακα δρομολόγησης.

Εν συνεχεία ο κόμβος που έλαβε το request, ελέγχει εάν υπάρχει καταχώρηση για τον προορισμό. Αν ο ίδιος αποτελεί τον προορισμό τότε αποστέλλει unicast μήνυμα AODV reply προς τον κόμβο από όπου έλαβε το request. Στην επέκτασή του AODV ο κόμβος συγκρίνει την ενέργεια του πακέτου που έχει λάβει με τη δική του και στο μήνυμα reply που αποστέλλει τοποθετεί την ελάχιστη εκ των δύο. Αν όμως δεν είναι

ο προορισμός αλλά διαθέτει διαδρομή προς τον προορισμό τότε στέλνει κατευθείαν την απάντηση προς την πηγή εκ μέρους του προορισμού. Για αυτόν τον λόγο το μήνυμα λέγεται gratuitous. Στην προτεινόμενη επέκταση στο reply μήνυμα τοποθετείται η μικρότερη ενέργεια ανάμεσα στις εξής τιμές:

- I. στην ενέργεια του πακέτου που ελήφθη, δηλαδή της αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή του RREQ
- II. στην ενέργεια του κόμβου όπου βρίσκεται το πακέτο τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή είτε πρόκειται για ενδιάμεσο είτε για τον προορισμό
- III. στην ενέργεια της διαδρομής που έχει ήδη αυτός ο κόμβος.

Συνεπώς υπάρχει βεβαιότητα ότι το πακέτο reply που θα ληφθεί από την πηγή θα περιέχει πράγματι την ελάχιστη ενέργεια που έχει κάποιος κόμβος στη διαδρομή μέχρι τον προορισμό. Αν δεν υπάρχει διαδρομή προς τον προορισμό, τότε το μόνο που δύναται ο κόμβος να κάνει είναι να επανεκπέμψει με ευρυ-εκπομπή (broadcast) το μήνυμα RREQ που έλαβε, τοποθετώντας στο επιπλέον πεδίο που προστέθηκε την ενέργειά του. Η ενέργεια θα προστεθεί αφού πρώτα γίνει έλεγχος αν η τιμή της είναι όντως μικρότερη από την υπάρχουσα.

Παρόμοια διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλους τους ενδιάμεσους κόμβους, μέχρι την αποστολή RREP μηνύματος. Οι κόμβοι που λαμβάνουν την απάντηση πρώτα καταχωρούν τον προορισμό στον πίνακα δρομολόγησής τους και εν συνεχεία προωθούν unicast το μήνυμα προς την πηγή. Κατά την επιστροφή του μηνύματος RREP οι ενδιάμεσοι κόμβοι διαθέτουν ήδη διαδρομή προς την πηγή, κατά τη διαδικασία λήψης του μηνύματος RREQ, για αυτό το λόγο είναι εφικτή η επιστροφή του μηνύματος με unicast.

Να σημειωθεί ότι για δεύτερη φορά θα πρέπει να ελεγχθεί από τους ενδιάμεσους κόμβους το πεδίο με την τιμή της ενέργειας. Ουσιαστικά και κατά την προώθηση του μηνύματος RREP θα ελέγχουν οι κόμβοι που συμμετέχουν στο μονοπάτι για πιθανές αλλαγές στην τιμή της υπολειπόμενης ενέργειάς τους. Άλλωστε μέχρι να ληφθεί και να προωθηθεί το μήνυμα η κάθε συσκευή μπορεί να έχει χρησιμοποιηθεί για άλλες λειτουργίες του δικτύου. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να φτάσει το RREP στην πηγή.

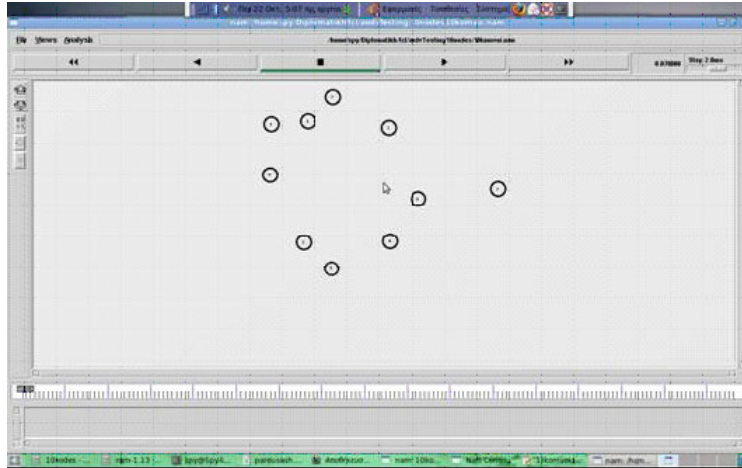
Η προσθήκη του πεδίου που διατηρεί τη δεύτερη μικρότερη ενέργεια της διαδρομής, έγινε προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανότητα δύο διαδρομές να έχουν ακριβώς την ίδια τιμή υπολειπόμενης ενέργειας και να αποτελούν τις ενεργειακές διαδρομές με την μικρότερη ενέργεια. Συνεπώς οι πραγματοποιούμενοι έλεγχοι βασίζονται και στις δύο ενέργειες δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στην ελάχιστη ενέργεια της κάθε διαδρομής.

4.7.1 Σενάριο λειτουργίας ενός δικτύου

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να παρουσιάσουμε ένα σενάριο που θα διευκολύνει στην πληρέστερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου και των επεκτάσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια βελτιστοποίησής του. Ένας προορισμός λαμβάνει ένα request, απαντά στέλνοντας ένα reply μήνυμα και στη συνέχεια λαμβάνει το ίδιο μήνυμα request από άλλη όμως διαδρομή, η οποία είναι καλύτερη ενεργειακά. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει ο κόμβος να στείλει νέο reply προς αυτή την καλύτερη διαδρομή προκειμένου η πηγή να χρησιμοποιήσει το καλύτερο μονοπάτι.

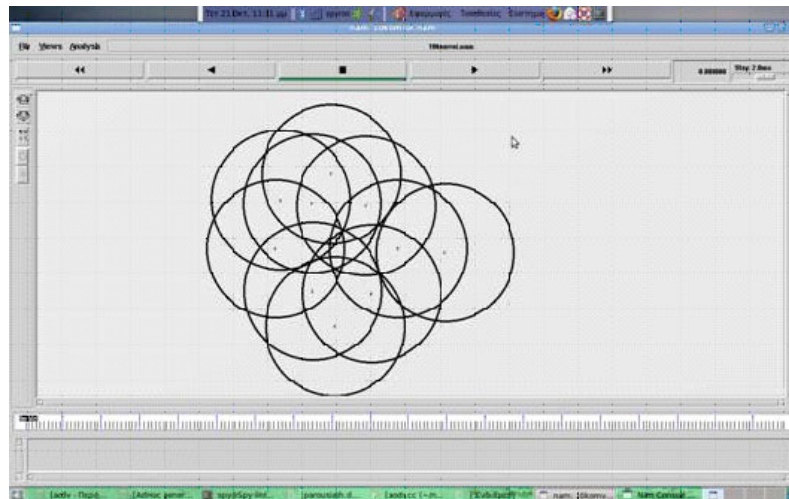
Στο παράδειγμα που ακολουθεί θα γίνει μια πρώτη σύγκριση για ένα δίκτυο 10 κόμβων ανάμεσα στις δύο υλοποιήσεις. Η βασική επιδίωξη είναι η μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του δικτύου. Αυτό είναι εφικτό στην περίπτωση που επιτευχθεί η

διατήρηση σε λειτουργία όσο το δυνατόν μεγαλύτερου αριθμού κόμβων. Ως εκ τούτου οι μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν είναι η διάρκεια ζωής του δικτύου, αλλά και ο αριθμός “ζωντανών” κόμβων προς το τέλος της προσομοίωσης. Για τη διάρκεια της ζωής του δικτύου αρκεί να προσδιοριστεί ο συνολικός χρόνος που διήρκεσε η προσομοίωση, καθώς στον ns2, η προσομοίωση τελειώνει (εκτός αν καθοριστεί διαφορετικά από τον χρήστη) όταν δεν υπάρχουν ή δεν μπορούν να μεταδοθούν πακέτα. Για τον αριθμό των ζωντανών κόμβων πέρα από τη χρήση του προγράμματος οπτικής απεικόνισης του ns2, του nam, χρησιμοποιήθηκε και η γλώσσα awk για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων ενέργειας από τα trace αρχεία της προσομοίωσης. Η τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην ακόλουθη Εικόνα 16 που προκύπτει από τον nsnam:



Εικόνα 16: Εικόνα που προκύπτει από τον nsnam για 10 κόμβους

Στην παρακάτω Εικόνα 17 φαίνεται και η εμβέλεια του κάθε κόμβου όπως προκύπτει από το nsnam:



Εικόνα 17: Περιοχές κάλυψης του κάθε κόμβου

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρούμε πηγές σταθερού bitrate (cbr). Η διαδοχή των γεγονότων αποστολής μηνυμάτων είναι η ακόλουθη:

- Ο κόμβος 5 στέλνει στον κόμβο 3
- Ο κόμβος 1 στέλνει στον κόμβο 7
- Ο κόμβος 4 στέλνει στον κόμβο 6
- Ο κόμβος 0 στέλνει στον κόμβο 5
- Ο κόμβος 2 στέλνει στον κόμβο 3

Θα διακρίνουμε δύο περιπτώσεις λειτουργίας των κόμβων. Η πρώτη περίπτωση καθορίζει μηδενική κινητικότητα για τους κόμβους που συμμετέχουν στο δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα θα είναι τα ακόλουθα:

Κριτήριο	AODV	AODV με ενεργειακή επέκταση
Διάρκεια ζωής δικτύου	16.1 sec	34.4 sec

Πίνακας 14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη διάρκεια ζωής του δικτύου

Αντίστοιχα η ενέργεια του κάθε κόμβου σε διαφορετικές χρονικές βαθμίδες παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Κόμβοι τη χρονική στιγμή T=14sec	Υπολειπόμενη Ενέργεια του κάθε κόμβου σε Joules	
	AODV	AODV με ενεργειακή επέκταση
Node 0	36.02	47.63
Node 1	52.81	66.12
Node 2	30.87	54.23
Node 3	54.60	42.35
Node 4	0	5.21
Node 5	43.59	43.07
Node 6	66.03	68.45
Node 7	69.84	44.28
Node 8	75.61	75.34
Node 9	69.97	44.44

Πίνακας 15: Υπολοιπόμενες ενέργειες κόμβων του δικτύου τη χρονική στιγμή 14 sec

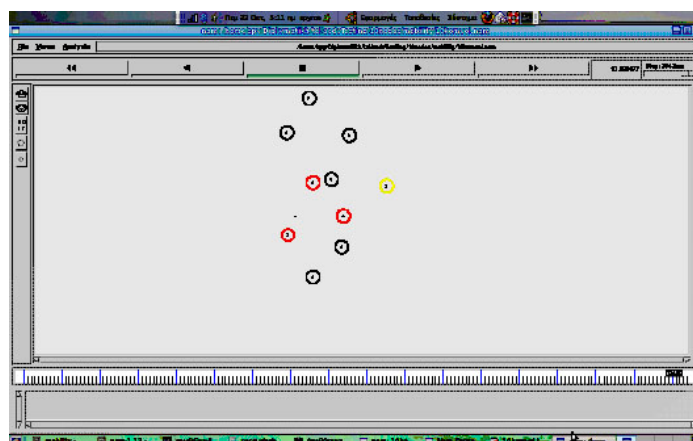
Να σημειωθεί ότι ο κόμβος 4 στον απλό AODV έχει σταματήσει τη λειτουργία του ήδη από τα 12.6 sec, ενώ στην ενεργειακή του έκδοση, συνεχίζει να χρησιμοποιείται.

Κόμβοι τη χρονική στιγμή T=14,45 sec	Υπολειπόμενη Ενέργεια του κάθε κόμβου σε Joules	
	AODV	AODV με ενεργειακή επέκταση
Node 0	30.28	46.59
Node 1	47.07	65.08
Node 2	25.63	49.81
Node 3	48.86	41.31
Node 4	0	0.21

Node 5	41.24	41.54
Node 6	64.17	67.41
Node 7	67.98	43.24
Node 8	74.56	74.31
Node 9	68.11	43.42

Πίνακας 16: Υπολοιπόμενες ενέργειες κόμβων του δικτύου τη χρονική στιγμή 14,45 sec

Παρατηρείται σημαντική βελτιστοποίηση τόσο ως προς το χρόνο ζωής του δικτύου όσο και ως προς τον αριθμό των ζωντανών κόμβων. Επιπρόσθετα αναφέρεται για λόγους πληρότητας ότι ο συνολικός αριθμός πακέτων που ελήφθησαν με τον παραδοσιακό AODV ήταν 253, ενώ με την προτεινόμενη επέκταση ήταν 277. Η δεύτερη περίπτωση καλύπτει την περίπτωση κινητικότητας των κόμβων του δικτύου.



Εικόνα 18: Τελική εικόνα κόμβων με κινητικότητα

Κριτήριο	AODV	AODV με ενεργειακή επέκταση
Διάρκεια ζωής δικτύου	17.45 sec	19.81 sec

Πίνακας 17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη διάρκεια ζωής του δικτύου

Και σε αυτό το σενάριο ο κόμβος 4 πέφτει ήδη από τα 12.6 στον παραδοσιακό AODV, ενώ χρησιμοποιείται κανονικά στην προτεινόμενη επέκταση. Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα, στα 17,41 sec «πέφτει» και ο κόμβος 0 για την περίπτωση της παραδοσιακής μορφής του AODV:

Κόμβοι τη χρονική στιγμή T=17,41 sec	Υπολειπόμενη Ενέργεια του κάθε κόμβου σε Joules	
	AODV	AODV με ενεργειακή επέκταση
Node 0	2.24	42.56
Node 1	61.65	35.50

Node 2	0	23.03
Node 3	63.87	37.74
Node 4	0	16.48
Node 5	43.32	40.09
Node 6	61.42	60.78
Node 7	65.26	64.68
Node 8	65.52	17.84
Node 9	65.40	64.74

Πίνακας 18: Υπολειπόμενες ενέργειες των κόμβων του δικτύου στα 17,41 sec

Αντίθετα στον AODV με την δική μας ενεργειακή επέκταση μέχρι και τα 19 sec δεν έχουμε κάποιο κόμβο με μηδενική ενέργεια. Εντοπίζεται βελτιστοποίηση τόσο ως προς το χρόνο ζωής του δικτύου, όσο και ως προς τον αριθμό των ζωντανών κόμβων σε σχέση με τον απλό AODV. Τέλος ο συνολικός αριθμός πακέτων που ελήφθησαν με τον παραδοσιακό AODV ήταν 268, ενώ με τη δικιά μας επέκταση ήταν 316. Να σημειωθεί εδώ ότι οι διαφορές που παρατηρούμε στους χρόνους και τις ενέργειες, σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο οφείλονται στην κίνηση των κόμβων.

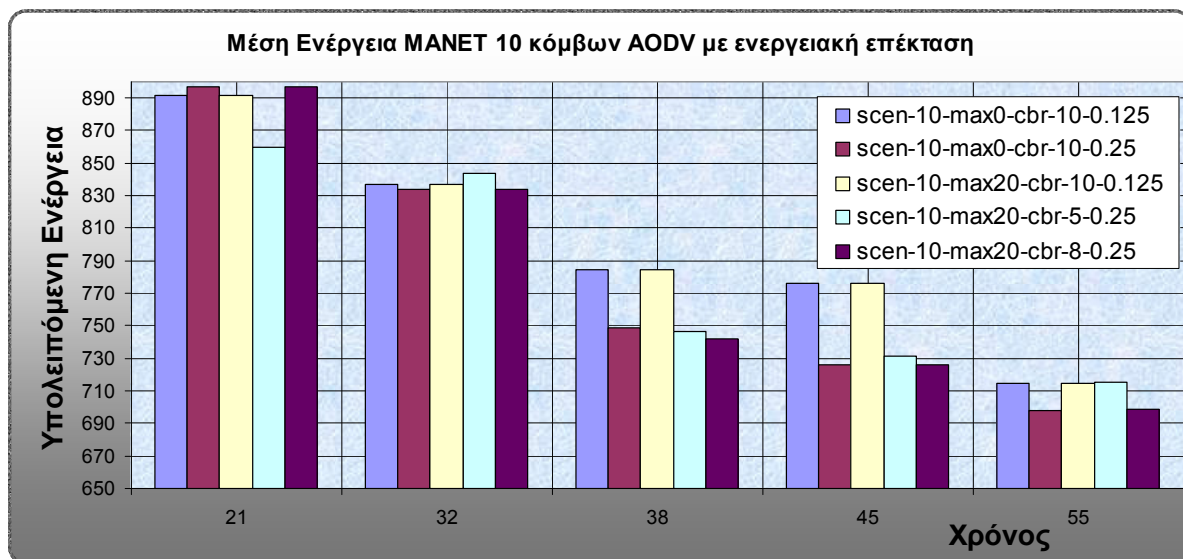
4.7.2 Αποτελέσματα σεναρίων

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ενεργειακής επέκτασης του AODV για συγκεκριμένα σενάρια που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.6.1. Τα συγκεκριμένα σενάρια αφορούσαν δίκτυα 10, 30 και 50 κόμβων με συνδυασμούς κίνησης των κόμβων σε ένα χώρο 500x500 m² και με συγκεκριμένο ρυθμό αποστολής πακέτων μεταξύ των κόμβων. Για χάρη απλότητας ο AODV με ενεργειακή επέκταση θα σημειώνεται σαν EAODV (Energy AODV).

Τα αποτελέσματα όπως παρουσιάστηκαν και στην ενότητα 4.6.1 στηρίζονται στον υπολογισμό τόσο της μέσης ενέργειας του δικτύου συνολικά όσο και για τον κάθε κόμβο ξεχωριστά. Ο βασικός λόγος για το συγκεκριμένο διαχωρισμό είναι η πιθανότητα οι δύο αλγόριθμοι να παρουσιάζουν ίδια μέση ενέργεια κόμβων. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι απόρροια της τυχαίας αποστολής δεδομένων, καθώς κάποιοι κόμβοι σε μια από τις δύο εκδόσεις του αλγορίθμου είναι δυνατόν να μην συμμετέχουν σε κάποια ενεργή διαδρομή.

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου				
Αρχείο κίνησης	Αρχείο κίνησης δεδομένων	21 sec	32 sec	38 sec	45 sec	55 sec
scen-10-max0	cbr-10-0.125	891.342	837.127	784.483	775.866	714.267
scen-10-max0	cbr-10-0.25	896.641	834.137	748.579	725.844	698.197
scen-10-max20	cbr-10-0.125	891.342	837.127	784.483	775.866	714.267
scen-10-max20	cbr-5-0.25	859.815	843.644	746.836	731.647	715.113
scen-10-max20	cbr-8-0.25	896.641	834.137	742.012	725.976	698.605

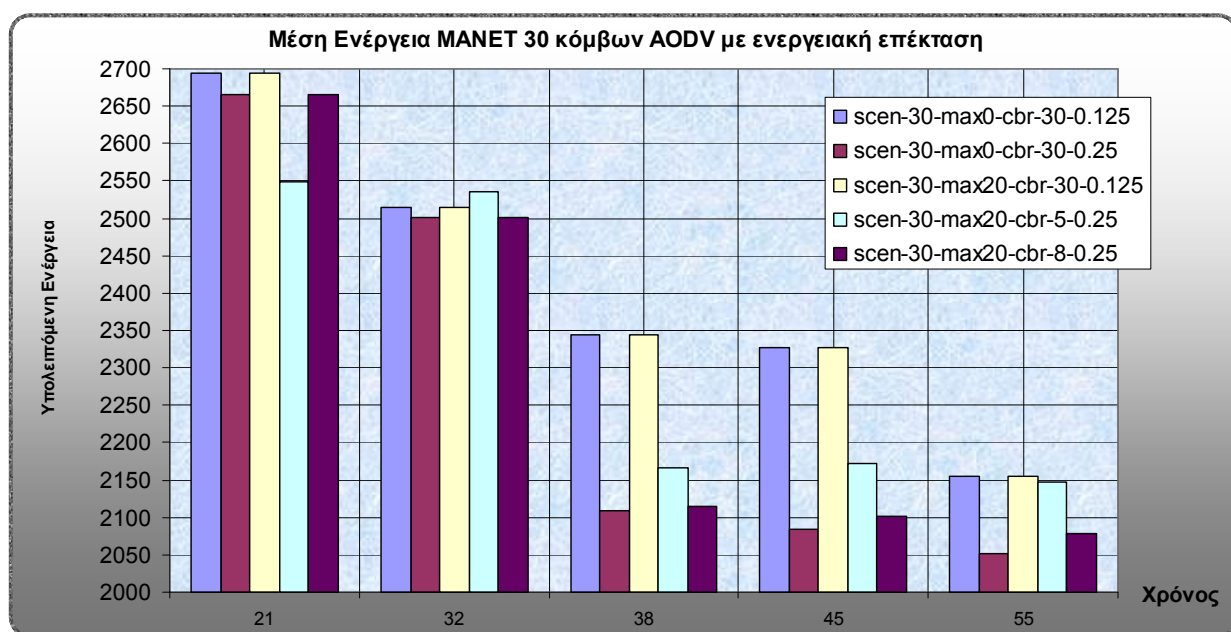
Πίνακας 19: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 10 κόμβων εφαρμόζοντας AODV με ενεργειακή επέκταση



Εικόνα 19: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 10 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου				
Αρχείο κίνησης	Αρχείο δεδομένων	21 sec	32 sec	38 sec	45 sec	55 sec
scen-30-max0	cbr-30-0.125	2694.47	2514.97	2343.61	2326.52	2154.91
scen-30-max0	cbr-30-0.25	2664.81	2500.8	2109.75	2083.79	2052.03
scen-30-max20	cbr-30-0.125	2694.47	2514.97	2343.61	2326.52	2154.91
scen-30-max20	cbr-5-0.25	2548.82	2534.82	2166.57	2171.85	2146.54
scen-30-max20	cbr-8-0.25	2664.81	2500.8	2114.76	2100.41	2079.15

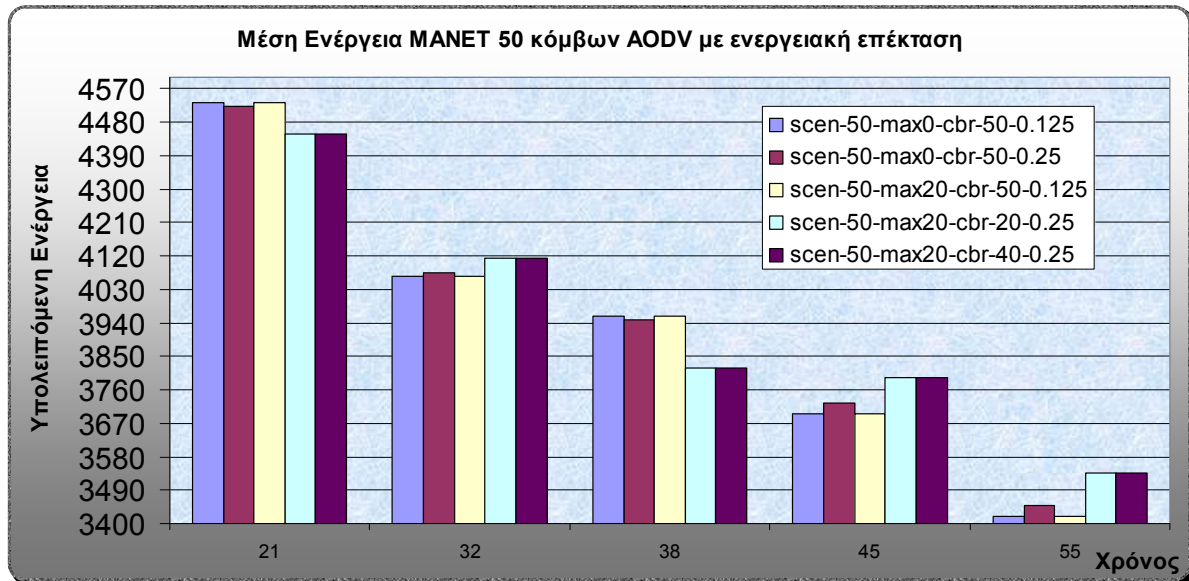
Πίνακας 20: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 30 κόμβων εφαρμόζοντας AODV με ενεργειακή επέκταση



Εικόνα 20: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 30 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου				
Αρχείο κίνησης	Αρχείο δεδομένων	21 sec	32 sec	38 sec	45 sec	55 sec
scen-50-max0	cbr-50-0.125	4531.59	4065.56	3956.6	3696.71	3419.01
scen-50-max0	cbr-50-0.25	4522.52	4074	3949.54	3722.87	3449.14
scen-50-max20	cbr-50-0.125	4531.59	4065.56	3956.6	3696.71	3419.01
scen-50-max20	cbr-20-0.25	4446.08	4112.92	3819.41	3792.68	3535.3
scen-50-max20	cbr-40-0.25	4446.08	4112.92	3819.41	3792.68	3535.3

Πίνακας 21: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 50 κόμβων εφαρμόζοντας AODV με ενεργειακή επέκταση



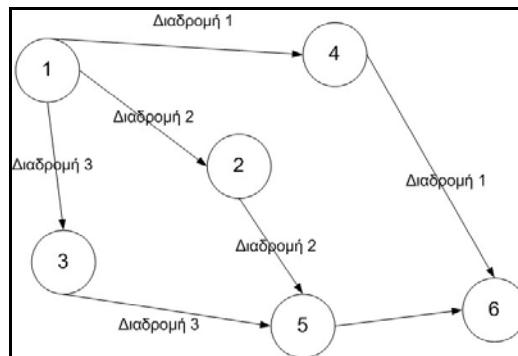
Εικόνα 21: Σχηματική παρουσίαση των απωλειών και της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 30 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV

4.8 Επιπλέον αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου

Μια επιπλέον μετατροπή στον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου στηρίχθηκε στον συνυπολογισμό του αριθμού των βημάτων μιας διαδρομής και της υπολειπόμενης ενέργειας στην επιλογή μονοπατιού. Η παραδοσιακή μορφή του πρωτοκόλλου AODV λειτουργεί καταγράφοντας στον πίνακα δρομολόγησης τον αριθμό των βημάτων που απαιτούνται για τη δρομολόγηση πακέτων από την πηγή που εκκίνησε την αναζήτηση διαδρομής δημιουργώντας το RREQ μήνυμα, προς τον προορισμό.

Η επέκταση που έχουμε προτείνει καταγράφει τις ελάχιστες τιμές ενέργειας κάθε διαδρομής, αποφασίζει και επιλέγει το κατάλληλο μονοπάτι, βάσει του μέγιστου ενεργειακού υπόλοιπου. Στόχος ήταν με τη συγκεκριμένη επέκταση να χρησιμοποιούνται οι πιο κυρίαρχες διαδρομές, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ζωή του δικτύου, διατηρώντας «ζωντανούς» όσο το δυνατόν περισσότερους κόμβους του δικτύου.

Ας αναλογιστούμε ένα σενάριο για MANET που αποτελείται από 6 κόμβους και ο κόμβος 1 θέλει να επικοινωνήσει με τον κόμβο 6 κι ας υποθέσουμε ότι η τοπολογία του δικτύου είναι αυτή που εμφανίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 22: Τοπολογία 6 κόμβων

Όπως παρατηρείται από την τοπολογία υπάρχουν 3 διαδρομές από τον 1 προς τον 6. Στο υποθετικό μας σενάριο αν λαμβάναμε υπόψη ότι η δρομολόγηση γίνεται με τον EAODV τότε η απόφαση για την επιλογή της διαδρομής θα βασιζόταν στο ενεργειακό υπόλοιπο των διαθέσιμων διαδρομών, χωρίς να συνυπολογίζει τον αριθμό των βημάτων. Συνεπώς αν υποθέσουμε ότι η πιο κυρίαρχη ενεργειακά διαδρομή είναι η Διαδρομή 2 ή η Διαδρομή 3 τότε χρησιμοποιούνται περισσότεροι ενδιάμεσοι κόμβοι σε σχέση με τη Διαδρομή 1. Στην περίπτωση των Διαδρομών 2 και 3 απαιτούνται 3 βήματα ενώ στη Διαδρομή 1, 2 βήματα.

Γίνεται κατανοητό ότι με τον AODV θα επιλεγόταν η Διαδρομή 1, ενώ με τον EAODV μια εκ των Διαδρομών 2 και 3. Οι Διαδρομές 2 και 3 μπορεί να είναι κυρίαρχες ενεργειακά, αλλά προοδευτικά περισσότεροι κόμβοι μπορούν να τεθούν εκτός λειτουργίας λόγω ενεργειακής «εξάντλησης». Συνεπώς θα πρέπει με κάποιο τρόπο να συνυπολογίζεται και ο αριθμός των βημάτων της διαδρομής ώστε η επιλογή να μοιράζεται ανάμεσα στην πιο κυρίαρχη ενεργειακά διαδρομή καθώς και στη διαδρομή με το μικρότερο δυνατό αριθμό βημάτων ταυτόχρονα.

Σε αυτό το σημείο προτείνεται μια επιπλέον διαφοροποίηση του AODV επεκτείνοντας την ενεργειακή του μορφή ώστε να λαμβάνει υπόψη και τον αριθμό των βημάτων. Συνεπώς η νέα έκδοσή του θα έχει δύο βασικά κριτήρια:

1. αν η νέα διαδρομή που θα εμφανιστεί είναι καλύτερη από αριθμό βημάτων
2. αν η νέα διαδρομή που θα εμφανιστεί είναι καλύτερη από την άποψη ενεργειακού υπόλοιπου.

Στον πίνακα δρομολόγησης άλλωστε καταγράφονται για την κάθε διαθέσιμη διαδρομή τόσο ο αριθμός βημάτων, όσο και το ενεργειακό υπόλοιπο. Συνδυάζοντας τα δύο αυτά στοιχεία καταλήγουμε σε μια επιλογή που υπερτερεί σε ένα από τα δύο κριτήρια ή ακόμα και στα δύο. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης υλοποίησης είναι η εξισορρόπηση μεταξύ μικρής και κυρίαρχης ενεργειακής διαδρομής, οδηγώντας σε μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου και σε αύξηση της βιωσιμότητας ακόμη περισσότερων κόμβων.

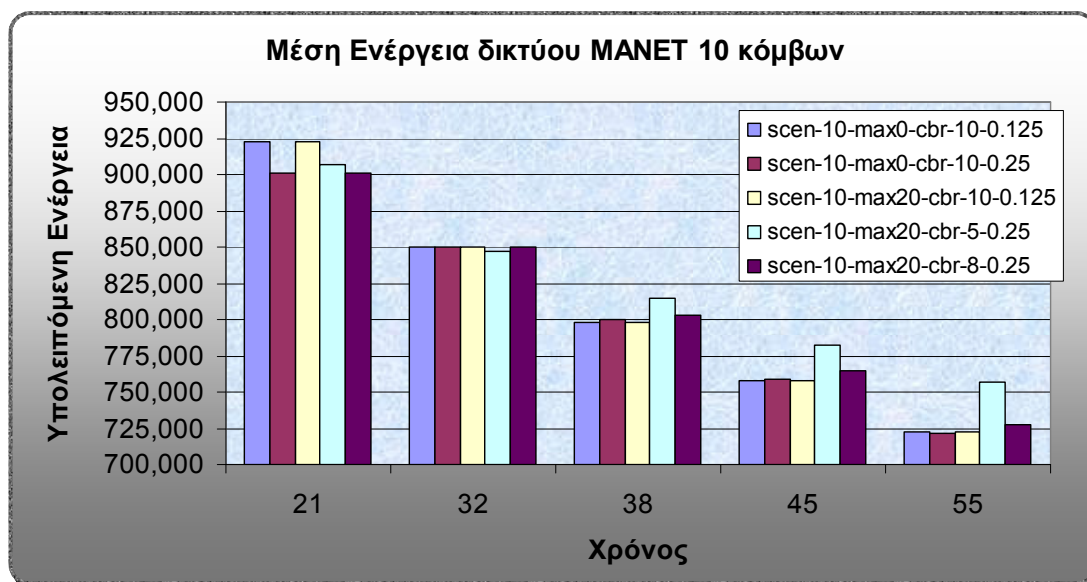
4.8.1 Αποτελέσματα σεναρίων

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ενεργειακής επέκτασης του AODV για τα σενάρια που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.6.1 και χρησιμοποιήθηκαν. Τα συγκεκριμένα σενάρια αφορούσαν δίκτυα 10, 30 και 50 κόμβων με συνδυασμούς κίνησης τους σε ένα χώρο 500x500 με συγκεκριμένο ρυθμό αποστολής πακέτων μεταξύ των κόμβων. Για χάρη απλότητας ο AODV που περιέχει την ενεργειακή επέκταση και λαμβάνει υπόψη του και τον αριθμό των βημάτων θα σημειώνεται σαν EAODV_hops (Energy AODV hops).

Τα αποτελέσματα όπως παρουσιάστηκαν και στην ενότητα 4.6.1 στηρίζονται στον υπολογισμό τόσο της μέσης ενέργειας του δικτύου συνολικά όσο και για τον κάθε κόμβο ξεχωριστά.

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου				
Αρχείο κίνησης	Αρχείο δεδομένων	21 sec	32 sec	38 sec	45 sec	55 sec
scen-10-max0	cbr-10-0.125	923.033	850.133	798.48	758.286	722.063
scen-10-max0	cbr-10-0.25	901.47	850.21	799.952	758.745	721.209
scen-10-max20	cbr-10-0.125	923.033	850.133	798.48	758.286	722.063
scen-10-max20	cbr-5-0.25	906.882	846.8	815.134	782.734	757.037
scen-10-max20	cbr-8-0.25	901.47	850.21	803.134	764.451	727.681

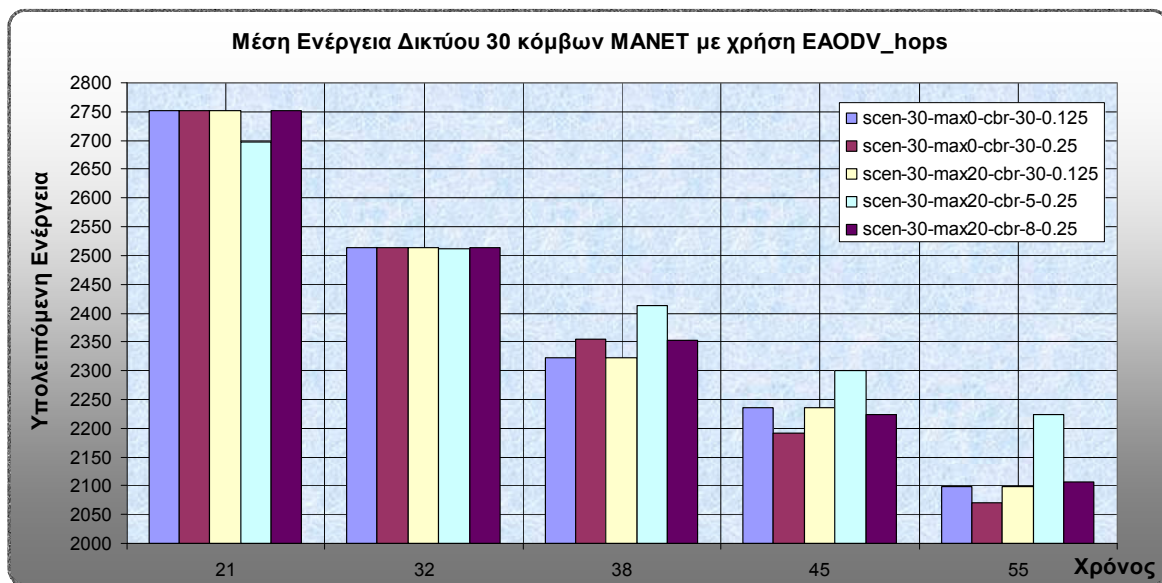
Πίνακας 22: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 10 κόμβων εφαρμόζοντας EAODV_hops



Εικόνα 23: Σχηματική παρουσίαση της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 10 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV_hops

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου				
Αρχείο κίνησης	Αρχείο δεδομένων	21 sec	32 sec	38 sec	45 sec	55 sec
scen-30-max0	cbr-30-0.125	2750.64	2513.91	2322.06	2236.22	2099.67
scen-30-max0	cbr-30-0.25	2751.36	2514.81	2355.02	2192.09	2069.95
scen-30-max20	cbr-30-0.125	2750.64	2513.91	2322.06	2236.22	2099.67
scen-30-max20	cbr-5-0.25	2696.24	2512.24	2413.94	2301.15	2223.3
scen-30-max20	cbr-8-0.25	2751.36	2514.81	2352.01	2224.1	2106.07

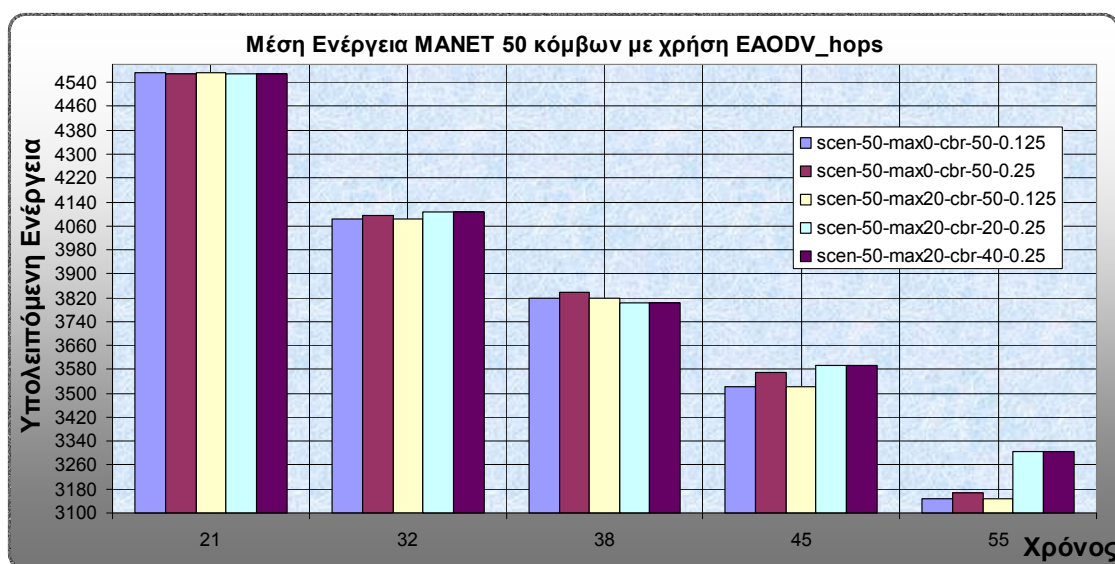
Πίνακας 23: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 30 κόμβων εφαρμόζοντας EAODV_hops



Εικόνα 24: Σχηματική παρουσίαση της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 30 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV_hops

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου				
Αρχείο κίνησης	Αρχείο δεδομένων	21 sec	32 sec	38 sec	45 sec	55 sec
scen-50-max0	cbr-50-0.125	4570.72	4083.63	3817.7	3522.79	3146.8
scen-50-max0	cbr-50-0.25	4569.56	4095.17	3837.73	3568.65	3168.22
scen-50-max20	cbr-50-0.125	4570.72	4083.63	3817.7	3522.79	3146.8
scen-50-max20	cbr-20-0.25	4569.56	4108.08	3802.95	3594.22	3305.25
scen-50-max20	cbr-40-0.25	4569.56	4108.08	3802.95	3594.22	3305.25

Πίνακας 24: Παρουσίαση μέσης ενέργειας δικτύου σε 5 χρονικές στιγμές για MANET 50 κόμβων εφαρμόζοντας EAODV_hops



Εικόνα 25: Σχηματική παρουσίαση της μέσης ενέργειας του δικτύου MANET 50 κόμβων για τα 5 διαφορετικά σενάρια χρήσης EAODV_hops

4.9 Σύγκριση του AODV με τις προτεινόμενες επεκτάσεις

Παρατηρήσαμε ότι σε κάθε έναν από τους παραπάνω αλγορίθμους οι τιμές της υπολειπόμενης ενέργειας μεταβάλλονται σε μια από τις δύο ακόλουθες περιπτώσεις:

1. όταν αλλάζει ο αριθμός των συνδέσεων που μπορούν να δημιουργήσουν οι κόμβοι του δικτύου
2. όταν μεταβάλλεται ο ρυθμός αποστολής μηνυμάτων.

Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι διατηρώντας σταθερό τον ρυθμό αποστολής μηνυμάτων (rate) και ταυτόχρονα μειώνοντας τον αριθμό των συνδέσεων που δυνητικά κάθε κόμβος μπορεί να παράγει, μειώνεται στο τέλος και η δαπανώμενη ενέργεια. Μια τέτοια απόκλιση στις τιμές θεωρείται λογική, καθώς οι κόμβοι θα αναζητήσουν λιγότερες διαδρομές με αποτέλεσμα να μειωθούν τα πακέτα εύρεσης μονοπατιού προς έναν προορισμό. Συνεπώς θα ελαττωθούν τα μηνύματα RREQ και RREP που καταναλώνουν ενέργεια. Οι συγκεκριμένες αλλαγές που έγιναν σε όλες τις προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν αφορούσαν τη δυνατότητα δημιουργίας 5 και 8 συνδέσεων για τα σενάρια δικτύου 10 και 30 κόμβων με σταθερό ρυθμό αποστολής πακέτων στα 0.25 packets ανά sec. Για την περίπτωση των 50 κόμβων η ελαχιστοποίηση των συνδέσεων αφορούσε τη δημιουργία 20 και 40 αντίστοιχα.

Αναφορικά με τη μεταβολή του ρυθμού αποστολής πακέτων παρατηρήθηκε ότι αύξηση της συγκεκριμένης τιμής οδήγησε σε ελάττωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα κρίνεται ως λογικό, καθώς όταν το packet rate καθορίζεται σε 0.125 packets ανά sec αποστέλλονται πιο συχνά πακέτα και δαπανάται περισσότερη ενέργεια, σε σχέση με packet rate στο 0.25 packets ανά sec.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβολή της ταχύτητας κίνησης των κόμβων στο χώρο 500x500 m² της προσομοίωσης πρακτικά δεν προκαλεί ιδιαίτερες μεταβολές στην κατανάλωση ενέργειας. Βασιζόμενοι και στα αποτελέσματα που προέκυψαν συμπεραίνουμε ότι διατηρώντας σταθερό το packet rate και τον αριθμό των μέγιστων συνδέσεων που μπορεί να δημιουργήσει κάθε κόμβος, η κίνηση των συσκευών στον χώρο δεν προκαλεί μεταβολές στην υπολειπόμενη μέση ενέργεια του δικτύου. Στα σενάρια μας χρησιμοποιήθηκε από μηδενική ταχύτητα κόμβων έως μέγιστη ταχύτητα 20 m/s και δεν παρατηρήθηκαν αποκλίσεις στις τιμές.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του AODV και των επεκτάσεών του καταλήγουμε σε μερικά χρήσιμα συμπεράσματα, που παρουσιάζονται και στα ακόλουθα διαγράμματα. Αρχικά συγκρίνεται ο AODV με τον EAODV και τον EAODV_hops για την περίπτωση των 10 κόμβων.

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου σε Joules									
Αρχείο κίνησης κόμβων	Αρχείο κίνησης δεδομένων	21 sec		32 sec		38 sec		45 sec		55 sec	
		AODV	EAODV	AODV	EAODV	AODV	EAODV	AODV	EAODV	AODV	EAODV
scen-10-max0	cbr-10-0.125	891.342	891.342	839.338	837.127	787.487	784.483	780.253	775.866	707.755	714.267
scen-10-max0	cbr-10-0.25	896.641	896.641	834.137	834.137	748.579	748.579	725.844	725.844	698.197	698.197
scen-10-max20	cbr-10-0.125	891.342	891.342	839.338	837.127	787.487	784.483	780.253	775.866	707.755	714.267
scen-10-max20	cbr-5-0.25	859.815	859.815	843.644	843.644	746.836	746.836	731.647	731.647	715.113	715.113
scen-10-max20	cbr-8-0.25	896.641	896.641	834.137	834.137	742.012	742.012	725.976	725.976	698.605	698.605

Πίνακας 25: Τιμές για 10 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV για 5 διαφορετικά σενάρια

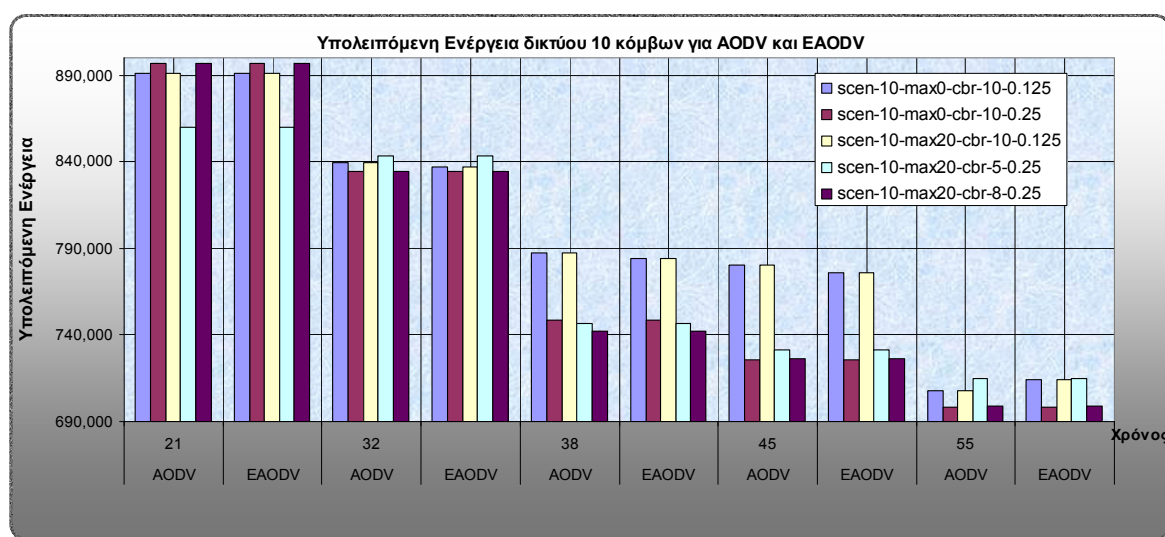
Όπως φαίνεται και από τα συγκριτικά αποτελέσματα ο ενεργειακά βελτιστοποιημένος αλγόριθμος (EAODV), παρουσιάζει αυξημένη μέση ενέργεια. Διαχειρίζεται με πιο ορθολογικό τρόπο τις διαθέσιμες ενεργειακές πηγές οδηγώντας σε ένα πιο αποδοτικό ενεργειακό δίκτυο. Στις περιπτώσεις δημιουργίας 5 και 8 συνδέσεων δεν παρουσιάζονται μεταβολές στη μέση ενέργεια, καθώς πρόκειται για πολύ μικρό

αριθμό συνδέσεων, σε ένα δίκτυο που αποτελείται από μικρό αριθμό συσκευών. Ενδεικτικά παρουσιάζουμε στον ακόλουθο πίνακα τις υπολειπόμενες ενέργειες των κόμβων στη χρονική βαθμίδα των 55 sec για ένα συνδυασμό σεναρίων:

Κόμβοι τη χρονική στιγμή T=55 sec	Υπολειπόμενη Ενέργεια του κάθε κόμβου σε Joules	
	AODV	EAODV
Node 0	70.04	72.98
Node 1	69.91	70.32
Node 2	70.46	71.71
Node 3	70.3	72.24
Node 4	70.3	72.24
Node 5	70.3	72.24
Node 6	70.3	72.24
Node 7	70.3	67.66
Node 8	73.1	69.86
Node 9	72.36	72.77

Πίνακας 26: Υπολειπόμενες Ενέργειες κόμβων τη χρονική στιγμή 55 sec για το συνδυασμό σεναρίων scen-10-max0 και cbr-10-0.125

Παρατηρούμε μια πιο ισορροπημένη προσέγγιση και πιο αποδοτική αξιοποίηση των ενεργειακών αποθεμάτων του δικτύου, καθώς στη χρονική στιγμή των 55 sec οι περισσότεροι κόμβοι που συμμετέχουν, διαθέτουν ικανοποιητική ενέργεια ώστε να υποστηρίξουν περισσότερες μελλοντικές συνδέσεις. Στο διάγραμμα που ακολουθεί εμφανίζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα με τη μορφή γραφημάτων για τα προαναφερθέντα σενάρια σε δίκτυο 10 κόμβων.



Εικόνα 26: Συγκριτικά αποτελέσματα για 10 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV σε 5 διαφορετικά σενάρια

Για την περίπτωση των 30 κόμβων τα συγκριτικά αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου									
Αρχείο κίνησης κόμβων	Αρχείο κίνησης δεδομένων	21 sec		32 sec		38 sec		45 sec		55 sec	
		AODV	EAODV	AODV	EAODV	AODV	EAODV	AODV	EAODV	AODV	EAODV
scen-30-max0	cbr-30-0.125	2694.47	2694.470	2507.9	2514.970	2307.62	2343.610	2287.44	2326.520	2160.86	2154.910
scen-30-max0	cbr-30-0.25	2664.81	2664.810	2500.8	2500.8	2109.75	2109.750	2083.79	2083.790	2052.03	2052.030
scen-30-max20	cbr-30-0.125	2694.47	2694.470	2507.9	2514.97	2307.62	2343.610	2287.44	2326.520	2160.86	2154.910
scen-30-max20	cbr-5-0.25	2548.82	2548.820	2534.82	2534.82	2156.57	2166.570	2141.85	2171.850	2126.54	2146.540
scen-30-max20	cbr-8-0.25	2664.81	2664.810	2500.8	2500.8	2114.76	2114.760	2092.41	2100.410	2069.15	2079.150

Πίνακας 27: Τιμές για 30 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV για 5 διαφορετικά σενάρια

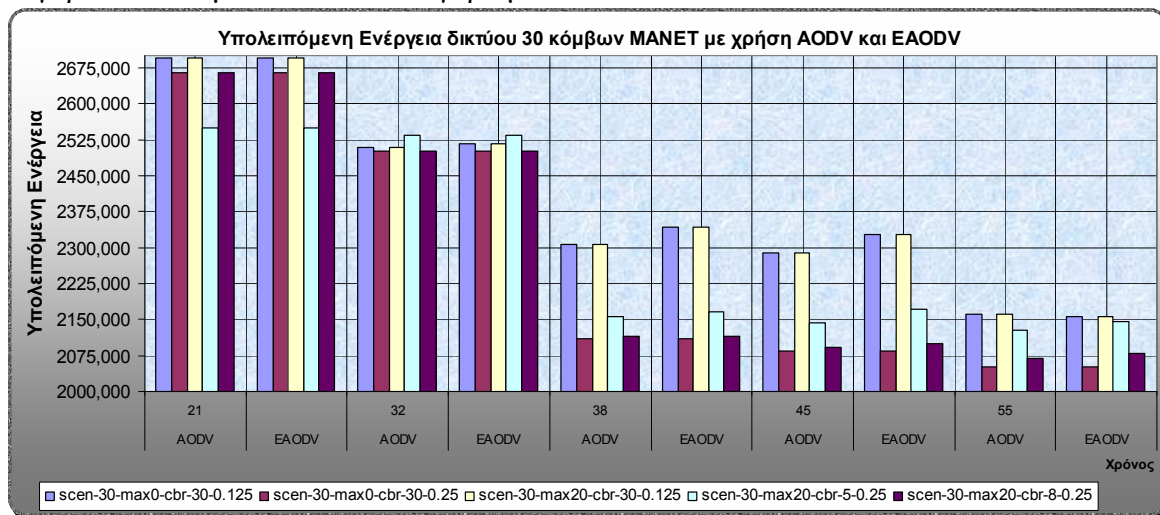
Και σε αυτή την περίπτωση που αυξάνεται η κλιμάκωση του δικτύου, δηλαδή δημιουργήθηκε ένας αριθμός σεναρίων για πιο πυκνό δίκτυο παρατηρούμε πιο ισορροπημένη και αποδοτική αξιοποίηση των ενεργειακών αποθεμάτων του δικτύου για τον EAODV. Τη χρονική στιγμή των 45 sec οι περισσότεροι κόμβοι που συμμετέχουν, διαθέτουν ικανοποιητική ενέργεια ώστε να υποστηρίξουν περισσότερες μελλοντικές συνδέσεις. Ενδεικτικά παρουσιάζουμε στον ακόλουθο πίνακα τις υπολειπόμενες ενέργειες των κόμβων στη χρονική βαθμίδα των 45 sec για ένα συνδυασμό σεναρίων:

Κόμβοι τη χρονική στιγμή T=45 sec	Υπολειπόμενη Ενέργεια του κάθε κόμβου σε Joules	
	AODV	EAODV
Node 0	76.4	77.81
Node 1	75.77	74.94
Node 2	76.96	77.33
Node 3	76.4	77.81
Node 4	76.4	77.81
Node 5	76.4	77.81
Node 6	76.4	77.81
Node 7	73.93	76.16
Node 8	75.08	76.05
Node 9	75.91	76.88
Node 10	76.4	77.81
Node 11	76.37	77.78
Node 12	76.4	77.82
Node 13	76.4	77.81
Node 14	76.4	77.81
Node 15	76.4	77.81

Node 16	76.4	77.81
Node 17	76.4	77.81
Node 18	76.4	77.81
Node 19	76.4	77.81
Node 20	76.4	77.81
Node 21	76.4	77.81
Node 22	76.4	77.81
Node 23	76.4	77.81
Node 24	76.4	77.81
Node 25	76.4	77.81
Node 26	76.4	77.81
Node 27	76.4	77.81
Node 28	76.4	77.81
Node 29	76.4	77.81

Πίνακας 28: Υπολειπόμενες Ενέργειες κόμβων τη χρονική στιγμή 45 sec για το συνδυασμό σεναρίων scen-30-max20 και cbr-30-0.125

Ακολουθεί το διάγραμμα που παρουσιάζει συνοπτικά σε μορφή γραφημάτων τα συγκριτικά δεδομένα του κάθε αλγορίθμου.



Εικόνα 27: Συγκριτικά αποτελέσματα για 30 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV σε 5 διαφορετικά σενάρια

Για την περίπτωση των 50 κόμβων τα συγκριτικά αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:

Συνδυασμός αρχείων που χρησιμοποιείται		Μέση ενέργεια δικτύου									
Αρχείο κίνησης κόμβων	Αρχείο κίνησης δεδομένων	21 sec		32 sec		38 sec		45 sec		55 sec	
		AODV	EAODV	AODV	EAODV	AODV	EAODV	AODV	EAODV	AODV	EAODV
scen-50-max0	cbr-50-0.125	4531.590	4531.590	4079.79	4065.56	3969.63	3956.6	3761.32	3696.71	3467.1	3419.01
scen-50-max0	cbr-50-0.25	4522.520	4522.520	4074	4074	3949.54	3949.54	3722.87	3722.87	3449.14	3449.14
scen-50-max20	cbr-50-0.125	4531.590	4531.590	4079.79	4065.56	3969.63	3956.6	3761.32	3696.71	3467.1	3419.01

scen-50-max20	cbr-20-0.25	4522.520	4446.080	4074	4112.92	3949.54	3819.41	3722.87	3792.68	3449.14	3535.3
scen-50-max20	cbr-40-0.25	4446.080	4446.080	4112.92	4112.92	3819.41	3819.41	3792.68	3792.68	3535.3	3535.3

Πίνακας 29: Τιμές για 50 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV για 5 διαφορετικά σενάρια

Αυξάνοντας και άλλο την πυκνότητα του δικτύου, δηλαδή εφαρμόζοντας τα ίδια σενάρια σε MANET 50 κόμβων παρατηρούμε για άλλη μια φορά βελτιστοποίηση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων. Ακόμα και στις περιπτώσεις και στις χρονικές βαθμίδες που η μέση υπολειπόμενη ενέργεια του EAODV είναι μικρότερη αξιοποιούνται λιγότεροι κόμβοι. Ακόμη και στα σενάρια όπου παρατηρείται ότι ο AODV λειτουργεί ενεργειακά αποδοτικότερα από τον EAODV, στην τελευταία χρονική βαθμίδα των 55 sec, οι τιμές των δύο αλγορίθμων συγκλίνουν. Συμπερασματικά με την πάροδο του χρόνου ο EAODV κάνει πιο αποδοτική διαχείριση της ενέργειας των κόμβων.

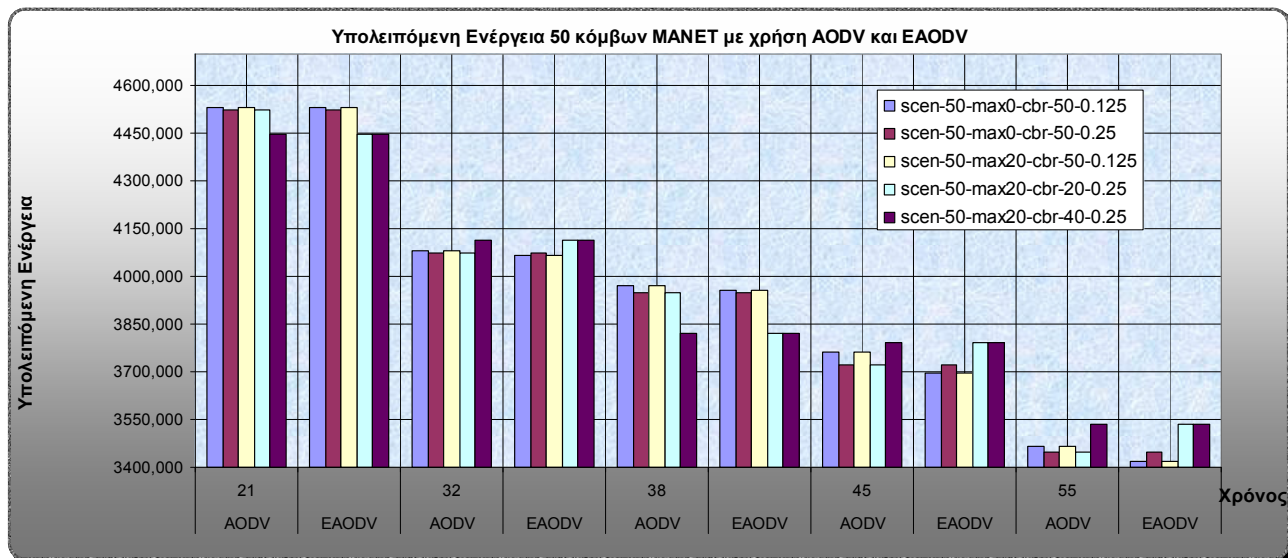
Ενδεικτικά σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων για τη χρονική στιγμή 55 sec σε ένα συνδυασμό σεναρίων:

Κόμβοι τη χρονική στιγμή T=55 sec	Υπολειπόμενη Ενέργεια του κάθε κόμβου σε Joules	
	AODV	EAODV
Node 0	71.15	71.15
Node 1	65.21	67.21
Node 2	69.96	70.96
Node 3	70.15	71.15
Node 4	70.15	71.15
Node 5	70.15	71.15
Node 6	70.15	71.15
Node 7	60.54	63.54
Node 8	63.96	67.96
Node 9	65.06	69.06
Node 10	66.15	71.15
Node 11	66.03	71.03
Node 12	71.15	71.15
Node 13	68.99	71.15
Node 14	71.15	71.15
Node 15	64.76	69.76
Node 16	70.90	70.90
Node 17	63.01	68.01
Node 18	66.15	71.15
Node 19	65.68	70.68

Node 20	71.15	71.15
Node 21	71.15	71.15
Node 22	71.15	71.15
Node 23	66.15	71.15
Node 24	71.15	71.15
Node 25	71.15	71.15
Node 26	71.15	71.15
Node 27	71.15	71.15
Node 28	66.15	71.15
Node 29	71.15	71.15
Node 30	71.15	71.15
Node 31	71.15	71.15
Node 32	71.15	71.15
Node 33	71.15	71.15
Node 34	71.15	71.15
Node 35	71.15	71.15
Node 36	66.15	71.15
Node 37	66.15	71.15
Node 38	71.15	71.15
Node 39	71.15	71.15
Node 40	71.15	71.15
Node 41	71.15	71.15
Node 42	71.15	71.15
Node 43	71.15	71.15
Node 44	71.15	71.15
Node 45	66.15	71.15
Node 46	71.15	71.15
Node 47	66.15	71.15
Node 48	71.15	71.15
Node 49	71.15	71.15

Πίνακας 30: Υπολειπόμενες Ενέργειες κόμβων τη χρονική στιγμή 55 sec για το συνδυασμό σεναρίων scen-50-max20 και cbr-20-0.25

Ακολουθεί το διάγραμμα που παρουσιάζει συνοπτικά σε μορφή γραφημάτων τα συγκριτικά δεδομένα του κάθε αλγορίθμου.



Εικόνα 28: Συγκριτικά αποτελέσματα για 50 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV και EAODV σε 5 διαφορετικά σενάρια

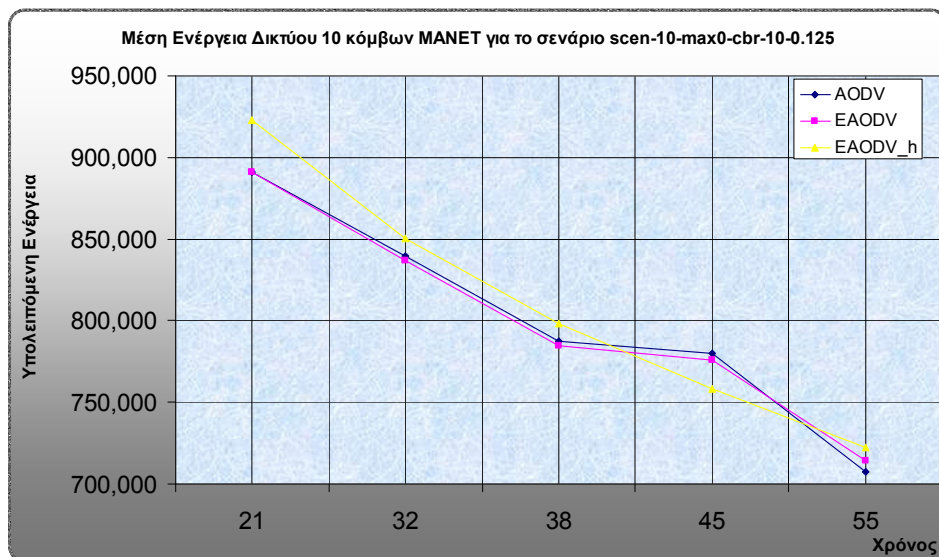
4.9.1 Σύγκριση του AODV, του EAODV με τον EAODV_hops

Σε αυτό το σημείο θα γίνουν οι αντίστοιχες συγκρίσεις του AODV και του EAODV με το EAODV_hops. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις προσομοιώσεις 5 σεναρίων για ένα δίκτυο 10 κόμβων MANET.

Συνδυασμός σεναρίου κίνησης κόμβων και δεδομένων	Αλγόριθμοι	Μέση Ενέργεια				
		21	32	38	45	55
scen-10-max0- cbr-10-0.125	AODV	891.342	839.338	787.487	780.253	707.755
	EAODV	891.342	837.127	784.483	775.866	714.267
	EAODV_hops	923.033	850.133	798.480	758.286	722.063
scen-10-max0- cbr-10-0.25	AODV	896.641	834.137	748.579	725.844	698.197
	EAODV	896.641	834.137	748.579	725.844	698.197
	EAODV_hops	901.470	850.210	799.952	758.745	721.209
scen-10-max20- cbr-10-0.125	AODV	891.342	839.338	787.487	780.253	707.755
	EAODV	891.342	837.127	784.483	775.866	714.267
	EAODV_hops	923.033	850.133	798.480	758.286	722.063
scen-10-max20- cbr-5-0.25	AODV	859.815	843.644	746.836	731.647	715.113
	EAODV	859.815	843.644	746.836	731.647	715.113
	EAODV_hops	906.882	846.800	815.134	782.734	757.037
scen-10-max20- cbr-8-0.25	AODV	896.641	834.137	742.012	725.976	698.605
	EAODV	896.641	834.137	742.012	725.976	698.605
	EAODV_hops	901.470	850.210	803.134	764.451	727.681

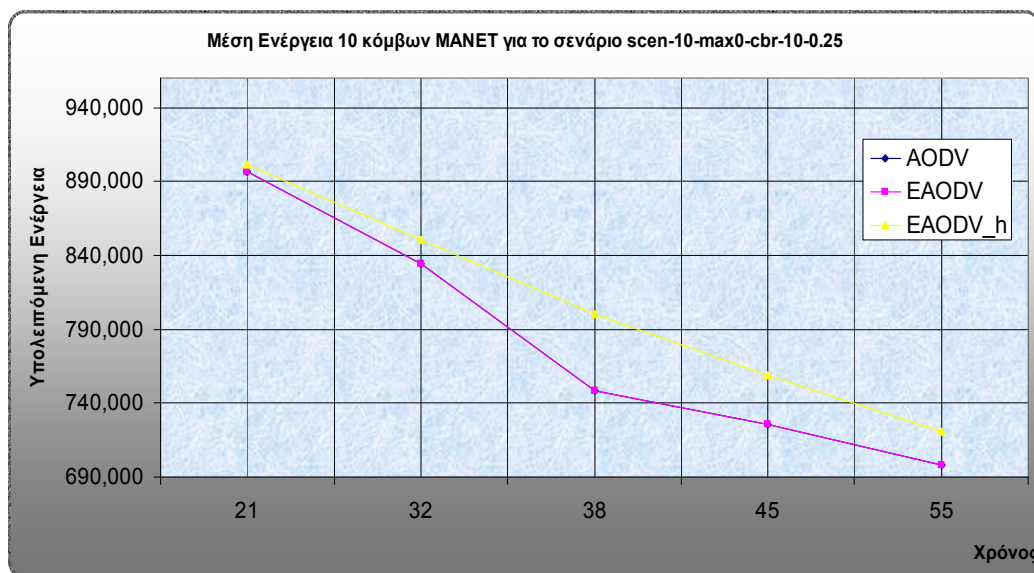
Πίνακας 31: Τιμές για 10 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV, EAODV και EAODV_hops για 5 διαφορετικά σενάρια

Τα ακόλουθα διαγράμματα αναπαριστούν τα γραφήματα που προκύπτουν από το συγκριτικό πίνακα για κάθε σενάριο:

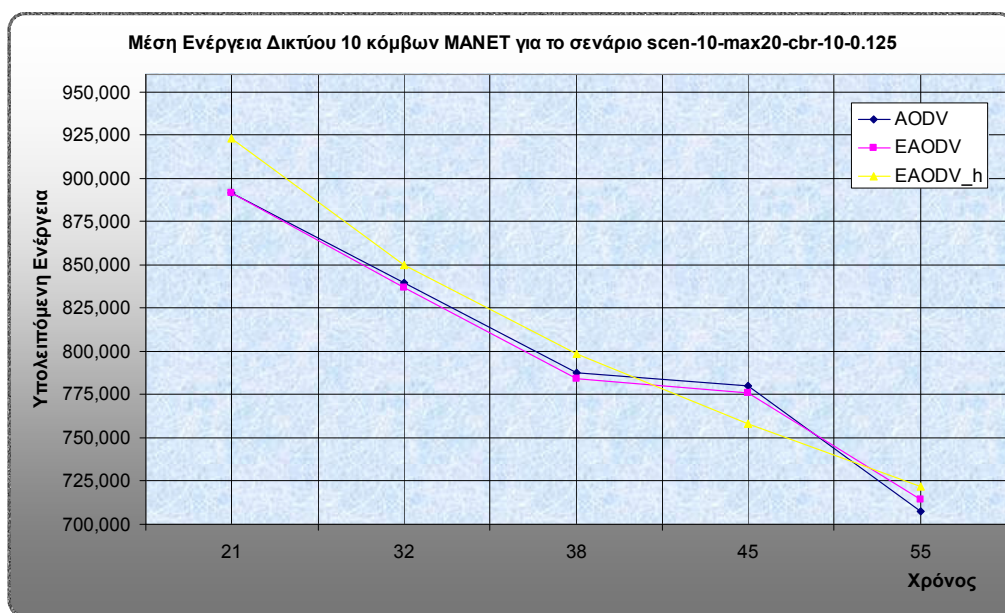


Εικόνα 29: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max0-cbr-10-0.125

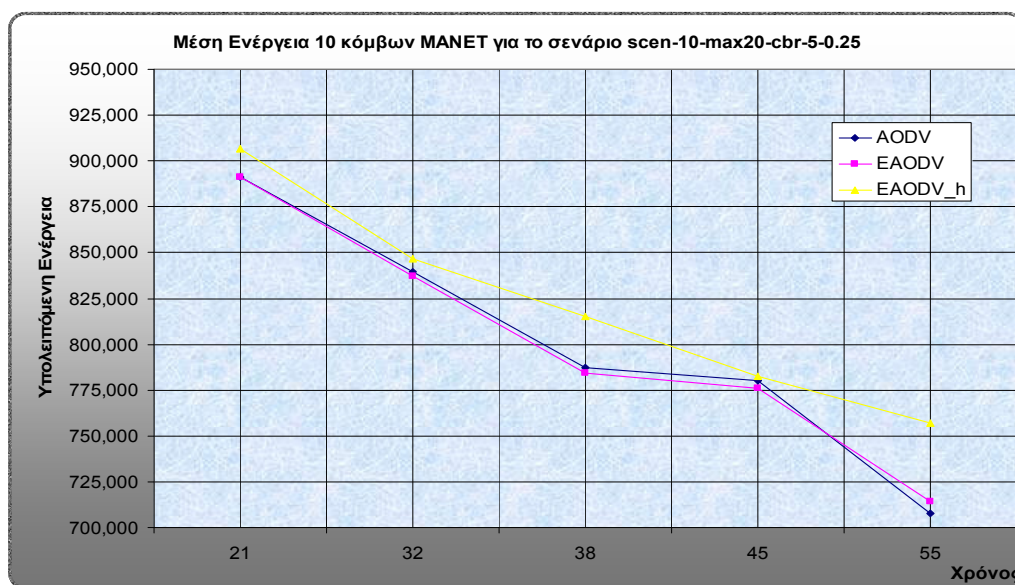
Όπως παρατηρούμε για το συγκεκριμένο σενάριο ο EAODV_hops έχει την καλύτερη απόδοση από τους τρεις αλγορίθμους. Στη χρονική βαθμίδα των 45 sec παρατηρούμε ότι ο EAODV_hops είναι λιγότερο αποδοτικός σε σχέση με τους άλλους δύο αλγορίθμους, κάτι που βασίζεται στην τυχαιότητα των συνδέσεων που δημιουργούνται στο δίκτυο. Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται ότι ο EAODV_hops αξιοποιεί σημαντικά πιο αποδοτικά τους ενεργειακούς πόρους του δικτύου. Ακολουθούν τα γραφήματα των υπόλοιπων 4 σεναρίων που περιγράφηκαν στον προηγούμενο πίνακα.



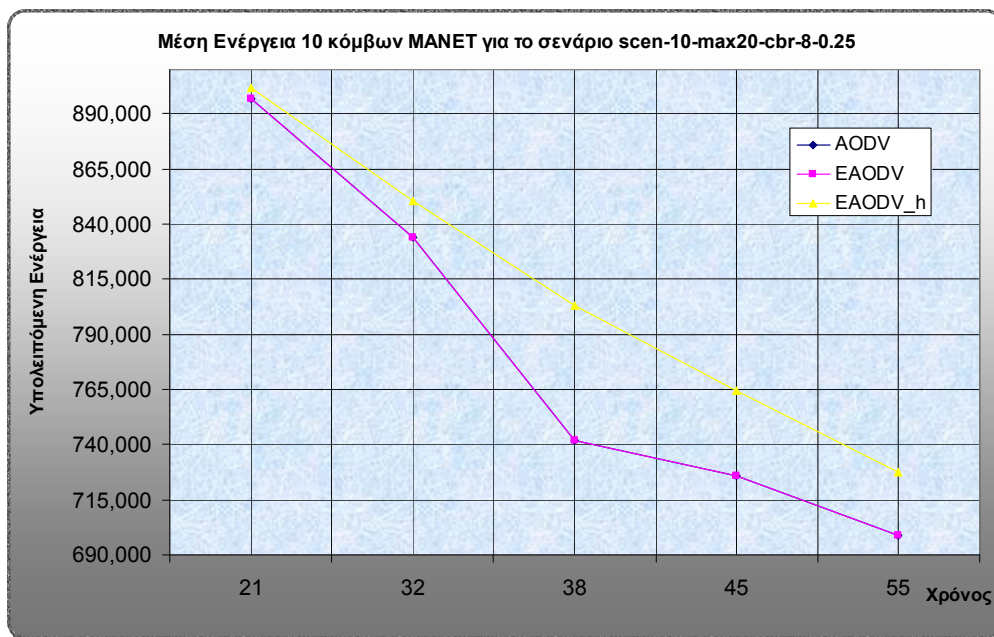
Εικόνα 30: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max0-cbr-10-0.25



Εικόνα 31: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max20-cbr-10-0.125



Εικόνα 32 : Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max20-cbr-5-0.25

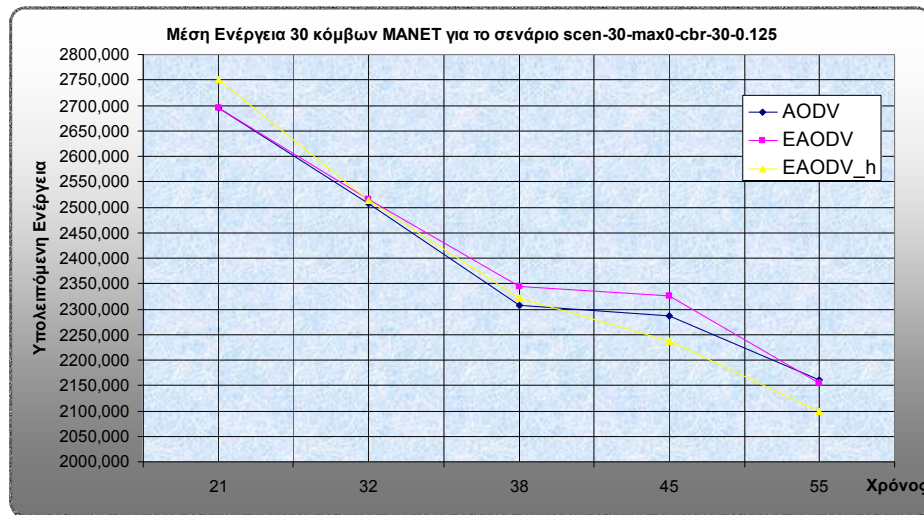


Εικόνα 33: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-10-max20-cbr-8-0.25

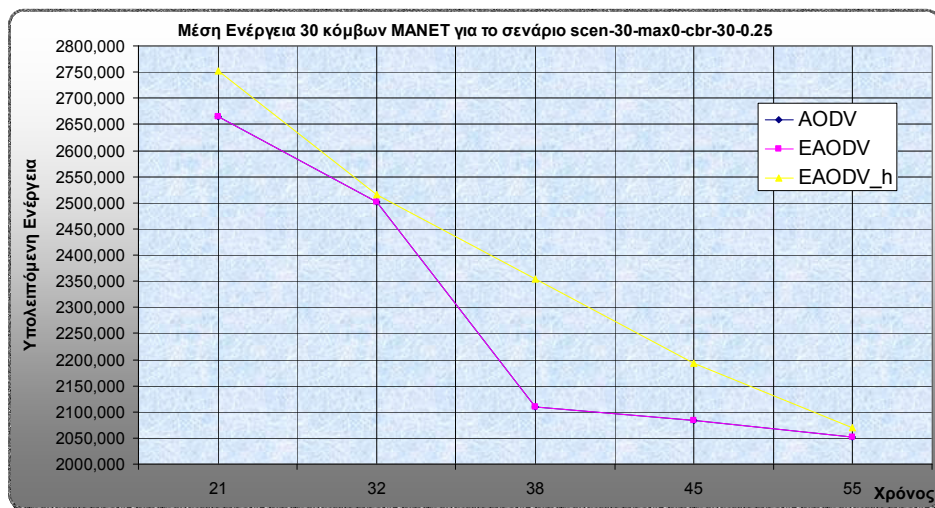
Ο ακόλουθος πίνακας περιέχει τις αντίστοιχες συγκριτικές τιμές για δίκτυο 30 κόμβων MANET βάσει των αντίστοιχων σεναρίων που έχουν δημιουργηθεί.

Συνδυασμός σεναρίου κίνησης κόμβων και δεδομένων	Αλγόριθμοι	Μέση Ενέργεια				
		21	32	38	45	55
scen-30-max0- cbr-30-0.125	AODV	2694.470	2507.900	2307.620	2287.440	2160.860
	EAODV	2694.470	2514.970	2343.610	2326.520	2154.910
	EAODV_hops	2750.640	2513.910	2322.060	2236.220	2099.670
scen-30-max0- cbr-30-0.25	AODV	2664.810	2500.800	2109.750	2083.790	2052.030
	EAODV	2664.810	2500.800	2109.750	2083.790	2052.030
	EAODV_hops	2751.360	2514.810	2355.020	2192.090	2069.950
scen-30-max20- cbr-30-0.125	AODV	2694.470	2507.900	2307.620	2287.440	2160.860
	EAODV	2694.470	2514.970	2343.610	2326.520	2154.910
	EAODV_hops	2750.640	2513.910	2322.060	2236.220	2099.670
scen-30-max20- cbr-5-0.25	AODV	2548.820	2534.820	2156.570	2141.850	2126.540
	EAODV	2548.820	2534.820	2166.570	2171.850	2146.540
	EAODV_hops	2696.240	2512.240	2413.940	2301.150	2223.300
scen-30-max20- cbr-8-0.25	AODV	2664.810	2500.800	2114.760	2092.410	2069.150
	EAODV	2664.810	2500.800	2114.760	2100.410	2079.150
	EAODV_hops	2751.360	2514.810	2352.010	2224.100	2106.070

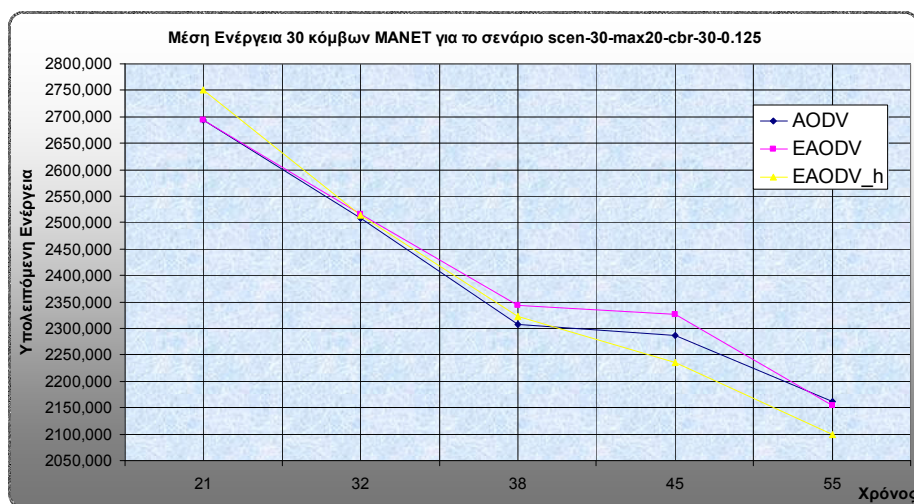
Πίνακας 32: Τιμές για 30 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV, EAODV και EAODV_hops για 5 διαφορετικά σεναρία



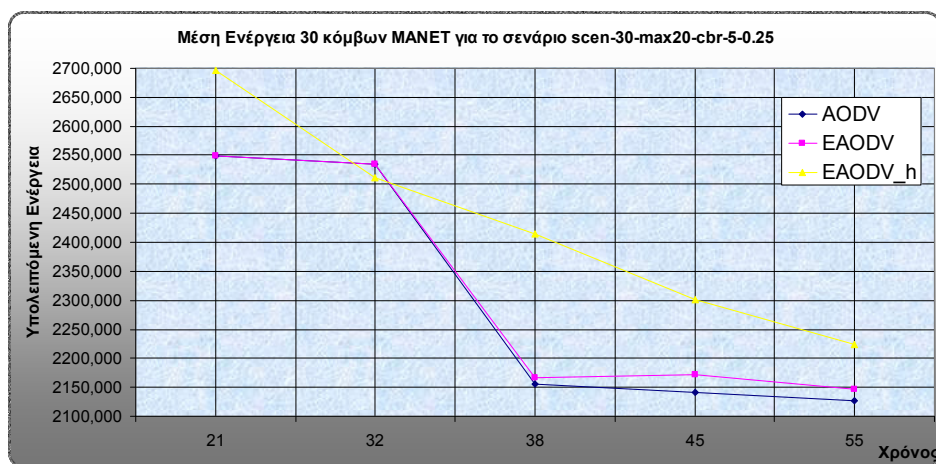
Εικόνα 34: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max0-cbr-30-0.125



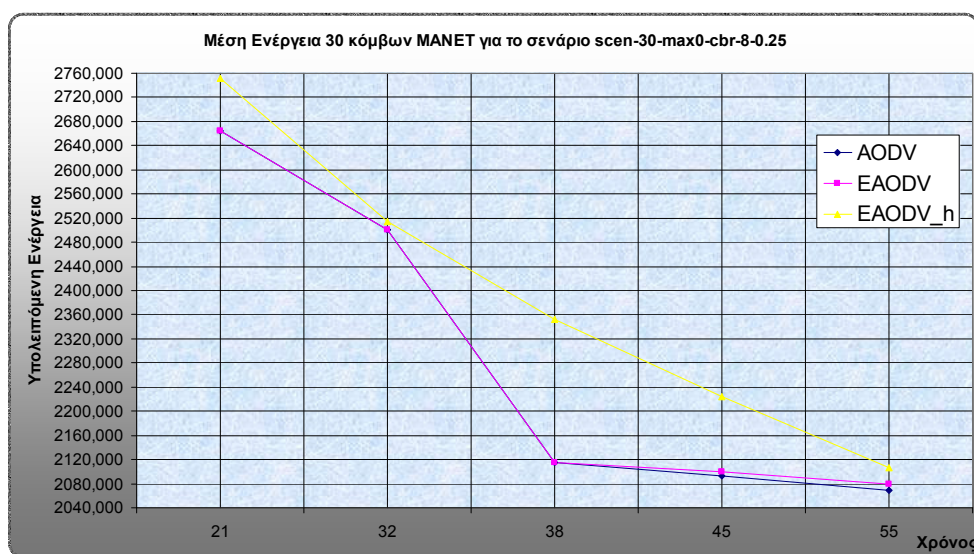
Εικόνα 35: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max0-cbr-30-0.25



Εικόνα 36: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max20-cbr-30-0.125



Εικόνα 37: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max20-cbr-5-0.25



Εικόνα 38: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-30-max20-cbr-8-0.25

Μια γενική παρατήρηση που προκύπτει από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν για τα διαφορετικά σενάρια δικτύου MANET 30 κόμβων είναι ότι η λειτουργία του EAODV_hops βελτιώνεται όταν ο ρυθμός αποστολής πακέτων (packet rate) καθορίζεται στην τιμή 0.25 packet ανά sec, δηλαδή όσο αυξάνεται το packet rate. Από την άλλη παρατηρούμε ότι σε όλα τα σενάρια η αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων του δικτύου στο χρόνο, γίνεται με πιο ορθολογικό τρόπο, κάτι που αποδεικνύεται και από την εξισορροπημένη καμπύλη του αλγορίθμου.

Ο ακόλουθος πίνακας περιέχει τις αντίστοιχες συγκριτικές τιμές για δίκτυο 50 MANET βάσει των αντίστοιχων σεναρίων που έχουν δημιουργηθεί.

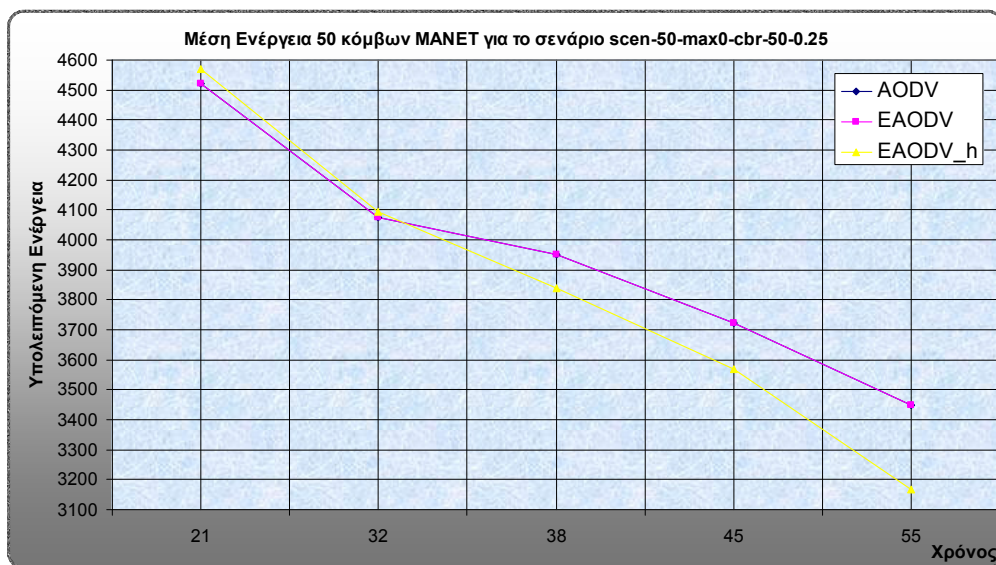
Συνδυασμός σεναρίου κίνησης κόμβων και δεδομένων	Αλγόριθμοι	Μέση Ενέργεια				
		21	32	38	45	55
scen-50-max0- cbr-50-0.125	AODV	4531.590	4079.790	3969.630	3761.320	3467.100
	EAODV	4531.590	4065.560	3956.600	3696.710	3419.010
	EAODV hops	4570.720	4083.630	3817.700	3522.790	3146.800
scen-50-max0- cbr-50-0.25	AODV	4522.520	4074.000	3949.540	3722.870	3449.140

	EAODV	4522.520	4074.000	3949.540	3722.870	3449.140
	EAODV_hops	4569.560	4095.170	3837.730	3568.650	3168.220
scen-50-max20- cbr-50-0.125	AODV	4531.590	4079.790	3969.630	3761.320	3467.100
	EAODV	4531.590	4065.560	3956.600	3696.710	3419.010
	EAODV_hops	4570.720	4083.630	3817.700	3522.790	3146.800
scen-50-max20- cbr-20-0.25	AODV	4522.520	4074.000	3949.540	3722.870	3449.140
	EAODV	4446.080	4112.920	3819.410	3792.680	3535.300
	EAODV_hops	4569.560	4108.080	3802.950	3594.220	3305.250
scen-50-max20- cbr-40-0.25	AODV	4446.080	4112.920	3819.410	3792.680	3535.300
	EAODV	4446.080	4112.920	3819.410	3792.680	3535.300
	EAODV_hops	4569.560	4108.080	3802.950	3594.220	3305.250

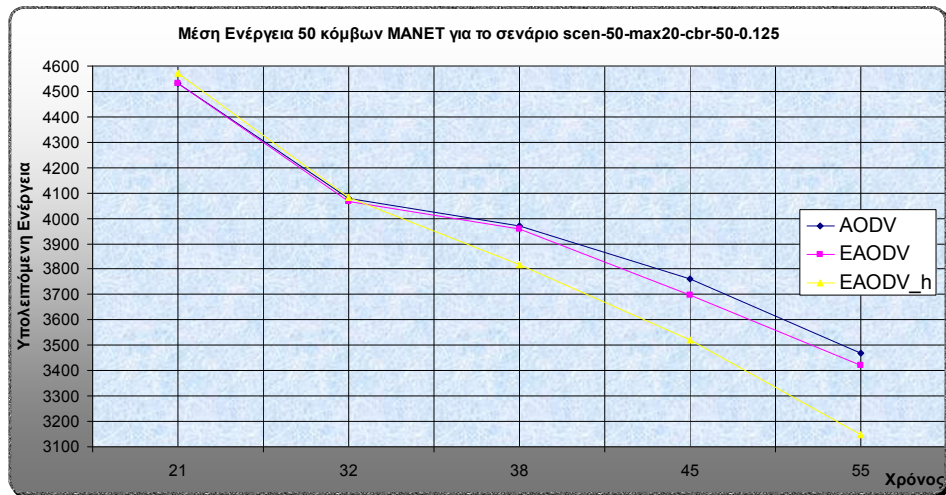
Πίνακας 33: Τιμές για 50 κόμβους MANET εφαρμόζοντας AODV, EAODV και EAODV_hops για 5 διαφορετικά σενάρια



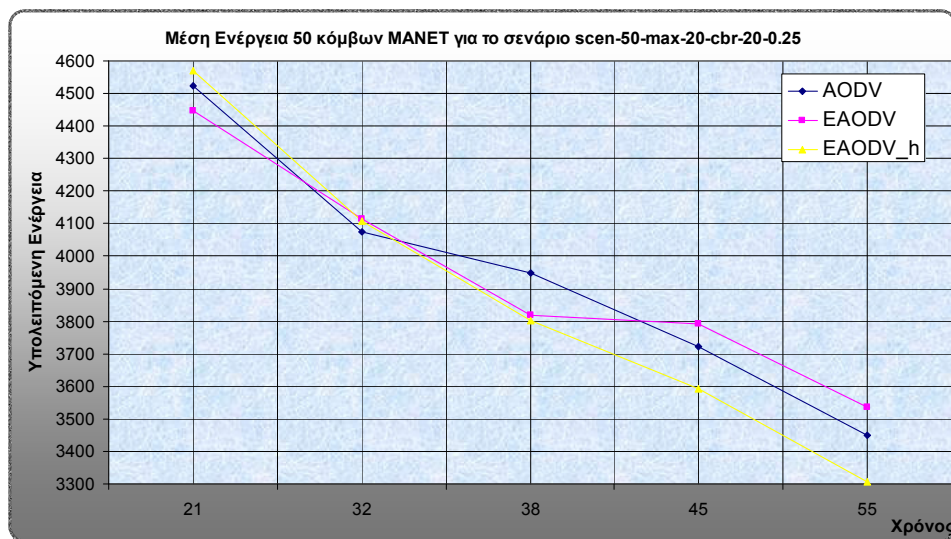
Εικόνα 39: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max0-cbr-50-0.125



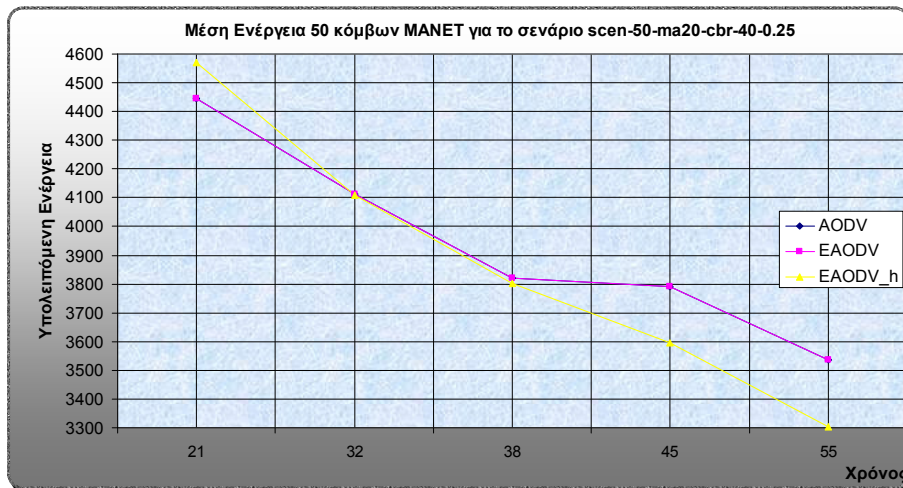
Εικόνα 40: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max0-cbr-50-0.125



Εικόνα 41: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max20-cbr-50-0.125



Εικόνα 42: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max20-cbr-20-0.25



Εικόνα 43: Συγκριτικό γράφημα με τις τιμές των αλγορίθμων για το σενάριο scen-50-max20-cbr-40-0.25

Παρατηρούμε ότι ο EAODV_hops όσο το δίκτυο γίνεται πιο πυκνό λειτουργεί λιγότερο αποδοτικά από τον EAODV και σε κάποιες περιπτώσεις και από τον AODV. Κρίνοντας για το σύνολο των γραφημάτων που παρουσιάστηκαν και για τα διαφορετικά σενάρια 10, 30 και 50 κόμβων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο EAODV_hops είναι πιο αποδοτικός ενεργειακά τόσο από τον AODV όσο και από τον EAODV στην πλειονότητα των σεναρίων 10 και 30 κόμβων, αποδεικνύοντας ότι σε μικρής κλίμακας δίκτυα θα πρέπει να προτιμάται. Οδηγεί σε βέλτιστη αξιοποίηση των ενεργειακών αποθεμάτων, αυξάνοντας τη δυνατότητα μελλοντικής δημιουργίας συνδέσεων. Εξαιτίας της ορθής διαχείρισης των ενεργειακών πόρων, αυξάνεται η βιωσιμότητα του δικτύου. Περισσότεροι κόμβοι είναι διαθέσιμοι στο χρόνο και έτσι βελτιώνεται η διαδικασία δρομολόγησης στο MANET. Ακόμα και στην περίπτωση των 50 κόμβων παρατηρούμε ότι η μέση ενέργεια του δικτύου στο χρόνο έχει πολύ πιο ομαλή απόπτωση και συνεπώς οι συσκευές αξιοποιούνται πιο ομαλά στο χρόνο συμμετέχοντας στη διαδικασία της δρομολόγησης. Αυτό θα οδηγήσει σταδιακά στην αύξηση της ζωής του δικτύου, καθώς περισσότεροι κόμβοι θα είναι διαθέσιμοι.

Προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η λειτουργία του EAODV πρωτοκόλλου θα μπορούσε να τεθεί ένα όριο στην επιλογή μεταξύ ενεργειακής διαδρομής. Πιο συγκεκριμένα αν η ενέργεια μιας διαδρομής έχει χαμηλότερη τιμή από ένα προκαθορισμένο όριο να απορρίπτεται η διαδρομή. Στόχος της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης θα ήταν η περαιτέρω βελτιστοποίηση στην αξιοποίηση των ενεργειακών αποθεμάτων.

Επιπλέον θα μπορούσε να τεθεί ένα όριο στην απόφαση του κριτηρίου που θα ληφθεί υπόψη για τον προσδιορισμό της κατάλληλης διαδρομής. Πιο συγκεκριμένα αν ο αριθμός των βημάτων ενός μονοπατιού είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο ενός άλλου μονοπατιού, αλλά η ενέργεια του δεύτερου είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του πρώτου τότε να επιλεγεί η δεύτερη διαδρομή.

5 Επίλυση του προβλήματος σε επίπεδο ανακάλυψης διαδρομής

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής που επιλέχθηκε και τις τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανακάλυψης και παράδοση υπηρεσίας. Θα παρουσιαστεί ένας μηχανισμός εύρεσης και παράδοσης υπηρεσίας που θα στοχεύει στη καλύτερη διαχείριση της ενέργειας των διαθέσιμων κόμβων που παρέχουν συγκεκριμένες υπηρεσίες στο δίκτυο.

Για τους σκοπούς της έρευνας θα χρησιμοποιήσουμε μια λύση επιπέδου εφαρμογής που προσφέρει δυνατότητα κατανεμημένης λειτουργίας, προκειμένου να προσαρμοστεί χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες στο μηχανισμό λειτουργίας των MANETs. Τα πιο γνωστά και συχνά χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα για τις συγκεκριμένες διαδικασίες αναφέρθηκαν και παρουσιάστηκαν συνοπτικά στο κεφάλαιο 2. Το πρωτόκολλο που επιλέχθηκε είναι το Service Location Protocol v2 (SLPv2). Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο «ελαφρύ» στη λειτουργία του, που μπορεί να δουλέψει τόσο με κεντριοποιημένο τρόπο όσο και κατανεμημένα. Όπως παρουσιάζεται στο [3] το SLP παρέχει τη δυνατότητα στους κόμβους (hosts) πρόσβασης σε πληροφορίες για τον εντοπισμό και τη διαμόρφωση δικτυακών υπηρεσιών. Παραδοσιακά, οι χρήστες πρέπει να ανακαλύψουν τις υπηρεσίες γνωρίζοντας το Domain Name System (DNS) που αποτελεί ψευδώνυμο της δικτυακής διεύθυνσης. Το SLP εξαλείφει την ανάγκη να γνωρίζει ο χρήστης το όνομα του εκάστοτε server κάποιας υπηρεσίας. Αντιθέτως, ο χρήστης εισάγει τον επιθυμητό τύπο καθώς και ένα σύνολο χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που περιγράφουν την υπηρεσία. Βασισμένο σε αυτή τη περιγραφή, το Service Location Protocol βρίσκει τη διεύθυνση δικτύου της υπηρεσίας που αναζητά ο χρήστης.

Το SLP παρέχει ένα δυναμικό μηχανισμό διαμόρφωσης εφαρμογών σε τοπικά δίκτυα. Οι εφαρμογές (applications) μοντελοποιούνται ως πελάτες (clients) που χρειάζεται να βρουν εξυπηρετητές (servers), μέσα στο δίκτυο. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί πελάτες και διαθέσιμες υπηρεσίες, το πρωτόκολλο προσαρμόζεται ώστε να χρησιμοποιήσει τους γειτονικούς Directory Agents, που προσφέρουν κεντριοποιημένη ομαδοποίηση των υπηρεσιών.

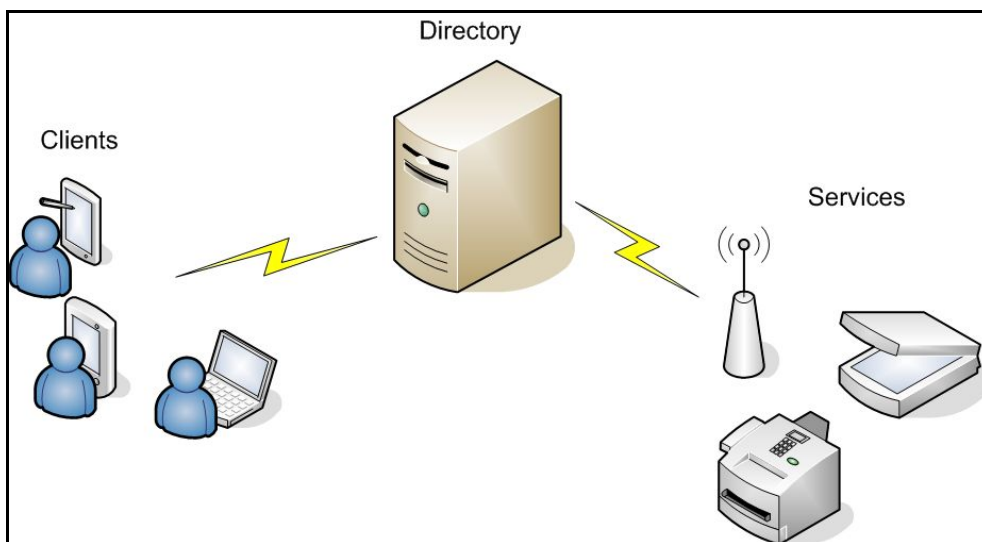
Η διαδικασία ανακάλυψης υπηρεσίας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τρεις οντότητες που χαρακτηρίζονται και ως πράκτορες (agents). Λειτουργούν εκ μέρους των δικτυακών κόμβων και κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες: i) *τους User Agents (UAs)*, ii) *τους Service Agents (SAs)* και iii) *τους Directory Agents (DAs)*. Οι Υπηρεσίες (Services) αντιπροσωπεύονται από τους SAs, ενώ οι UAs λειτουργούν για λογαριασμό των χρηστών. Η ανακάλυψη υπηρεσίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο μορφές, παθητική ή ενεργητική. Στην πρώτη, οι SAs εκπέμπουν καθολικά πληροφορίες υπηρεσιών προς τους DAs (passive discovery), ενώ στη δεύτερη απαντούν σε αιτήσεις που αφορούν υπηρεσίες (active discovery). Οι UAs αιτούνται πληροφορίες για διαθέσιμες υπηρεσίες (active discovery), ή δέχονται μηνύματα που εκπέμπονται καθολικά από τους DAs. Οι Διαμεσολαβητές, που αντιπροσωπεύονται από τους DAs, είναι ενδιάμεσες «αποθήκες» πληροφοριών για τις υπηρεσίες του δικτύου. Αποθηκεύουν τις πληροφορίες που στέλνουν οι SAs, και ικανοποιούν αντίστοιχα τα αιτήματα των UAs. Παρόμοια, οι DAs λειτουργούν είτε σε ενεργητική (active) είτε σε παθητική (passive) κατάσταση. Η αναζήτηση υπηρεσιών γίνεται με

ερωτήματα βασισμένα σε αλφαριθμητικά (string), ενώ για την πρόσβαση σε αυτές χρησιμοποιούνται Universal Resource Locators (URLs).

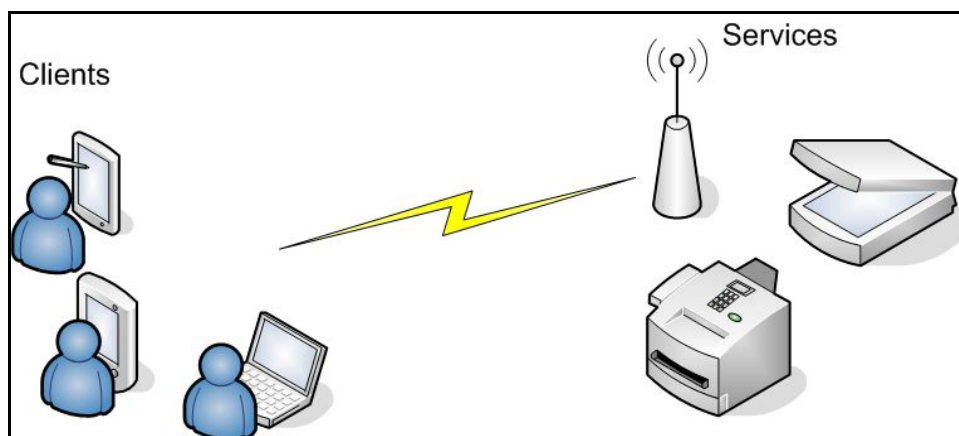
Το SLP αναπτύχθηκε κυρίως για ενσύρματα δίκτυα. Μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε κεντροποιημένη (centralized) όσο και κατανεμημένη (distributed) μορφή. Στη κεντροποιημένη λειτουργία, οι servers διαφημίζουν τις υπηρεσίες τους στους DAs και οι πελάτες εκπέμπουν τις αιτήσεις τους απευθείας στους DAs. Οι τελευταίοι, απαντούν με μία λίστα όλων των υπηρεσιών που αντιστοιχούν στις αιτήσεις. Οι πελάτες και οι πάροχοι μαθαίνουν για τους DAs διαβάζοντας ένα στατικό, διαμορφωμένο αρχείο, αναμένοντας περιοδικά διαφημιστικά μηνύματα από τους DAs ή στέλνοντας μηνύματα ώστε να προκαλέσουν μια διαφήμιση που θα αποσταλεί από τους DAs.

Στην κατανεμημένη λειτουργία, δεν υπάρχουν DAs και οι πελάτες αιτούνται υπηρεσιών κοινοποιώντας μηνύματα άμεσα στους παρόχους, μέσω μιας γνωστής διεύθυνσης. Ο server, όταν λάβει ένα αίτημα, απαντάει κατευθείαν στο πελάτη-χρήστη.

Σχηματικά το SLP περιγράφεται στα ακόλουθα σχήματα (Σχήμα 4 και Σχήμα 5):



Σχήμα 4: Κεντροποιημένη λειτουργία SLP



Σχήμα 5: Κατανεμημένη λειτουργία SLP

Η ύπαρξη Directory Agent στα ad hoc δίκτυα δεν είναι απαραίτητη καθώς όπως έχει προαναφερθεί δεν απαιτούν κεντρικούς κόμβους. Παρακάτω θα αναπτυχθούν τα

βασικά στοιχεία του Service Location Protocol, ενώ στη συνέχεια θα αναλυθούν οι προτεινόμενες βελτιστοποιήσεις του πρωτοκόλλου ώστε να λειτουργεί πιο αποδοτικά σε ασύρματα, κινητά δίκτυα.

5.2 SLP

5.2.1 Ορολογία

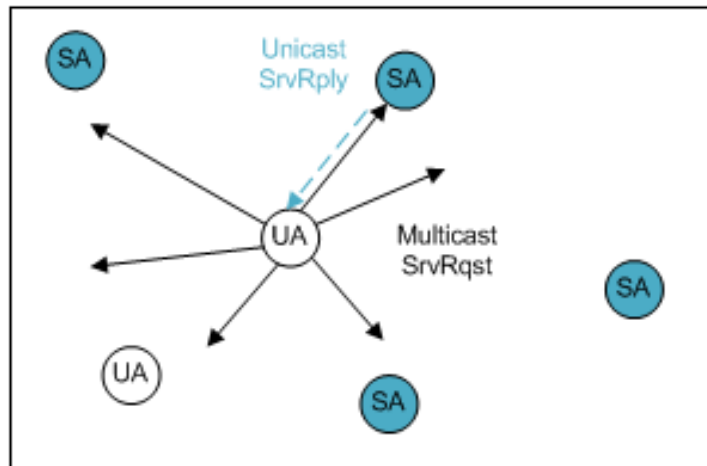
Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί η ορολογία που χρησιμοποιείται στο πρωτόκολλο SLP:

- **User Agent (UA)**
Μία διαδικασία που εκτελείται για λογαριασμό ενός χρήστη ώστε να επιτύχει επικοινωνία με μία υπηρεσία/εφαρμογή. Ο UA ανακτά πληροφορία για τις υπηρεσίες του δικτύου από τους Service Agents ή τους Directory Agents.
- **Service Agent (SA)**
Μία διαδικασία που εκτελείται για τη διαφήμιση ενός ή περισσότερων υπηρεσιών.
- **Directory Agent (DA)**
Μία διαδικασία που συλλέγει διαφημίσεις υπηρεσιών. Μπορεί να υπάρχει μόνο ένας DA για κάθε host.
- **Service Type**
Κάθε τύπος υπηρεσίας έχει μία μοναδική συμβολοσειρά Service Type (string).
- **Naming Authority**
Η αντιπροσωπεία ή το group που κατηγοριοποιεί τα Service Types και τα χαρακτηριστικά (Attributes) των υπηρεσιών. Το εξ ορισμού (default) Naming Authority είναι το IANA.
- **Scope**
Ένα σύνολο υπηρεσιών, που συνήθως σχηματίζουν ένα λογικό group διαχείρισης.
- **URL**
Uniform Resource Locator μεταφέρει τουλάχιστον το όνομα του πρωτοκόλλου πρόσβασης καθώς και τη διεύθυνση που βρίσκεται η υπηρεσία. Αυτή η πληροφορία θα χρησιμοποιηθεί από τον UA μετά από την διαδικασία ανακάλυψης υπηρεσίας με σκοπό την απευθείας επικοινωνία με την ευρισκόμενη υπηρεσία.
- **Strings**
Όλες οι συμβολοσειρές κωδικοποιούνται χρησιμοποιώντας το Universal Transformation Format (UTF)-8 του συνόλου χαρακτήρων Unicode και όταν μεταδίδονται δεν είναι κενού περιεχομένου. Τα strings προηγούνται από ένα πεδίου μήκους δύο bytes.
- **<string-list>**
Μία λίστα από strings χωρισμένα με κόμμα με την ακόλουθη σύνταξη:
string-list = string / string ‘,’ string-list.

5.3 Συνοπτική παρουσίαση του πρωτοκόλλου

Ο User Agent εκπέμπει ένα μήνυμα 'Service Request' (SrvRqst) για λογαριασμό του πελάτη, ορίζοντας τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας που αναζητά ο πελάτης. Ο User Agent θα λάβει ένα μήνυμα Service Reply (SrvRply) που θα ορίζει τη δικτυακή τοποθεσία στο δίκτυο, κάθε υπηρεσίας που ικανοποιεί το αρχικό αίτημα.

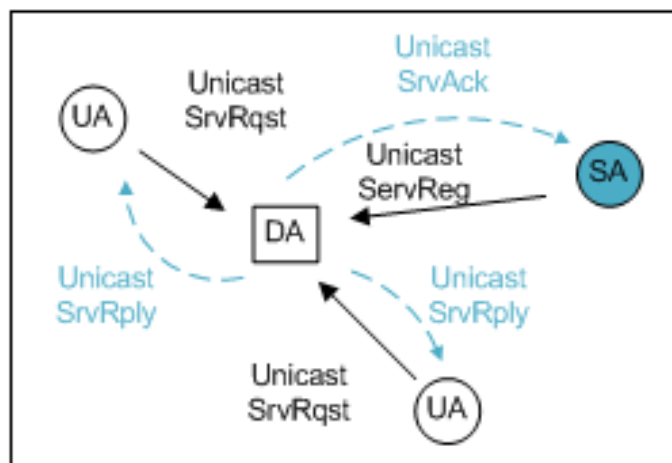
Το πλαίσιο εργασίας του Service Location Protocol επιτρέπει στο User Agent να εκπέμπει απευθείας αιτήματα στους Service Agents. Σε αυτή τη περίπτωση, το request είναι μήνυμα πολλαπλής εκπομπής. Οι Service Agents που λαμβάνουν μια αίτηση για μια υπηρεσία που διαφημίζουν, εκπέμπουν μόνο προς τον ενδιαφερόμενο κόμβο μία απάντηση που περιέχει την τοποθεσία της εν λόγω υπηρεσίας. Σχηματικά εκτελείται η εξής διαδικασία:



Σχήμα 6: Εκπομπή μηνυμάτων SrvRqst και SrvRply

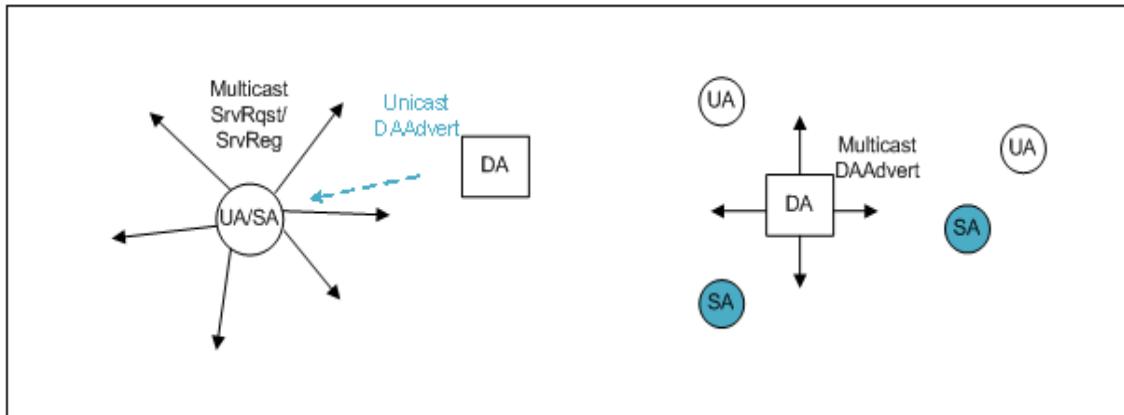
Σε μεγαλύτερα δίκτυα, κρίνεται απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενός ή περισσότερων Directory Agents, που λειτουργούν ως μονάδες αποθήκευσης. Οι Service Agents στέλνουν στους DAs μηνύματα εγγραφής (SrvReg) τα οποία περιέχουν όλες τις υπηρεσίες που θέλουν να διαφημίσουν. Ως απάντηση, λαμβάνουν μηνύματα επιβεβαίωσης (SrvAck).

Τα διαφημιστικά μηνύματα πρέπει να ανανεώνονται από τον DA αλλιώς εκπνέουν. Οι User Agents εκπέμπουν αιτήματα στους Directory Agents αντί να τα στέλνουν στους Service Agents, αν βέβαια κάποιοι DAs είναι γνωστοί. Η παραπάνω λειτουργία περιγράφεται ως εξής:



Σχήμα 7: Αποστολή μηνυμάτων μέσω Directory Agents

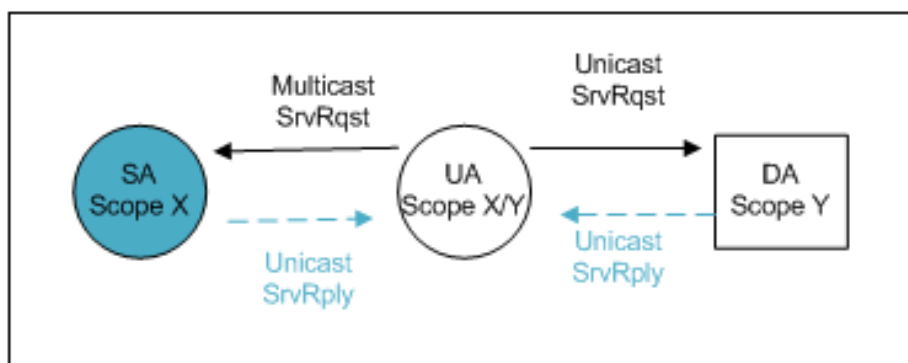
Οι User και Service Agents ανακαλύπτουν τους DAs με δύο τρόπους, είτε εκπέμποντας προς πολλαπλές κατευθύνσεις μηνύματα Service Request, είτε λαμβάνοντας διαφημιστικά μηνύματα από τους DAs. Τα συγκεκριμένα μηνύματα τα «ακούνε» μέσω του διαύλου οι User και Service Agents. Σε κάθε περίπτωση, οι Agents λαμβάνουν ένα μήνυμα DA Advertisement (DAAdvert).



Σχήμα 8: Ανακάλυψη των Directory Agents

Οι υπηρεσίες ομαδοποιούνται χρησιμοποιώντας εμβέλεις (scopes). Τα scopes είναι strings που προσδιορίζουν υπηρεσίες που είναι διαχειριστικά αναγνωρίσιμες. Ένα scope μπορεί να υποδηλώνει μια τοποθεσία, ένα group διαχείρισης, μια γειτονική περιοχή σε μια τοπολογία δικτύου ή κάποια άλλη κατηγορία. Οι Service και οι Directory Agents πάντα προσδιορίζονται από ένα scope string.

Ένας User Agent προσδιορίζεται από ένα αλφαριθμητικό (scope string), που του παρέχει τη δυνατότητα αναγνώρισης της ομαδοποίησης των υπηρεσιών. Εναλλακτικά, ο User Agent μπορεί να διαμορφωθεί χωρίς scope. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να ανακαλύψει όλα τα διαθέσιμα scopes των υπηρεσιών. Ταυτόχρονα θα πρέπει να δίνει τη δυνατότητα στον πελάτη να εκπέμψει αιτήματα για κάθε διαθέσιμη υπηρεσία στο δίκτυο. Το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 9) περιγράφει την εν λόγω διαδικασία:



Σχήμα 9: Ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω scopes

Στην παραπάνω διαδικασία, ο User Agent σχηματίζεται με scopes X και Y. Αν μια υπηρεσία εντοπιστεί στο scope X, το αίτημα εκπέμπεται προς πολλαπλούς SAs (multicast). Εάν αυτή η υπηρεσία εντοπιστεί στο scope Y, το μήνυμα request

εκπέμπεται μοναδικά (unicast) προς τον DA. Τέλος, αν το request διαμορφωθεί ώστε να σταλεί και στα δύο scopes, τότε πρέπει να είναι και unicast και multicast μήνυμα.

5.3.1 Τα URLs που χρησιμοποιούνται στο Service Location

Ένα Service URL υποδεικνύει την τοποθεσία της υπηρεσίας και έχει την ακόλουθη μορφή:

`"service:"<srvtype>:"//"<addrspec>`

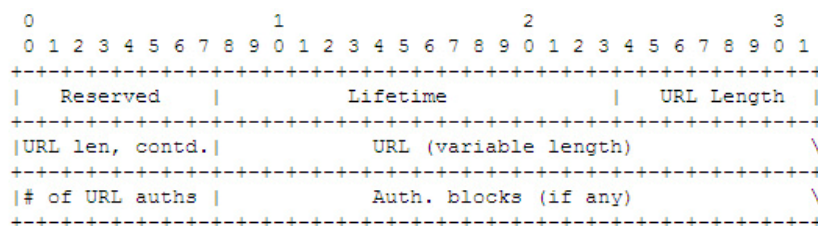
Το service URL πρέπει να αποτελείται από κάποιο προκαθορισμένο όνομα πρωτοκόλλου το οποίο συνδέεται με τη λέξη "service:" και τη δεσμευμένη θύρα. Για παράδειγμα, το "service:tftp://myhost" δείχνει μια tftp υπηρεσία. Μια tftp υπηρεσία σε μία μη προκαθορισμένη θύρα θα έχει τη μορφή: "service:tftp://bad.glad.org:8080". Τα Service Types πρέπει να ορίζονται από ένα "Service Template", το οποίο παρέχει τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά, τις τιμές και τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου. Ένας αφηρημένος τύπος υπηρεσίας έχει την εξής μορφή:

`"service:<abstract-type>:<concrete-type>"`.

Η συμβολοσειρά του service type "service:<abstract-type>" ταιριάζει σε όλες τις υπηρεσίες που καθορίζονται με τον αφηρημένο τύπο. Αν περιλαμβάνεται το concrete type, μόνο αυτές οι υπηρεσίες ταιριάζουν στα μηνύματα request. Για παράδειγμα, ένα SrvRqst ή AttrRqst το οποίο καθορίζει ως τύπο το "service:printer", θα ταιριάζει και το URL service:printer:lp://hostname και το service:printer:http://hostname. Αν τα αιτήματα όριζαν "service:printer:http", τότε θα ταιριάζει μόνο το δεύτερο URL.

5.3.1.1 Ανάλυση των URL Entries

Το SLP αποθηκεύει τα URLs σε στοιχεία πρωτοκόλλου που καλούνται URL Entries και τα οποία συνδέουν το URL με πεδία όπως μήκος, διάρκεια ζωής και περιέχουν επιπλέον πληροφορία πιστοποίησης, για το ταίριασμα της υπηρεσίας. Τα URL Entries, που ορίζονται όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα, χρησιμοποιούνται στα Service Replies και Registrations.



Σχήμα 10: URL Entries

5.3.1.2 Χρήση των Ports, του UDP, και της Multicast εκπομπής

Οι DAs πρέπει να αποδέχονται αιτήματα που στέλνονται με unicast καθώς και με multicast μηνύματα για ανακάλυψη υπηρεσιών (με service type "service:directory-agent"). Οι SAs πρέπει να αποδέχονται τόσο multicast όσο και unicast αιτήματα. Ο SA μπορεί να τα διακρίνει από το αν είναι ενεργοποιημένη η σημαία REQUEST MCAST στην επικεφαλίδα του SLP μηνύματος. Το Service Location Protocol χρησιμοποιεί εξ ορισμού πολλαπλή εκπομπή (multicast) για ανακάλυψη των DAs και για μετάδοση αιτημάτων στους SAs.

Η δεσμευμένη θύρα είναι η 427, η οποία αποτελεί τη θύρα προορισμού για όλα τα SLP μηνύματα. Απαντήσεις και επιβεβαιώσεις λήψης στέλνονται στη θύρα από την

οποία στάλθηκε το αντίστοιχο αίτημα. Η default μέγιστη μονάδα μεταφοράς πακέτου για τα UDP μηνύματα είναι 1400 bytes εξαιρουμένων των UDP και άλλων επικεφαλίδων.

Εάν ένα SLP μήνυμα δε χωράει σε ένα UDP datagram, πρέπει να «κατακερματιστεί» ώστε να χωράει και τότε ενεργοποιείται η σημαία OVERFLOW στο μήνυμα απάντησης. Ένας UA που λαμβάνει ένα κατακερματισμένο μήνυμα, μπορεί να ανοίξει μία TCP σύνδεση με τον DA ή τον SA και να επανεκπέμψει το αίτημά του χρησιμοποιώντας το ίδιο XID (πρόκειται για πεδίο στο SLP μήνυμα). Μπορεί επίσης, να προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει τη κομμένη απάντηση ή να σχηματίσει ένα πιο περιορισμένο αίτημα προς αποστολή.

Το πεδίο Time-To-Live έχει την τιμή 255 σαν προκαθορισμένη για multicast εκπομπή. Αν τεθεί το TTL λιγότερο από 255, περιορίζει το εύρος της αναζήτησης στο δίκτυο.

5.3.1.3 Επαναμετάδοση SLP μηνυμάτων

Τα request μηνύματα που απορρίπτονται, επαναμεταδίδονται. Η πρώτη επαναμετάδοση επιτυγχάνεται μετά από μια περίοδο αναμονής CONFIG_RETRY. Οι επαναμεταδόσεις γίνονται με εκθετικό τρόπο, διπλασιάζοντας κάθε φορά τη περίοδο αναμονής. Αυτό βρίσκει εφαρμογή τόσο σε unicast όσο και σε multicast εκπομπές SLP αιτημάτων.

Τα unicast αιτήματα προς έναν DA ή SA επαναμεταδίδονται μέχρι να υπάρξει απάντηση, αλλιώς μεταδίδονται για τόσο χρονικό διάστημα όσο καθορίζεται από το πεδίο CONFIG_RETRY_MAX σε δευτερόλεπτα. Τα multicast αιτήματα μπορούν να επανεκπέμπονται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από αυτό που καθορίζει το CONFIG_MC_MAX, μέχρι να ληφθεί κάποιο αποτέλεσμα. Οι UAs περιμένουν μέχρι να αφιχθεί η πρώτη απάντηση στο αίτημά τους.

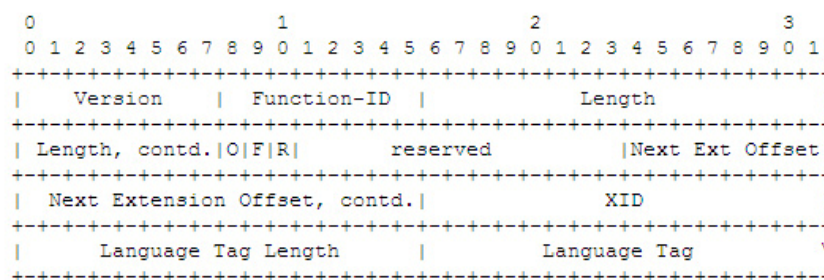
Όταν τα SLP μηνύματα SrvRqst, SrvTypeRqst και AttrRqst είναι multicast, περιλαμβάνουν μία <PRList> από προηγούμενους αποκρινόμενους κόμβους. Αρχικά η <PRList> είναι κενή. Όταν αυτά τα μηνύματα είναι unicast, η λίστα <PRList> είναι πάντα κενή. Κάθε DA ή SA που βλέπει τη διεύθυνσή του στη <PRList> δεν απαντάει στο αντίστοιχο αίτημα.

Οι UAs που επαναμεταδίδουν ένα αίτημα, χρησιμοποιούν το ίδιο XID. Αυτό επιτρέπει στον DA ή τον SA να αποθηκεύσει την απάντησή του στο αρχικό αίτημα και όταν καταφθάσει ένα αντίγραφο της αίτησης, να έχει έτοιμη την απάντηση προκειμένου να την επαναπροωθήσει. Η αποθηκευμένη πληροφορία πρέπει να κρατείται όμως για μικρό χρονικό διάστημα. Το πεδίο XID πρέπει να επιλέγεται τυχαία ώστε να αποφεύγονται διπλότυπα XIDs στα αιτήματα στην περίπτωση που οι UAs επαναμεταδίδουν συχνά.

5.4 SLP Μηνύματα

Όλα τα πεδία στα SLP μηνύματα είναι σε διάταξη ανά byte δικτύου (network byte order).

Όλα τα SLP μηνύματα περιέχουν την ακόλουθη επικεφαλίδα:



Σχήμα 11:Επικεφαλίδα SLP μηνυμάτων

Τα SLP μηνύματα διαχωρίζονται και έχουν ένα αντίστοιχο αναγνωριστικό αριθμό (ID).Ο συγκεκριμένος αριθμός αποτελεί μέρος της επικεφαλίδας του SLP μηνύματος και τοποθετείται στη θέση του πεδίου Function-ID. Οι αντίστοιχες τιμές παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα:

Message Type	Abbreviation	Function-ID
Service Request	SrvRqst	1
Service Reply	SrvRply	2
Service Registration	SrvReg	3
Service Deregister	SrvDeReg	4
Service Acknowledge	SrvAck	5
Attribute Request	AttrRqst	6
Attribute Reply	AttrRply	7
DA Advertisement	DAAdvert	8
Service Type Request	SrvTypeRqst	9
Service Type Reply	SrvTypeRply	10
SA Advertisement	SAAadvert	11

Σχήμα 12: Διαχωρισμός μηνυμάτων SLP και αντίστοιχα Function-IDs

Οι SAs και οι UAs υποστηρίζουν μηνύματα τύπου SrvRqst, SrvRply και DAAdvert. Οι SAs πρέπει να υποστηρίζουν τα μηνύματα SrvReg, SAAadvert και SrvAck. Προαιρετικά τόσο οι UAs, όσο και οι SAs, μπορούν να υποστηρίζουν και άλλα μηνύματα.

Τα πεδία της επικεφαλίδας του SLP μηνύματος αναλύονται ως εξής:

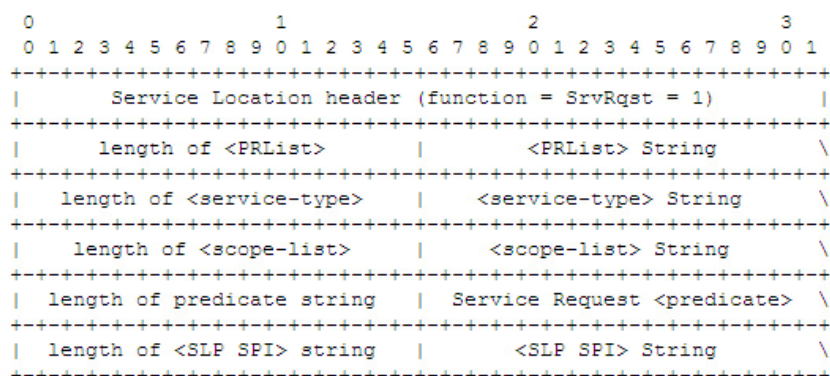
- Length είναι το μήκος ολόκληρου του SLP μηνύματος συμπεριλαμβανομένου και της επικεφαλίδας.
- Οι flags είναι: OVERFLOW (0x80), τίθεται στο 1 όταν το μήκος του μηνύματος υπερβαίνει το πλαίσιο. FRESH (0x40), τίθεται στο 1 κάθε νέο SrvReg. REQUEST MCAST (0x20), τίθεται στο 1 όταν υπάρχουν multicasting ή broadcasting αιτήματα. Τα Reserved bits πρέπει να είναι 0.
- Το Next Extension Offset τίθεται στο 0 εκτός αν χρησιμοποιούνται επεκτάσεις. Η πρώτη επέκταση ξεκινάει από τα 'offset' bytes, από την έναρξη του μηνύματος. Τοποθετείται μετά από τα δεδομένα του SLP μηνύματος.
- XID τίθεται σε μία μοναδική τιμή για κάθε ξεχωριστή αίτηση. Εάν η αίτηση επαναμεταδίδεται, χρησιμοποιείται το ίδιο XID. Οι απαντήσεις θέτουν το XID

στην ίδια τιμή που έχει και το αντίστοιχο αίτημα. Μόνο αυτόκλητα DAAdverts στέλνονται με XID 0.

- Lang Tag Length είναι το μήκος σε bytes του πεδίου Language Tag.
- Language Tag είναι η γλώσσα των μηνυμάτων. Το Language Tag σε μια απάντηση πρέπει να είναι το ίδιο με το Language Tag στο αρχικό αίτημα. Αυτό το πεδίο κωδικοποιείται με 1*8ALPHA *("-" 1*8ALPHA).

Εάν μια επιλογή ορίζεται και δεν συμπεριλαμβάνεται στο μήνυμα, ο παραλήπτης πρέπει να απαντήσει με PARSE_ERROR.

5.4.1 Service Request



Σχήμα 13: Service Request

Μία υπηρεσία, για να ταιριάζει ένα μήνυμα SrvRqst, πρέπει να ανήκει το λιγότερο σε ένα scope αίτησης και να υποστηρίζει το τύπο της υπηρεσίας που αναζητείται. Η <PRList> είναι η προηγούμενη αποκρινόμενη λίστα. Αυτή η <string-list> περιέχει IP διευθύνσεις (v4) και στέλνεται επαναληπτικά με multicast εκπομπή για να συλλέξει όλα τα δυνατά αποτελέσματα. Οι UAs υλοποιούν αυτό τον αλγόριθμο ανακάλυψης. Οι SAs χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη λίστα για να ανακαλύψουν τους διαθέσιμους DAs στην εμβέλειά τους, εάν δεν έχουν επικοινωνία με τις διευθύνσεις των DAs με κάποιο άλλο τρόπο.

Ένας SA απορρίπτει όλα τα αιτήματα τα οποία περιλαμβάνουν τη δικιά του διεύθυνση στη <PRList>. Διαθέτει πολλές δικτυακές επαφές, και πρέπει να ελέγχει όλες τις εγγραφές της <PRList> εάν ταιριάζουν με κάποια από τις διεπαφές του.

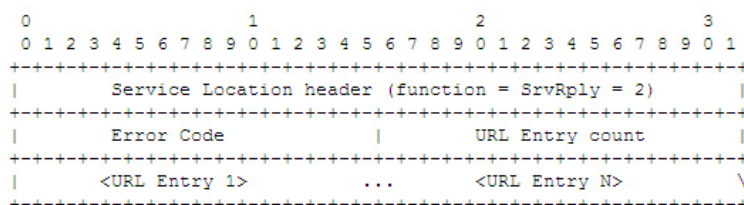
Η <scope-list> είναι μια <string-list> από διαμορφωμένα ονόματα scopes. Οι SAs και οι DAs που έχουν σχηματιστεί θα απαντήσουν στα αιτήματα.

Ένα μήνυμα SrvRqst προκαλεί ένα μήνυμα SrvRply. Υπάρχουν δύο εξαιρέσεις: Εάν το <service-type> τεθεί στο "service:directory-agent", οι DAs αποκρίνονται στο SrvRqst με ένα μήνυμα DAAdvert. Εάν τεθεί στο "service:service-agent", οι SAs αποκρίνονται με ένα SAAdvert. Αν παραλείπεται αυτό το πεδίο, επιστρέφεται ένα PARSE_ERROR – καθώς αποτελεί απαραίτητο πεδίο.

Το πεδίο <predicate> είναι ένα φίλτρο αναζήτησης, και είναι προαιρετικό. Οι υπηρεσίες ανακαλύπτονται απλά από τον τύπο και το scope τους. Αλλιώς, ανακαλύπτονται όταν ικανοποιούν το πεδίο <predicate>. Οι DAs, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, ανακαλύπτονται όταν αποσταλλεί ένα SrvRqst με τον τύπο της υπηρεσίας να είναι "service:directory-agent". Στην περίπτωση όμως που στο μήνυμα SrvRqst περιλαμβάνεται το predicate, ο DA απαντά μόνο αν τα χαρακτηριστικά του ικανοποιούν το φίλτρο.

Τέλος, το string <SLP SPI> υποδηλώνει ένα SLP Security Parameter Index (SPI) που η πηγή έχει διαμορφώσει. Αν παραλείπεται αυτό το string, ο αποκρινόμενος κόμβος δεν περιέχει block πιστοποίησης στην απάντησή του. Εάν πάλι περιλαμβάνεται, ο αποκρινόμενος πρέπει να επιστρέφει απάντηση με block πιστοποίησης που να σχετίζεται με το SLP SPI του SrvRqst. Σε περίπτωση που δεν επιστρέφονται απαντήσεις λόγω μη υποστήριξης του SLP SPI, ο αποκρινόμενος επιστρέφει ένα σφάλμα AUTHENTICATION_UNKNOWN.

5.4.2 Service Reply

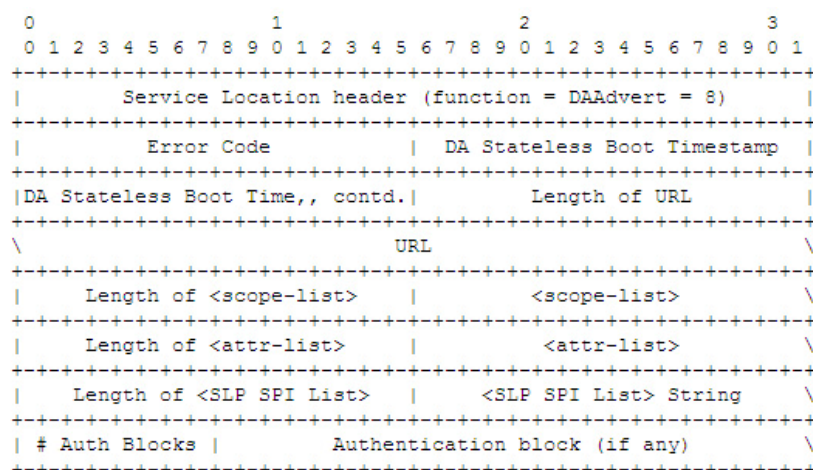


Σχήμα 14: Service Reply

Το μήνυμα service reply περιέχει μηδέν ή περισσότερα URL entries. Ένα service reply που περιέχει την τιμή 0 στο πεδίο URL entries, στέλνεται ως απάντηση σε ένα unicast μήνυμα Service Request, σε περίπτωση που κανένα URL δε ταιριάζει. Ένα service reply με 0 URL entries δεν στέλνεται ως απάντηση σε multicast ή broadcast αιτήματα.

Όταν ένας UA λάβει απάντηση, αποθηκεύει την πληροφορία της κάθε URL εγγραφής για όσο χρόνο ορίζει είτε το Lifetime είτε ένας URL Authenticator block. Στην περίπτωση που ένα SrvRply στέλνεται με UDP, το URL Entry δεν πρέπει να συμπεριλαμβάνεται εκτός και αν το μήνυμα περιέχεται ολόκληρο χωρίς κατακερματισμό.

5.4.3 Directory Agent Advertisement



Σχήμα 15: Directory Agent Advertisement

Το πεδίο Error Code τίθεται στην τιμή 0 όταν το μήνυμα DAAdvert στέλνεται multicast. Εάν το DAAdvert επιστρέφεται εξαιτίας ενός unicast SrvRqst, π.χ. ένα αίτημα χωρίς να έχει ενεργοποιημένη τη σημαία REQUEST MCAST, ο DA επιστρέφει τα ίδια λάθη που θα επέστρεφε και το SrvRply.

Ο DA μπορεί να περιλάβει μια λίστα των χαρακτηριστικών του στο μήνυμα DAAdvert. Αυτή η λίστα πρέπει να διατηρηθεί σε μικρό μέγεθος καθώς το DAAdvert πρέπει να περιέχεται σε ένα πλαίσιο αν γίνει multicast εκπομπή. Το URL είναι "service:directory-agent://" <addr> of the DA, όπου το <addr> είναι η διεύθυνση του DA. Η <scope-list> του DA δεν πρέπει να είναι κενή.

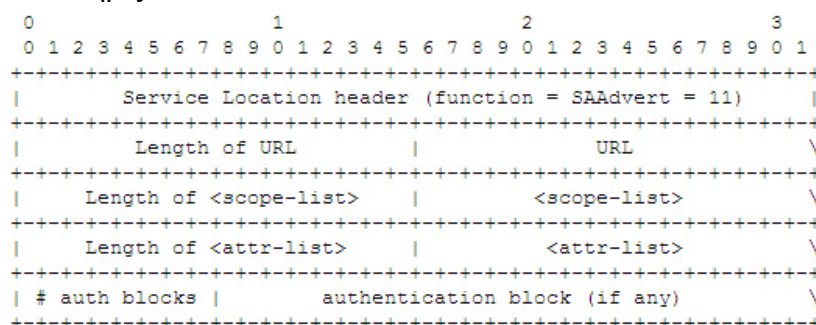
Η SLP SPI List είναι λίστα με τα SPIs τα οποία ο DA είναι ικανός να επικυρώσει. Οι SAs δεν πρέπει να εγγράφουν υπηρεσίες για τα SLP SPIs που δεν είναι στην παραπάνω λίστα. Οι DAs θα απορρίπτουν τις εγγραφές που δεν μπορούν να επικυρώσουν, επιστρέφοντας ένα μήνυμα λάθους AUTHENTICATION_UNKNOWN.

Εάν ένα DAAdvert στέλνεται ως απάντηση σε ένα SrvRqst, το DAAdvert περιέχει μόνο το block πιστοποίησης με το SLP SPI του SrvRqst. Σε περίπτωση που το SrvRqst στέλνεται unicast προς τον DA και περιλαμβάνεται ένα SLP SPI που δεν υποστηρίζεται, ο DA απαντά με ένα μήνυμα DAAdvert που στο πεδίο Error Code περιέχει την τιμή AUTHENTICATION_UNKNOWN error.

Οι UAs πρέπει να σχηματίζονται έχοντας SLP SPIs που θα τους επιτρέπουν να επικυρώνουν τα DA Advertisements. Σε αντίθετη περίπτωση τα διαφημιστικά μηνύματα θα απορριφθούν.

5.4.4 Service Agent Advertisement

Τα SA Advertisements αποστέλλονται στους UAs, μόνο όταν οι τελευταίοι είναι ρητά σχεδιασμένοι να χρησιμοποιούν το User Selectable scopes ώστε να ανακαλύψουν scopes που υποστηρίζουν οι SAs.



Σχήμα 16: Service Agent Advertisement

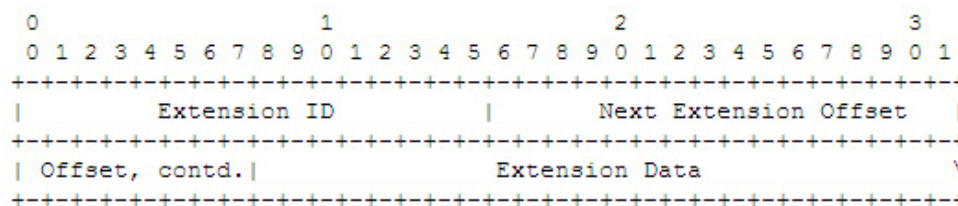
Το SAAdvert μπορεί να περιλαμβάνει μια λίστα με τα χαρακτηριστικά που υποστηρίζει ο SA. Αυτή η λίστα πρέπει να είναι μικρού μήκους ώστε το μήνυμα SAAdvert να μην υπερβαίνει το MTU. Το URL που χρησιμοποιείται είναι το "service:service-agent://" <addr> του SA, όπου <addr> είναι η διεύθυνση του SA. Όπως και στους DAs, η <scope-list> δεν πρέπει να είναι κενή.

Τέλος, το SAAdvert περιέχει ένα SAAdvert Authentication block για κάθε SLP SPI. Αν ο UA μπορεί να επικυρώσει το block πιστοποίησης του SAAdvert αλλά το SAAdvert αποτυγχάνει τελικά να επικυρωθεί, τότε ο UA το απορρίπτει.

5.4.5 Service Location Protocol Extensions

Το SLPv2 παρέχει τη δυνατότητα επεκτάσεων οι οποίες δεν είναι υποχρεωτικές στα ενσύρματα δίκτυα.

Η μορφή ενός Service Location Extension είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 17: Service Location Extension

Τα Extension IDs προσδιορίζονται με τον παρακάτω τρόπο:

- 0x0000-0x3FFF Τυποποιημένο. Προαιρετικό για υλοποίηση. Αγνοείται αν δεν αναγνωρίζεται.
- 0x4000-0x7FFF Τυποποιημένο. Υποχρεωτικό για υλοποίηση. Ένας UA ή SA που λαμβάνει μια απάντηση και έχει ενεργοποιημένη τη συγκεκριμένη επιλογή, αλλά δεν την αναγνωρίζει, πρέπει να απορρίπτει το μήνυμα. Από την άλλη ένας DA ή SA που λαμβάνει ένα αίτημα που περιέχει το συγκεκριμένο πεδίο, , πρέπει να στέλνει μήνυμα λάθους OPTION_NOT_UNDERSTOOD.
- 0x8000-0x8FFF Για ιδιωτική χρήση (μη τυποποιημένο). Προαιρετικό για υλοποίηση. Αγνοείται αν δεν αναγνωρίζεται.
- 0x9000-0xFFFF Δεσμευμένο.

Το πεδίο, μήκους τριών byte, «offset to next extension», δηλώνει τη θέση της επόμενης επέκτασης. Η τιμή offset είναι 0 αν δεν υπάρχουν επιπρόσθετες επεκτάσεις. Εάν το offset είναι 0, το μήκος του πεδίου Extension Data καθορίζεται από το συνολικό μήκος του SLP μηνύματος, όπως αυτό δίνεται στην επικεφαλίδα, αφαιρώντας όμως το offset της τρέχουσας επέκτασης.

5.5 SLP ΣΕ AD HOC ΔΙΚΤΥΑ

Το Service Location Protocol, όπως έχει οριστεί στο RFC2608, δε μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά στα Mobile Ad Hoc Network (MANET). Απαιτούνται τροποποιήσεις, διατηρώντας ωστόσο βασικά στοιχεία του πρωτοκόλλου.

Παρακάτω, θα παρουσιάσουμε το Service Location Protocol για MANET (SLPManet), που είναι το γνωστό SLP προσαρμοσμένο για λειτουργία στα Ad Hoc δίκτυα. Το SLPManet υλοποιεί όλα τα απαραίτητα στοιχεία του SLP Version 2. Όλα τα στοιχεία που δεν υλοποιούνται, περιγράφονται ως προαιρετικά στο RFC και δεν συμπεριελήφθησαν επειδή δεν ταιριάζουν σε περιβάλλοντα κινητών δικτύων. Τα σημεία που έχουν εξαιρεθεί είναι τα ακόλουθα:

- **Directory Agents (DAs):** Οι Directory Agents, όπως έχουμε περιγράψει τη λειτουργία τους, είναι κεντρικές μονάδες αποθήκευσης πληροφοριών των υπηρεσιών του δικτύου. Οι Directory agents υπάρχουν σε δίκτυα LANs ώστε να βελτιώσουν την απόδοση του πρωτοκόλλου για ενσύρματα δίκτυα. Στα MANETs, λόγω της κατανεμημένης τους δομής, δεν υπάρχουν συνήθως κεντρικές οντότητες. Σαν συνέπεια αυτού μόνο active discovery επιτρέπεται και υλοποιείται.
- **Authentication Blocks (Blocks Πιστοποίησης):** Οι ενεργοποιημένοι Agents (SAs και UAs) δεν διαμορφώνονται ώστε να παράγουν blocks πιστοποίησης και αντίστοιχα να επικυρώνουν υπηρεσίες και κόμβους. Συνεπώς στο SLPManet παρακάμπτεται ο έλεγχος υπηρεσιών από εχθρικούς κόμβους, καθώς η ασφάλεια δεν είναι πρωταρχικός στόχος.

- ***Optional SLP messages:*** Μηνύματα όπως τα Attribute Request και Service Type Request δεν υλοποιούνται, γιατί τέτοια επιπρόσθετα στοιχεία αυξάνουν την πολυπλοκότητα και οδηγούν σε μεγαλύτερη κατανάλωση των ενεργειακών πηγών του δικτύου.

Να τονίσουμε ξανά ότι σε άλλες προσαρμογές του SLP για κινητά δίκτυα, τα παραπάνω στοιχεία μπορεί να υλοποιηθούν. Εδώ όμως παρουσιάζουμε μία τροποποίηση του SLP. Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τα βασικά στοιχεία του SLP όπως τα παρουσιάσαμε υποδεικνύοντας τις αλλαγές.

5.5.1 Protocol Overview

Λόγω της απουσίας των DAs, η διαδικασία αποστολής μηνυμάτων αίτησης και απάντησης γίνεται απευθείας μεταξύ των User Agents και των Service Agents. Ο UA εκπέμπει ένα μήνυμα 'Service Request' (SrvRqst) για λογαριασμό του πελάτη, ορίζοντας τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας που αναζητά ο πελάτης. Οι Service Agents που λαμβάνουν μια αίτηση για μια υπηρεσία την οποία διαφημίζουν, εκπέμπουν μόνο προς τον ενδιαφερόμενο κόμβο μία απάντηση που περιέχει την τοποθεσία της εν λόγω υπηρεσίας. Εκτελείται δηλαδή η διαδικασία που περιγράφεται στο Σχήμα 6.

5.5.2 URLs, χρήση των Ports, Επαναμετάδοση SLP μηνυμάτων

Η χρησιμοποίηση των URL Entries στα MANETs γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που περιγράψαμε για τα ενσύρματα δίκτυα. Το ίδιο συμβαίνει και για την χρήση των ports και της UDP ή TCP μεταφοράς δεδομένων. Επίσης, η περίπτωση της επαναμετάδοσης μηνυμάτων λειτουργεί χωρίς παραλλαγές.

5.5.3 SLPManet Μηνύματα

Διατηρώντας την ίδια επικεφαλίδα, τα μηνύματα που χρησιμοποιεί η υλοποίηση SLPManet είναι τρία:

Message Type	Abbreviation	Function-ID
Service Request	SrvRqst	1
Service Reply	SrvRply	2
SA Advertisement	SAAdvert	11

Σχήμα 18: SLP Μηνύματα σε ad hoc δίκτυα

Η μόνη διαφορά σε σχέση με την ανάλυση των μηνυμάτων που έχει ήδη παρουσιαστεί, είναι πως δεν υπάρχουν μηνύματα DAAdvert ως απάντηση σε κάποιο μήνυμα SrvRqst.

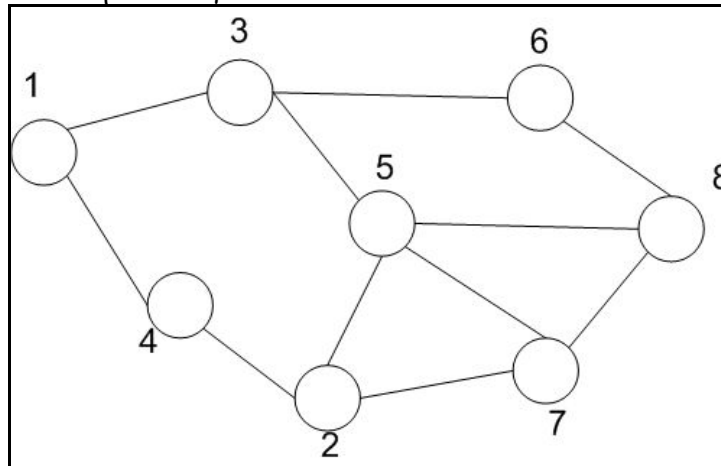
5.6 Βελτιστοποιήσεις λειτουργίας SLP ΓΙΑ AD HOC ΔΙΚΤΥΑ

Ένα από τα βασικά θέματα των MANETs όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η αξιοποίηση των διαθέσιμων ενεργειακών πηγών του δικτύου. Το SLP λειτουργεί

βάσει της πιο γρήγορης απάντησης SrvRply που λαμβάνει. Θεωρείται ότι η πιο γρήγορη απάντηση λαμβάνεται από τον πιο κοντινό πάροχο της υπηρεσίας.

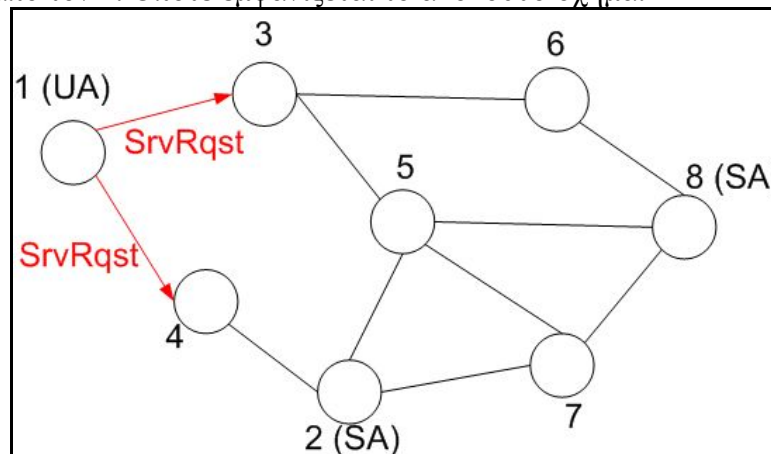
Με αυτό τον τρόπο όμως δεν λαμβάνεται υπόψη η υπολειπόμενη ενέργεια του εξυπηρετητή. Κατά συνέπεια, επιβαρύνεται η παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας από το δίκτυο. Άλλωστε σε περίπτωση που ο πιο κοντινός εξυπηρετητής δεν είναι ο πιο δυνατός ενεργειακά κόμβος υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ο κόμβος-πάροχος να εξαντληθεί ενεργειακά, πριν καν προλάβει να εξυπηρετήσει τον κόμβο-πελάτη.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα δίκτυο MANET το οποίο αποτελείται από 8 κόμβους και έστω ότι ζητείται μια υπηρεσία από τον κόμβο 1, την οποία παρέχουν οι κόμβοι 8 και 2 με την ακόλουθη τοπολογία:



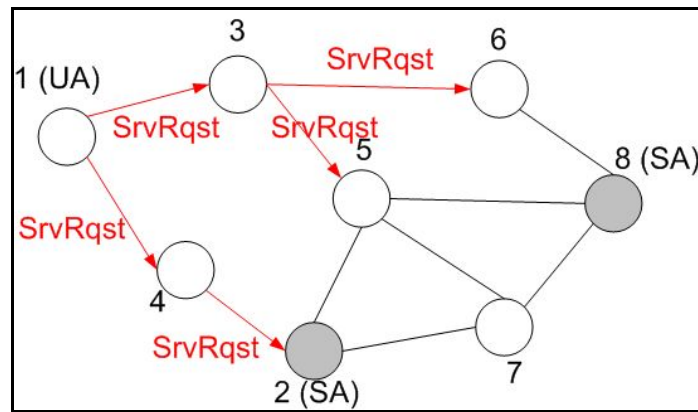
Σχήμα 19: Σενάριο SLP 8 κόμβων

Ο κόμβος 1 θα στείλει ένα SrvRqst στους κόμβους 3 και 4 που ανήκουν στο line of sight, δηλαδή έχει οπτική επαφή και βρίσκονται εντός εμβέλειας αποστολής δεδομένων από τον 1. Οπότε εμφανίζεται το ακόλουθο σχήμα:



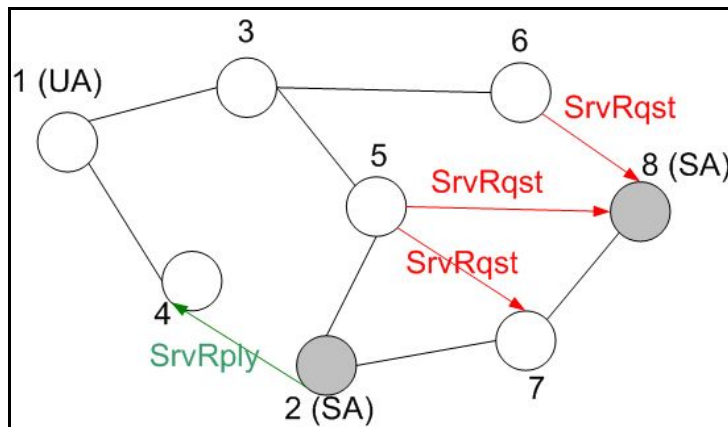
Σχήμα 20: Αποστολή SrvRqst

Οι κόμβοι 3 και 4 αφού ελέγξουν ότι δεν διαθέτουν την αιτούμενη υπηρεσία επαναπροωθούν το SrvRqst.



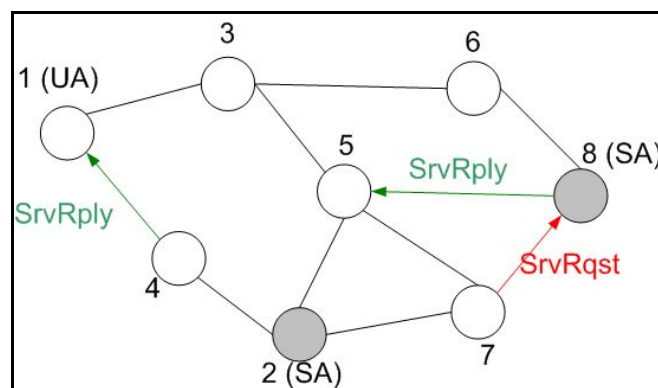
Σχήμα 21: Προώθηση του SrvRqst από τους κόμβους 3 και 4

Ο κόμβος 2 ταιριάζει την αιτούμενη υπηρεσία με αυτή που παρέχει ο ίδιος. Συνεπώς δημιουργεί ένα SrvRply μήνυμα προς τον κόμβο 1. Την ίδια χρονική στιγμή που αποστέλλει ο κόμβος 2 το reply του οι κόμβοι 5 και 6 επαναπροωθούν το SrvRqst προς τους γειτονικούς τους κόμβους.



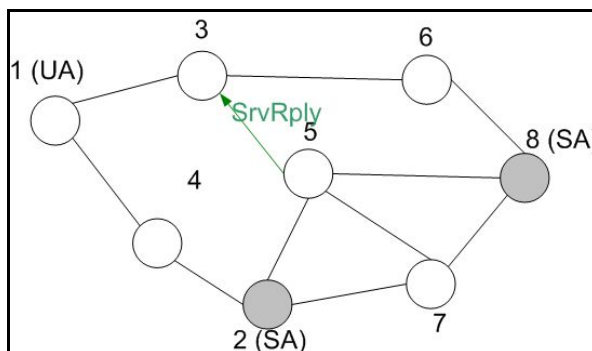
Σχήμα 22: Επαναπροώθηση και δημιουργία SrvRply από τον service agent κόμβο 2

Ο κόμβος 8 σε αυτό το στάδιο θα λάβει 2 service requests με το ίδιο xid από τους κόμβους 5 και 6. Θα απαντήσει σε όποιο από τα δύο requests λάβει πιο σύντομα και στη συνέχεια θα απορρίψει κάθε άλλο request με το ίδιο xid. Ας υποθέσουμε ότι πρώτα φτάνει το request από τον κόμβο 5. Σε αυτό το στάδιο θα δημιουργηθεί το SrvRply από τον κόμβο 8, ενώ θα φτάσει και στον κόμβο 1 το SrvRply από τον κόμβο 2.



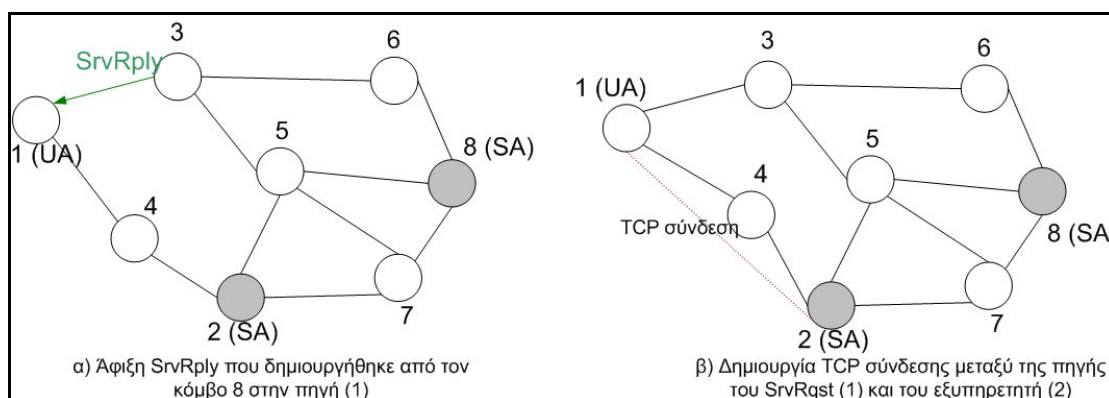
Σχήμα 23: Άφιξη του SrvRply στην πηγή του SrvRqst και δημιουργία του νέου SrvRply από τον κόμβο 8

Ο 8 θα απορρίψει το νέο SrvRqst που λαμβάνει από τον 7, ενώ το SrvRply θα προωθηθεί από τον 5 στον 3 προκειμένου να φτάσει στον 1.



Σχήμα 24: Προώθηση SrvRply από τον κόμβο 5 προς τον 3

Στο επόμενο βήμα ο user agent 1 θα λάβει το SrvRply από τον κόμβο 8 μέσω του 3 και εν συνεχεία θα ανοίξει TCP σύνδεση με τον κόμβο 2 SA από τον οποίο έλαβε το πιο γρήγορο SrvRply θεωρώντας ότι είναι ο πιο κοντινός server.



Σχήμα 25: α) Απάντηση SrvRply από τον κόμβο 8 προς τον 1. β) Δημιουργία TCP σύνδεσης μεταξύ της πηγής SrvRqst και του πλησιέστερου εξυπηρετητή (2)

Είναι λογικό ότι ο πιο κοντινός κόμβος – εξυπηρετητής θα επιλεγεί βάσει της λειτουργίας του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου. Αν όμως ο service agent 2 έχει χαμηλότερα ενεργειακά αποθέματα από τον 8, τότε η δημιουργία σύνδεσης TCP με τον 2, λόγω απόστασης δεν εγγυάται την επιτυχημένη παραλαβή της υπηρεσίας από τον user agent 1. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση ενεργειακής εξάντλησης του κόμβου 2, το SLP θα προβεί σε επανάληψη της διαδικασίας αναζήτησης διαθέσιμου service agent, καθυστερώντας την εξυπηρέτηση του user agent και φορτώνοντας το δίκτυο με επιπρόσθετη ανταλλαγή μηνυμάτων.

Για αυτό το λόγο, είναι θεμιτό η επιλογή του εξυπηρετητή να μην βασίζεται αποκλειστικά στην απόστασή του από τον πελάτη. Επιπλέον κριτήριο θα είναι η υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο, θα επιλέγεται ο πιο ισχυρός ενεργειακά πάροχος που θα εγγυάται την ομαλή μεταφορά – χρήση της παρεχόμενης υπηρεσίας.

5.6.1 Προτεινόμενη Βελτιστοποίηση στο SLP

Το πρωτόκολλο SLPv2 δίνει τη δυνατότητα επέκτασης στη δομή του πακέτου SLP. Όπως παρατηρούμε από την επικεφαλίδα SLP (Πίνακας 34) υπάρχουν συγκεκριμένα πεδία που επιτρέπουν να εισαχθεί επιπρόσθετη πληροφορία.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
Version								Function-ID								Length															
Length cont.								0	F	D	Reserved								Next Extension Offset												
Next Extension Offset cont.												XID																			
Language Tag Length												Language Tag																			
Protocol Data																															
Protocol Data																															
Extension ID (0x8001)																Next Extension Offset															
Next Ext. Off. Cont.								Extension Data																							
								Request/Reply								Byte 1								Byte 2							

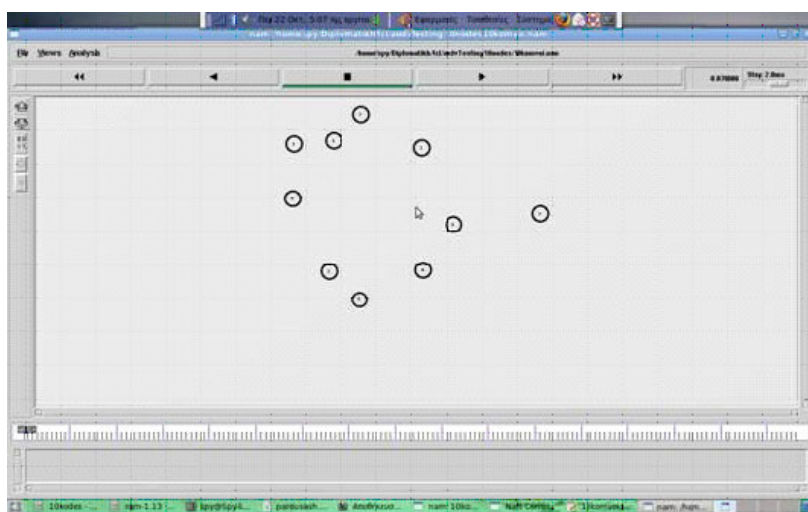
Πίνακας 34: Δομή πακέτου SLP

Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν τον έλεγχο της υπολειπόμενης ενέργειας της πηγής του SrvRqst και του προορισμού. Στο μήνυμα SrvRqst προστέθηκε ένα πεδίο που λάμβανε υπόψη του την τιμή της υπολειπόμενης ενέργειας του user agent. Από την άλλη στην απάντηση service replay (SrvRply) εμπεριέχεται ένα πεδίο με την υπολειπόμενη ενέργεια του service agent. Στόχος των συγκεκριμένων αλλαγών είναι να παρακολουθείται η ενεργειακή κατάσταση των δύο κόμβων. Όταν συλλεχθούν από τον user agent οι απαντήσεις από τους διαθέσιμους service agents, η πηγή θα έχει και μια κατάσταση με την υπολειπόμενη ενέργεια των εξυπηρετητών για τη συγκεκριμένη υπηρεσία.

Σε αυτό το σημείο ο κόμβος-πηγή δεν θα επιλέξει βάσει του πιο σύντομου SrvRply που έλαβε, αλλά βάσει του μεγαλύτερου ενεργειακού αποθέματος μεταξύ των διαθέσιμων εξυπηρετητών. Εν συνεχεία, θα γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο υλοποιήσεων, δηλαδή της απλής μορφής SLP που η επιλογή του server γίνεται βάσει απόστασης και του ενεργειακού SLP ο οποίος για χάρη συντομίας θα αποκαλείται σαν ESLP (Energy SLP).

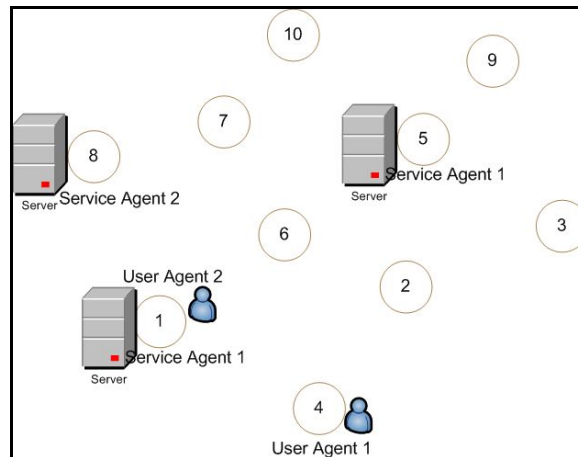
5.6.2 Σενάρια Δοκιμής των αλγορίθμων

Σε αυτό το σημείο θα αναλυθούν τα σενάρια στα οποία δοκιμάστηκαν οι δύο εκδόσεις του SLPv2. Το πρώτο σενάριο αφορά ένα δίκτυο που αποτελείται από 10 κόμβους, ενώ η τοπολογία τους έχει την ακόλουθη μορφή όπως προέκυψε από το εργαλείο nam του ns-2.30.



Εικόνα 44: Τοπολογία σεναρίου 10 κόμβων για εφαρμογή SLP

Υποθέτουμε ότι ο κόμβος 4 είναι ο user agent, δηλαδή ο πελάτης που ζητάει την υπηρεσία 1. Πάροχοι της υπηρεσίας 1, δηλαδή service agents, είναι οι κόμβοι 5 και 1. Ο 5 είναι ταυτόχρονα και user agent για την υπηρεσία 2, της οποίας service agent θεωρείται ο κόμβος 8. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η θέση των κόμβων στο χώρο προκειμένου να γίνει κατανοητή η απόσταση που υπάρχει μεταξύ τους.



Σχήμα 26: Τοπολογία και ρόλοι κόμβων

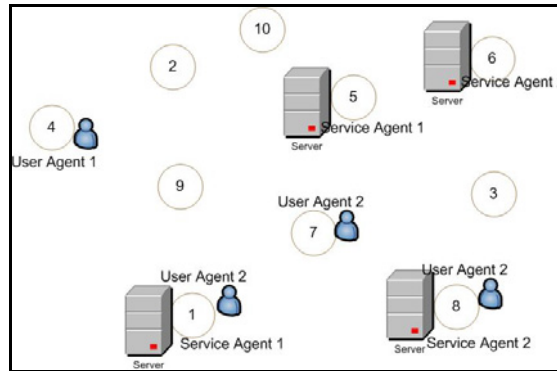
Παρατηρούμε ότι τόσο ο κόμβος 8 όσο και ο κόμβος 4 που αποτελούν user agents είναι γειτονικοί κόμβοι των user agents 4 και 8. Βάσει της λειτουργίας του SLPv2 και οι δύο user agents θα επιλέξουν τον πλησιέστερο εξυπηρετητή, δηλαδή τον 1. Βάσει όμως της προτεινόμενης επέκτασης η επιλογή θα στηριχθεί σε κάθε περίπτωση, δηλαδή και για τον 4 και για τον 8 στις υπολειπόμενες ενέργειες των εξυπηρετητών. Στην ακόλουθη παράγραφο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Στο δεύτερο σενάριο που θα δοκιμαστεί για την ίδια τοπολογία θα συμμετέχουν περισσότεροι κόμβοι στις διαδικασίες ανακάλυψης και παράδοσης υπηρεσίας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι θα υπάρχουν περισσότεροι user και service agents και θα αυξηθεί ο αριθμός των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων. Έτσι και η υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων θα μειωθεί.

Για το δεύτερο σενάριο, οι ρόλοι που ανατίθενται στους κόμβους είναι οι ακόλουθοι:

- ο κόμβος 4 είναι user agent για την υπηρεσία 1
- ο κόμβος 1 είναι service agent για την υπηρεσία 1 και user agent για την υπηρεσία 2
- ο κόμβος 5 είναι service agent για την υπηρεσία 1
- ο κόμβος 6 είναι service agent για την υπηρεσία 2
- ο κόμβος 7 είναι user agent για την υπηρεσία 2
- ο κόμβος 8 είναι service agent για την υπηρεσία 2 και ταυτόχρονα user agent για την υπηρεσία 1

Η τοπολογία του δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 44, ενώ το σχήμα που αναπαριστά ακριβώς τους προαναφερθέντες ρόλους είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 27: Τοπολογία και ρόλοι κόμβων

5.6.3 Προσομοιώσεις του σεναρίου

Να σημειωθεί ότι για την προσομοίωση του προαναφερθέντος σεναρίου χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον ns-2.30. Το πρωτόκολλο SLPv2 που χρησιμοποιήθηκε είχε υλοποιηθεί από το πανεπιστήμιο Carleton και υπάρχει διαθέσιμο για ερευνητικούς σκοπούς στην ιστοσελίδα (<http://www.sce.carleton.ca/wmc/code.html>). Η έκδοση που υλοποιήθηκε και παρουσιάστηκε από το συγκεκριμένο πανεπιστήμιο είχε προσαρμοστεί στην έκδοση του ns -2.27.

Το βασικό κριτήριο, βάσει του οποίου συγκρίθηκαν οι δύο υλοποιήσεις του SLP ήταν η υπολειπόμενη ενέργεια του εξυπηρετητή μετά το πέρας της σύνδεσης για τη μεταφορά της υπηρεσίας. Θα παρουσιαστούν όλες οι ενέργειες των κόμβων που αποτελούν service agents, ενώ οι συγκρίσεις θα γίνουν θεωρώντας σαν υποκείμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης και τα 3 που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το σενάριο tcl που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές του πρωτοκόλλου SLPv2 και της επέκτασης του είναι το ακόλουθο:

```
# Τυπικές παράμετροι
set ns_ [new Simulator]

set val(chan) Channel/WirelessChannel
set val(prop) Propagation/TwoRayGround
set val(netif) Phy/WirelessPhy
set val(mac) Mac/802_11
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue
set val(ll) LL
set val(ant) Antenna/OmniAntenna
set val(ifqlen) 50 ;# max packet in ifq
set val(x) 1000
set val(y) 1000
set val(nn) 10
set val(sn) 2 ;# οι διαθέσιμοι service agents
set val(dup) 5
set val(seed) 1
set val(a_sn) [expr $val(sn)-$val(dup)] ;# αφαίρεση των
                                         διπλοεγγεγραμμένων
                                         service agents
```



```

set val(adhocRouting) AODV
set val(SLPport) 18 ;# port για την υπηρεσία
set val(exp_avg) 10
set val(stop) 1000
set val(lifetime) 5
set val(rxPower) 10
set val(txPower) 100
set val(energymodel) EnergyModel
set val(initialenergy) 100
set val(sleeppower) 0.
set val(tp) 0.5
set val(tt) 0.05
set val(ip) 0.5

```

Στη συνέχεια γίνεται ο καθορισμός των στοιχείων των κόμβων και δίνεται η θέση τους στο χώρο 1000x1000 m² που έχει καθοριστεί:

```

# Global node setting

$ns_ node-config -adhocRouting $val(adhocRouting) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -channelType $val(chan) \
    -energyModel $val(energymodel) \
    -idlePower $val(ip) \
    -rxPower $val(rxPower) \
    -txPower $val(txPower) \
    -sleepPower $val(sleeppower) \
    -transitionPower $val(tp) \
    -transitionTime $val(tt) \
    -initialEnergy $val(initialenergy) \
    -topoInstance $topo \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace OFF \
    -macTrace OFF

# Create the specified number of nodes [$val(nn)]

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0 ;# disable random motion
}

```

```
$ns_ at 0.00001 "$node_(0) setdest 10 500 30000.0"  
$ns_ at 0.00001 "$node_(1) setdest 100 215 30000.0"  
$ns_ at 0.00001 "$node_(2) setdest 150 340 30000.0"  
$ns_ at 0.00001 "$node_(3) setdest 360 680 30000.0"  
$ns_ at 0.00001 "$node_(4) setdest 360 320 30000.0"  
$ns_ at 0.00001 "$node_(5) setdest 470 500 30000.0"  
$ns_ at 0.00001 "$node_(6) setdest 225 200 30000.0"  
$ns_ at 0.00001 "$node_(7) setdest 225 800 30000.0"  
$ns_ at 0.00001 "$node_(8) setdest 650 500 30000.0"  
$ns_ at 0.00001 "$node_(9) setdest 1 570 30000.0"
```

Στο επόμενο βήμα καθορίζονται οι διαθέσιμοι service agent και οι user agent του δικτύου:

```
#SLP server  
  
set udp_sa [new Agent/UDP/UDPsip]  
$ns_ attach-agent $node_() $udp_sa  
$node_() attach $udp_sa 18  
set slpsa_ [new Application/SLPsa]  
$slpsa_ attach-agent $udp_sa  
$ns_ at 0.0 "$slpsa_ start"
```

Στη θέση του \$node_() θα εισαχθεί ο αριθμός του κόμβου που αποτελεί service agent, ενώ το udp_sa ανάλογα με τον αριθμό του service agent θα αυξάνεται, δηλαδή ο δεύτερος service agent θα αναφέρεται σαν udp_sa2. Στην τελευταία γραμμή επιβάλλουμε την εκκίνηση του service agent στη χρονική στιγμή 0 sec. Στη συνέχεια αντίστοιχα καθορίζονται οι user agents του δικτύου:

```
#SLP client  
set udp_ua_ [new Agent/UDP/UDPsip]  
$ns_ attach-agent $node_(4) $udp_ua_  
$node_(4) attach $udp_ua_ 18  
set slpua_ [new Application/SLPua]  
$slpua_ set maxSearch 4  
$slpua_ set dstport 18  
$slpua_ attach-agent $udp_ua_  
$slpua_ add-scope DEFAULT  
$ns_ at 10.0 "$slpua_ start"
```

Στο επόμενο βήμα θα πρέπει να προσαρτήσουμε στους service agents μια υπηρεσία την οποία εξυπηρετούν και παραδίδουν μετά από αίτημα του user agent:

```
#Εισαγωγή υπηρεσίας  
$slpsa_ add-service service:ServiceNum1://134.117.61.1 $val(stop) $val(lifetime)
```


Αν υπάρχουν δύο υπηρεσίες που εξυπηρετούνται από τους διαθέσιμους service agents τότε η εισαγωγή υπηρεσίας θα έχει την ακόλουθη μορφή:

```
#Εισαγωγή υπηρεσίας
$slpsa_ add-service service:ServiceNum1://134.117.61.1 $val(stop) $val(lifetime)
$slpsa2_ add-service service:ServiceNum2://134.117.61.2 $val(stop) $val(lifetime)
```

Εν συνεχεία θα καθοριστεί η χρονική στιγμή στην οποία οι κόμβοι που συμμετέχουν με συγκεκριμένο ρόλο (user – service agents) θα γίνουν reset.

```
$ns_ at 15 "$node_ () reset";
```

Σε αυτό το σημείο θα καθοριστεί το χρονικό σημείο όπου οι user agents θα κάνουν αιτήσεις προς τους αντίστοιχους service agents ενώ σε μεταγενέστερο στάδιο αποστέλλεται το αίτημα και γίνεται η σύνδεση.

```
#Καθορισμός χρονικής στιγμής που οι πελάτες πραγματοποιούν τα αιτήματά τους

set simultaneous xx

$ns_ at $simultaneous "$slpua_ rqst-service service:ServiceNum1://134.117.61.1
$slpsa_ "
```

5.6.4 Προσομοίωση του πρώτου σεναρίου

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου που αναφέραμε προτύτερα. Θα χρησιμοποιηθεί σε πρώτο στάδιο το πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV για τη δοκιμή του σεναρίου.

Αφού προσομοιωθεί το σενάριο θα εμφανιστεί το ακόλουθο:

```
Loading connection pattern...
Starting Simulation...
num_nodes is set 10
n5: UA Sending Service Request (xid=1) to 1:18
n5: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n5: UA Sending Service Request (xid=2) to 5:18
n5: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n5: <----UDP agent receiving message from 5:18
channel.cc:sendUp - Calc highestAntennaZ_ and distCST_
highestAntennaZ_ = 1.5, distCST_ = 550.0
n1: <----UDP agent receiving message from 5:18
n5: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n5: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n5: <----UDP agent receiving message from 5:18
n1: <----UDP agent receiving message from 5:18
n5: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n5: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n5: <----UDP agent receiving message from 5:18
n1: <----UDP agent receiving message from 5:18
n5: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n5: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n5: <----UDP agent receiving message from 5:18
n1: <----UDP agent receiving message from 5:18
n4: UA Sending Service Request (xid=3) to 1:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n4: UA Sending Service Request (xid=4) to 5:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n4: UA Sending Service Request (xid=5) to 1:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n4: UA Sending Service Request (xid=6) to 5:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n5: <----UDP agent receiving message from 4:18
n5: <----UDP agent receiving message from 4:18
n1: <----UDP agent receiving message from 4:18
n1: <----UDP agent receiving message from 4:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n1: <----UDP agent receiving message from 4:18
n5: <----UDP agent receiving message from 4:18
n1: <----UDP agent receiving message from 4:18
n5: <----UDP agent receiving message from 4:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n5: <----UDP agent receiving message from 4:18
n1: <----UDP agent receiving message from 4:18
n1: <----UDP agent receiving message from 4:18
```

```
n5: <----UDP agent receiving message from 4:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 1:18
n4: ---->UDP agent sending 67 bytes message to 5:18
n5: <----UDP agent receiving message from 4:18
n1: <----UDP agent receiving message from 4:18
n1: <----UDP agent receiving message from 4:18
n5: <----UDP agent receiving message from 4:18
TELOS
```

Πίνακας 35: Ανταλλαγή μηνυμάτων κατά την προσομοίωση

Όπως παρατηρείται γίνεται ένας αριθμός από συνδέσεις που για τον κάθε user agent φτάνει στις 4, καθώς το πεδίο maxsearch έχει καθοριστεί σε 4. Στο αρχείο tr που προκύπτει εμφανίζονται και τα αντίστοιχα replies από τους service agents και μάλιστα έχει την ακόλουθη μορφή:

```
s 76.000000000 _5_ 63.240014
r 76.007597565 _1_ 61.282933
s 100.000000000 _4_ 56.426450
s 100.000000000 _4_ 56.426450
s 100.000000000 _4_ 56.426450
r 100.007910922 _5_ 48.571544
r 100.025413220 _5_ 48.377418
r 100.033258396 _1_ 48.569946
r 100.038230396 _1_ 48.473372
s 114.000000000 _4_ 42.863132
r 114.004584518 _5_ 40.716752
r 114.009232286 _1_ 40.877418
```

Πίνακας 36: Δομή tr μηνύματος

Η χρονική στιγμή 70 που εμφανίζεται το πρώτο send αναζήτησης της υπηρεσίας έχει καθοριστεί από την τιμή του πεδίου simultaneous της προσομοίωσης.

Παρακολουθώντας την υπολειπόμενη ενέργεια των service agents για την υπηρεσία 1 την οποία ζητάει ο κόμβος 4 προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα για τις χρονικές στιγμές 80, 95, 105 και 120.

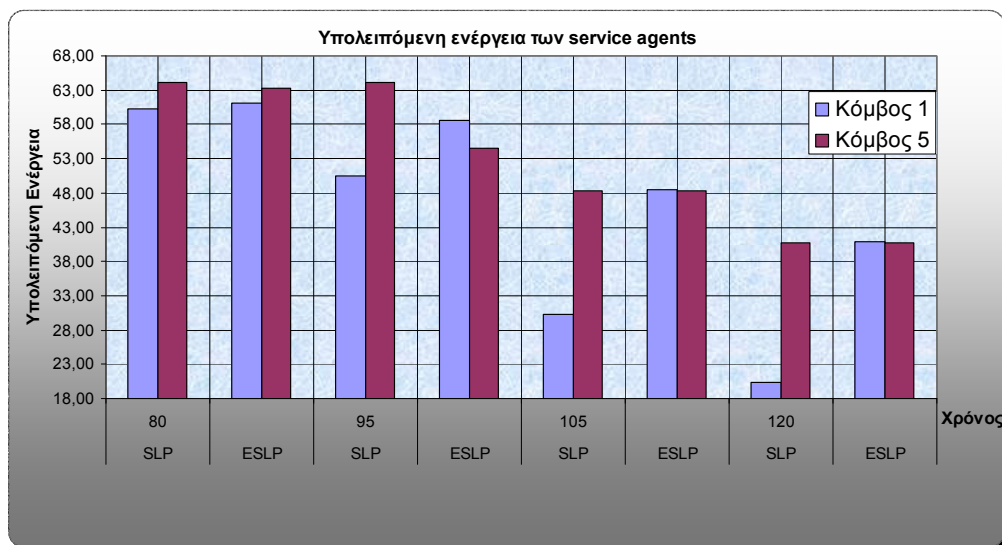
Χρόνος	Υπολειπόμενη ενέργεια σε joules των service agents			
	SLP		ESLP	
	Κόμβος 1	Κόμβος 5	Κόμβος 1	Κόμβος 5
80	60.250	64.123	61.156	63.242
95	50.560	64.123	58.570	54.572
105	30.324	48.378	48.473	48.378
120	20.345	40.717	40.877	40.717

Πίνακας 37: Υπολειπόμενες ενέργειες των service agents 1 και 5

Σε αυτό το σημείο είναι ξεκάθαρο ότι η διάρκεια ζωής των κόμβων που είναι service agents για την υπηρεσία 1 είναι πολύ μικρότερη στην περίπτωση του SLP από ότι στην περίπτωση του ESLP. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο κόμβος 4 θα χρειαστεί μετά από κάποια χρονική στιγμή να ξαναξεκινήσει τη διαδικασία ανακάλυψης

ενεργού service agent, που θα είναι ο 5. Σε αυτό το σημείο βέβαια, ο κόμβος 5 δεν θα έχει τα ίδια αποθέματα ενέργειας που σημαίνει ότι μπορεί να μην είναι σε θέση να εξυπηρετήσει τον user agent. Με την προτεινόμενη ενεργειακή επέκταση παρατηρούμε ότι ο user agent εξυπηρετείται από τον κυρίαρχο ενεργειακά service agent, ο οποίος θα είναι ενεργός για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, διατηρώντας ενεργή και την TCP σύνδεση. Η διάρκεια ζωής της σύνδεσης στην περίπτωση του SLP είναι περίπου 125 δευτερόλεπτα ενώ με τον ESLP περίπου 140 δευτερόλεπτα.

Στο ακόλουθο διάγραμμα γίνεται αναπαράσταση με γράφημα των προαναφερθεισών τιμών. Ο άξονας x αναφέρεται στο χρόνο σε sec και ο άξονας y στην υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων 1 και 5 (service agents) σε joules.



Εικόνα 45: Γράφημα με συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ SLP και ESLP

5.7 Αποτελέσματα SLP και ESLP

Στις ακόλουθες υποενότητες παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα δύο πρωτόκολλα, για το δεύτερο σενάριο που αναλύσαμε και για διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Σε αυτό το σενάριο οι service agents είναι οι κόμβοι 1, 5, 6 και 8.

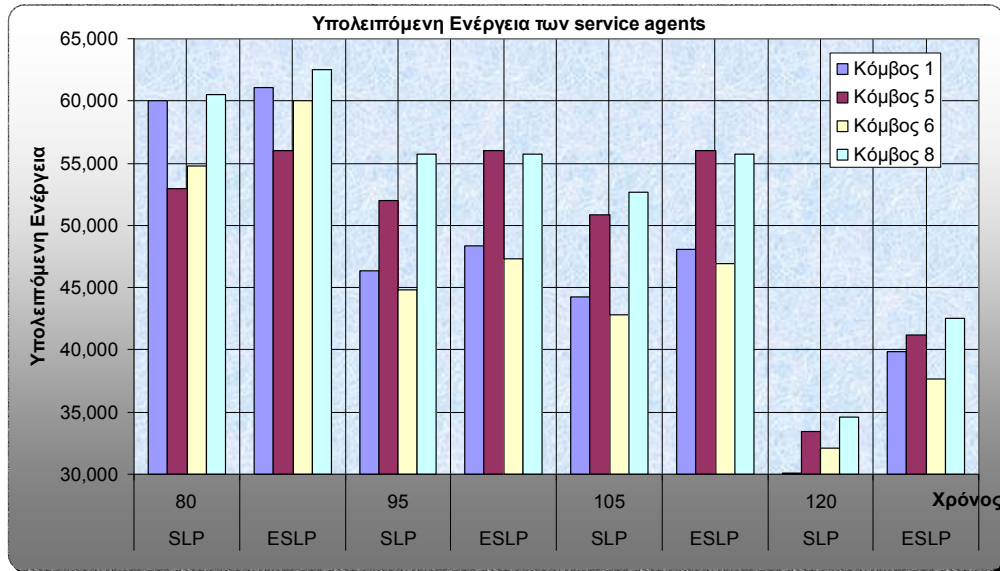
5.7.1 Σύγκριση SLP και ESLP χρησιμοποιώντας τον παραδοσιακό AODV

Στον Πίνακα 38 εμφανίζονται τα ενεργειακά αποτελέσματα για τον κάθε κόμβο που αποτελεί service agent σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές βαθμίδες, χρησιμοποιώντας την παραδοσιακή μορφή του πρωτοκόλλου δρομολόγησης AODV. Στο γράφημα οπτικοποιούμε τις συγκεκριμένες διαφορές.

Χρόνος	Υπολειπόμενη ενέργεια σε Joules των service agents							
	SLP				ESLP			
	Κόμβος 1	Κόμβος 5	Κόμβος 6	Κόμβος 8	Κόμβος 1	Κόμβος 5	Κόμβος 6	Κόμβος 8
80	60.032	52.976	54.761	60.476	61.051	55.975	59.989	62.475
95	46.397	51.976	44.812	55.712	48.34	55.976	47.304	55.712
105	44.292	50.844	42.856	52.701	48.035	55.976	46.893	55.712
120	30.143	33.416	32.145	34.581	39.888	41.194	37.694	42.499

Πίνακας 38: Υπολειπόμενες ενέργειες των service agents 1, 5, 6 και 8

Όπως παρουσιάζεται και στο γράφημα που ακολουθεί ο βελτιστοποιημένος αλγόριθμος διαχειρίζεται καλύτερα τα ενεργειακά αποθέματα των service agents. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της ζωής των εξυπηρετητών, παρέχοντας ταυτόχρονα καλύτερη ποιότητα στις διαθέσιμες υπηρεσίες. Αυτό συμπεραίνεται και από το γεγονός ότι ο user agent δεν θα αναγκαστεί να αναζητήσει σύντομα νέο εξυπηρετητή ενώ για περιπτώσεις υπηρεσιών που απαιτούν μεγάλη διάρκεια ενεργής σύνδεσης, π.χ. μεταφορά video με την επέκταση του SLP, θα μπορούν να εξυπηρετηθούν οι χρήστες – πελάτες.



Εικόνα 46: Γράφημα με συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ SLP και ESLP για το σενάριο με 5 διαθέσιμους service agents

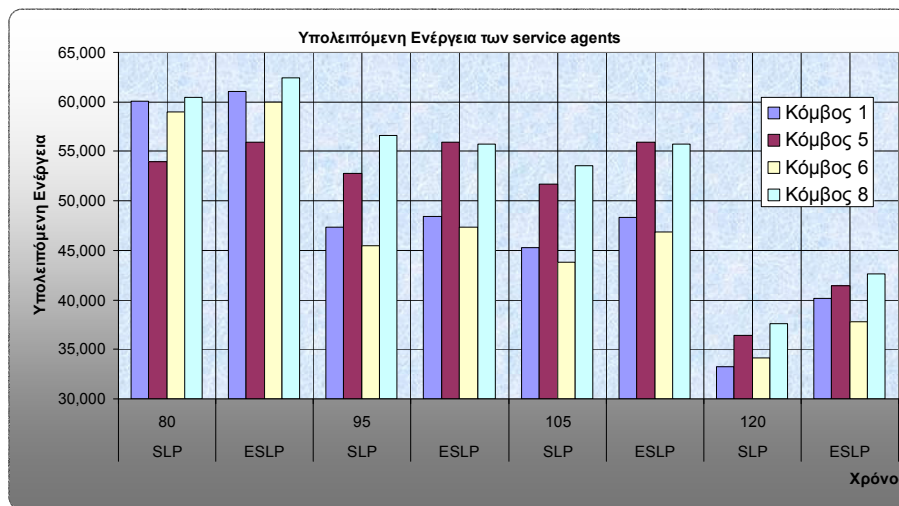
5.7.2 Σύγκριση SLP και ESLP χρησιμοποιώντας τον EAODV

Στον Πίνακα 39 εμφανίζονται τα ενεργειακά αποτελέσματα για τον κάθε κόμβο που αποτελεί service agent σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές βαθμίδες, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο δρομολόγησης EAODV. Στο γράφημα οπτικοποιούμε τις συγκεκριμένες διαφορές.

Χρόνος	Υπολειπόμενη ενέργεια σε Joules των service agents							
	SLP				ESLP			
	Κόμβος 1	Κόμβος 5	Κόμβος 6	Κόμβος 8	Κόμβος 1	Κόμβος 5	Κόμβος 6	Κόμβος 8
80	60.051	53.980	58.990	60.481	61.051	55.976	59.989	62.476
95	47.380	52.800	45.496	56.602	48.397	55.976	47.304	55.712
105	45.329	51.678	43.756	53.564	48.292	55.976	46.856	55.712
120	33.245	36.416	34.145	37.581	40.124	41.415	37.815	42.581

Πίνακας 39: Υπολειπόμενες ενέργειες των service agents 1, 5, 6 και 8

Παρατηρείται ότι ο ESLP είναι βελτιστοποιημένος σε σχέση με τον SLP. Επιπρόσθετα, και οι δύο αλγόριθμοι ανακάλυψης υπηρεσίας εμφανίζονται ενεργειακά αποδοτικότεροι όταν ο υποκείμενος αλγόριθμος δρομολόγησης είναι ο EAODV. Αυτό είναι συνάρτηση της διαδικασίας που λαμβάνει χώρα κατά την εύρεση διαδρομών με χρήση του EAODV. Άλλωστε το συγκεκριμένο πρωτόκολλο βελτιώνει τη διαχείριση της υπολειπόμενης ενέργειας του δικτύου, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής των κόμβων και, κατά συνέπεια, μεγιστοποιώντας τη ζωή και των service agents.



Εικόνα 47: Γράφημα με συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ SLP και ESLP για το σενάριο με 5 διαθέσιμους service agents

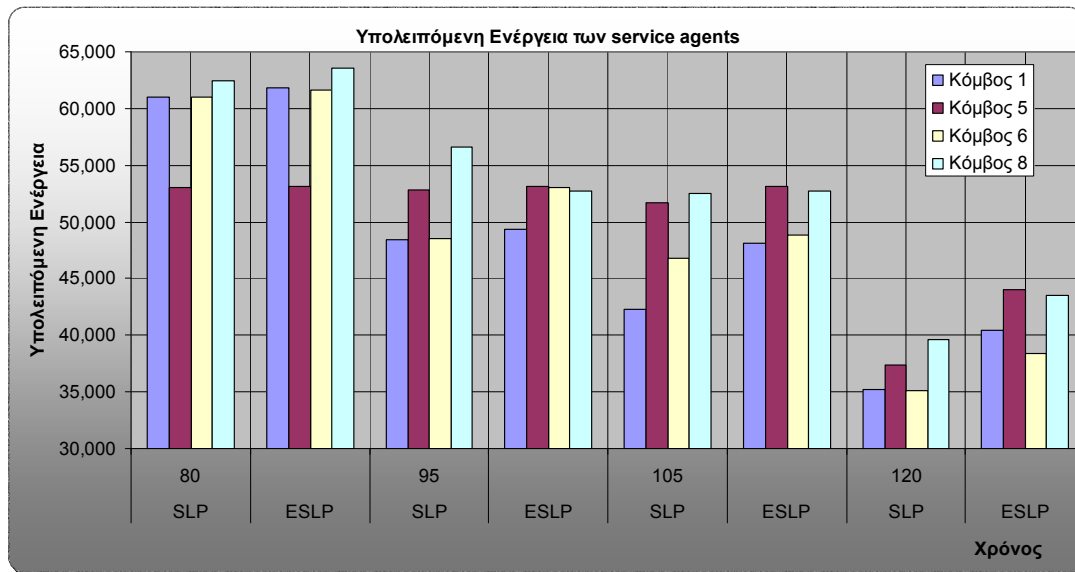
5.7.3 Σύγκριση SLP και ESLP χρησιμοποιώντας τον EAODV_hops

Στον Πίνακα 40 εμφανίζονται τα ενεργειακά αποτελέσματα για τον κάθε κόμβο που αποτελεί service agent σε τρεις διαφορετικές χρονικές βαθμίδες, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο δρομολόγησης EAODV_hops. Στο γράφημα οπτικοποιούμε τις συγκεκριμένες διαφορές.

Χρόνος	Υπολειπόμενη ενέργεια σε Joules των service agents							
	SLP				ESLP			
	Κόμβος 1	Κόμβος 5	Κόμβος 6	Κόμβος 8	Κόμβος 1	Κόμβος 5	Κόμβος 6	Κόμβος 8
80	61.051	52.980	60.990	62.481	61.797	53.1297	61.66	63.584
95	48.380	52.800	48.496	56.602	49.372	53.1297	53.048	52.688
105	42.329	51.678	46.756	52.564	48.138	53.129	48.84	52.6879
120	35.245	37.416	35.145	39.581	40.44	43.976	38.435	43.553

Πίνακας 40: Υπολειπόμενες ενέργειες των service agents 1, 5, 6 και 8

Ο ESLP είναι και πάλι αποδοτικότερος του SLP. Το βασικό όμως σημείο είναι ότι σε σχέση με τις προηγούμενες δύο συγκρίσεις τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αποδεικνύουν ότι η διαχείριση των ενεργειακών πόρων στο συνδυασμό αλγορίθμου δρομολόγησης EAODV_hops με πρωτόκολλο ESLP είναι η πλέον βέλτιστη και αποδοτική. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται και στο ακόλουθο γράφημα.



Εικόνα 48: Γράφημα με συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ SLP και ESLP για το σενάριο με 5 διαθέσιμους service agents

5.8 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, όπως αναλύθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους η επέκταση του SLP βελτιστοποιεί ενεργειακά τη διαδικασία ανακάλυψης και παράδοσης υπηρεσιών. Αναλύοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν γίνεται κατανοητό ότι η επιλογή του κυρίαρχου ενεργειακά server, βελτιώνει τη διαχείριση των ενεργειακών πόρων του δικτύου.

Η επιλογή service agent γίνεται βάσει της υπολειπόμενης ενέργειας του και όχι βάσει της απόστασης από τον user agent. Παρατηρείται ότι όταν το πρωτόκολλο ESLP συνδυάζεται με έναν από τους αλγορίθμους δρομολόγησης EAODV και EAODV_hops βελτιώνεται επιπρόσθετα η ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Αυξάνεται η διάρκεια ζωής των εξυπηρετητών με αποτέλεσμα να βελτιώνεται και η ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας. Μειώνεται η ανάγκη επανα-ανακάλυψης της υπηρεσίας, ειδικότερα για περιπτώσεις διακοπής της σύνδεσης μεταξύ user και service agent, λόγω εξάντλησης του server.

Μελλοντικά, σαν συνέχεια της παρούσας μελέτης, θα μπορούσε να επεκταθεί το ESLP, ώστε να επιλέγει με κριτήριο είτε την υπολειπόμενη ενέργεια του server είτε την απόστασή του από τον user, ανάλογα με την κάθε περίπτωση.

6 Μελλοντική Δουλειά

Από την παρούσα διατριβή γίνεται ξεκάθαρη η αναγκαιότητα βέλτιστης διαχείρισης των ενεργειακών αποθεμάτων σε ένα MANET, προκειμένου να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Μέσα από την προτεινόμενη αρχιτεκτονική σε αρκετές περιπτώσεις ειδικότερα χαμηλής κλιμάκωσης δικτύου οι επεκτάσεις έφεραν θετικά αποτελέσματα διατηρώντας για μεγαλύτερο χρόνο ενεργειακά ζωντανούς τους κόμβους του δικτύου.

Η μελλοντική ερευνητική δουλειά μπορεί να ακολουθήσει δύο διαφορετικές κατευθύνσεις.

- Από τη μια στο σχεδιασμό και στην υλοποίηση μιας πρότυπης cross-layer αρχιτεκτονικής.
- Από την άλλη στην περαιτέρω επέκταση του αλγορίθμου δρομολόγησης καθώς και την προσαρμογή και άλλων πρωτοκόλλων εύρεσης υπηρεσίας.

Αναφορικά με την περίπτωση της cross-layer αρχιτεκτονικής, θα μπορούσε να σχεδιαστεί ένα πρωτόκολλο που θα ενσωματώνει στο επίπεδο της δρομολόγησης τόσο τη διαδικασία της ανακάλυψης υπηρεσίας όσο και την εύρεση διαδρομής βάσει της υπολειπόμενης ενέργειας μονοπατιού. Ουσιαστικά, η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική θα βασίζει τη λειτουργία της στην αναζήτηση εξυπηρετητή υπηρεσίας, βάσει της υπολειπόμενης ενέργειάς του ενώ η διαδρομή προς το server θα χαρακτηρίζεται ως κυρίαρχο ενεργειακά μονοπάτι. Όλη η λειτουργικότητα για την εύρεση υπηρεσίας θα ενταχθεί στο επίπεδο δρομολόγησης, κάτι που προαπαιτεί και την επέκταση στο πίνακα δρομολόγησης.

Μια επιπλέον αλλαγή θα μπορούσε να αφορά και τον χαρακτηρισμό των κόμβων ανάλογα με την παρεχόμενη υπηρεσία. Αν για παράδειγμα ένας κόμβος παρέχει πολύ σημαντική υπηρεσία, όπως συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο, ή video streaming υπηρεσία να μπορεί να εισάγει μια συγκεκριμένη σημαία (flag) στα πακέτα αίτησης διαδρομής και απάντησης διαδρομής. Με αυτό τον τρόπο, όταν λειτουργεί σαν ενδιάμεσος κόμβος και δεν αποτελεί προορισμό, να αποκλείεται ή καλύτερα να μην προτιμάται η διαδρομή που περνάει από τον ίδιο σε όσες περιπτώσεις αυτό είναι εφικτό. Έτσι, θα μπορέσει να διατηρηθεί για μεγαλύτερο χρόνο στο δίκτυο παρέχοντας την υπηρεσία του.

Αναφορικά με τις μελλοντικές αλλαγές στο επίπεδο της δρομολόγησης, θα μπορούσε να επεκταθεί ο αλγόριθμος EAODV_hops. Η επέκταση θα αφορά την εισαγωγή ενός ορίου επιλογής του συγκεκριμένου κριτηρίου που θα ληφθεί υπόψη στην ανακάλυψη διαδρομής. Το όριο θα τεθεί βάσει παρατήρησης μετά από σύγκριση. Ανάλογα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα θα προκύψει ένα σχήμα όπου, εάν μια διαδρομή είναι καλύτερη κατά ένα ποσοστό στην υπολειπόμενη ενέργεια τότε θα επιλέγεται αυτή σε σχέση με το καλύτερο - από την άποψη βημάτων - μονοπάτι. Από την άλλη, σε περίπτωση που ο αριθμός βημάτων είναι πολύ μικρότερος παρά την μεγαλύτερη ενέργεια, θα επιλεγεί το μονοπάτι με τον μικρότερο αριθμό βημάτων. Σε κάθε περίπτωση δεν θα γίνεται τυχαία επιλογή ανάμεσα στο καλύτερο από τα δύο κριτήρια. Επιπρόσθετα, σε επίπεδο ανακάλυψης υπηρεσίας θα μπορούσε να ακολουθηθεί μια πολιτική εξισορρόπησης του φόρτου επιλέγοντας δύο ή περισσότερους εξυπηρετητές δυνατούς ενεργειακά, μεταξύ των οποίων θα διαμοιραστεί η παραλαβή της υπηρεσίας.

7 Βιβλιογραφία

- [1] Römer, Kayq Friedemann Mattern, "The Design Space of Wireless Sensor Networks", IEEE Wireless Communications 11 (6): 54–61. MWC, December 2004.
- [2] Thomas Haenselmann (2006-04-05). [Sensornetworks](http://pi4.informatik.uni-mannheim.de/~haensel/sn_book). GFDL Wireless Sensor Network textbook. http://pi4.informatik.uni-mannheim.de/~haensel/sn_book.
- [3] Hadim, Salem; Nader Mohamed (2006). "[Middleware Challenges and Approaches for Wireless Sensor Networks](http://dsonline.computer.org/portal/pages/dsonline/2006/03/o3001.html)". *IEEE Distributed Systems Online* 7 (3):<http://dsonline.computer.org/portal/pages/dsonline/2006/03/o3001.html>.
- [4] C.K. Toh "Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems", Prentice Hall, ISBN-10: 0130078174, 2002.
- [5] A.Ephremides "Energy Concerns in Wireless Networks." IEEE Wireless Communications, vol.9, no. 4, August 2002, pp. 48-59.
- [6] Dimitrios D. Vergados and Nikolaos A. Pantazis "A SURVEY ON POWER CONTROL ISSUES IN WIRELESS SENSOR NETWORKS", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.9, no.4, 4th Quarter 2007, pp. 86-107.
- [7] F. Akyildiz et al., "Wireless Sensor Networks: A Survey," Computer Networks, vol. 38, no. 4, 2002, pp. 393–422.
- [8] Mobile Ad Hoc Networking, edited by Basagni, Conti, Giordano, and Stojmenovic, ISBN 0-471-37313-3, 2004.
- [9] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. IEEE 802.11 Standard: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications, August 1999.
- [10] Laura Marie Feeney and Martin Nilsson. "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," in Proceedings of IEEE Infocom, April 2001.
- [11] Jean-Pierre Ebert, Brian Burns, and Adam Wolisz. "A trace-based approach for determining the energy consumption of a WLAN network interface," in Proceedings of European Wireless, pp. 230–236, February 2002.
- [12] Laura Marie Feeney. "An energy-consumption model for performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc networks." Journal of Mobile Networks and Applications (MONET), vol.6, no.3, pp. 239–250, June 2001.
- [13] Feeney, L.M., Energy efficient communication in ad hoc wireless networks. In: Basagni, S., Conti, M., Giordano, S., Stojmenovic, I. (Eds.), Mobile Ad Hoc Networking, Wiley.
- [14] Jean-Pierre Ebert, Brian Burns, and Adam Wolisz. "A trace-based approach for determining the energy consumption of a WLAN network interface," in Proceedings of European Wireless, pp. 230–236, February 2002.
- [15] Sung Park, Andreas Savvides, Mani B. Srivastava, "Battery Capacity Measurement And Analysis Using Lithium Coin Cell Battery" ISLPED '01, August 2001.
- [16] T. F. Fuller, M. Doyle, J. Newman, "Simulation and Optimization of the Dual Lithium Ion Insertion Cell," Journal of Electrochem. Soc., vol. 141, no. 4, Apr. 1994, pp. 1-10.
- [17] H.D. Linden, Handbook of Batteries, 2nd ed., McGrawHill, New York 1995.
- [18] M. Pedram, Q. Wu, "Battery-Powered Digital CMOS Design", Proceedings of Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, Munich, Germany, March 1999.

- [19] T. Simunic, L. Benini, G. De Micheli, "Energy-Efficient Design of Battery-Powered Embedded Systems," Proceedings of International Symposium on Low Power Electronics and Design, pp 212-217, Piscataway, August 1999.
- [20] Panasonic Lithium Coin Data Sheet: http://www.panasonic.com/industrial_oem/battery/battery_oem/chem/lith/lith.htm.
- [21] C. F. Chiasserini and R. R. Rao, "Pulsed battery discharge in communication devices," Proceedings of Mobicom 99, Seattle, August 1999.
- [22] Geraud Allard, Pascale Minet, Dang-Quan Nguyen, and Nirisha Shrestha, "Evaluation of the Energy Consumption in MANET", ADHOC-NOW 2006, LNCS 4104, pp. 170–183, 2006.
- [23] L.M. Feeney, "Investigating the energy consumption of an IEEE 802.11 network interface", Technical report T99:11, SICS.
- [24] P. Gauthier, D. Harada and M. Stemm, "Reducing power consumption for the next generation of PDAs: It's in the network interface", in: MoMuC '96 September 1996.
- [25] Chee-Wah, "Investigating Power Aware AODV for Efficient Power Routing in MANETs", Information, Communications and Signal Processing, 2005, pp. 584-588.
- [26] C. Bettstetter, "On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network," Proceedings of the third ACMInternational Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), Lausanne, Switzerland, June 2002, pp. 80-91.
- [27] W. Liang, "Constructing minimum-energy broadcast trees in wireless ad hoc networks," Proceedings of the third ACMInternational Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), Lausanne Switzerland, 2002, ACM Press, pp. 112-122.
- [28] V. Rodoplu and T. H. Meng, "Minimum energy mobile wireless networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, 1999, pp. 1333-1344.
- [29] J. Wu and H. Li, "A dominating-set-based routing scheme in ad hoc wireless networks," Wireless Networks in the Telecommunication Systems, vol. 3, 2001, pp. 63-84.
- [30] A. E. Gamal, C. Nair, B. Prabhakar, E. Uysal-Biyikoglu, and S. Zahedi, "Energy-efficient scheduling of packet transmissions over wireless networks," Proceedings of the Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), vol. 3, New York, NY, June 23-27 2002, pp. 1773-1782.
- [31] J. Hee Ryu, S. Song, and D. -H. Cho, "New clustering schemes for energy conservation in two-tiered mobile ad-hoc networks," Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), vol. 3, Helsinki, Finland, Jun 2001, pp. 862-866.
- [32] C. Srisathapornphat and C. -C. Shen, "Coordinated power conservation for ad hoc networks," Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), vol. 5, New York, NY, Apr 2002, pp. 3330-3335.
- [33] M. Maleki, K. Dantu and M. Pedram, "Power-aware source routing protocol for mobile ad hoc networks," Proceedings of the 2002 international symposium on Low power electronics and design, Monterey, California, USA, 2002, ACM Press, pp. 72-75.

- [34] L. Buttyan and J. P. Hubaux, "Stimulating cooperation in self organizing mobile ad hoc networks," *Mobile Networks and Applications*, Vol. 8, Issue 5, October 2003, pp. 579-592.
- [35] L. Buttyan and J. P. Hubaux, "Enforcing service availability in mobile ad hoc WANS," *Proceedings of the first ACM international symposium on Mobile and ad hoc networking & computing (MOBIHOC)*, Boston, Massachusetts, 2000, IEEE Press, pp. 87-96.
- [36] S. Zhong, J. Chen, and Y.R. Yang, "Sprite: A Simple, Cheat-Proof, Credit-Based System for Mobile Ad-Hoc Networks," *Proceedings of IEEE Infocom '03*, San Francisco, March 2003, pp. 1987-1997.
- [37] S. Buchegger and J. Y. Le Boudec, "Performance analysis of the CONFIDANT protocol," *Proceedings of ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Lausanne, June 2002, pp. 226-235.
- [38] C. E. Perkins, E. M. Royer, S. R. Das and M. K. Marina, "Performance Comparison of Two On-Demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks," *IEEE Personal Communications*, February 2001, pp. 16-28.
- [39] "Power-aware Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks" *ISLPED'02*, August 12-14, 2002.
- [40] C.K. Toh, "Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad hoc networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol.39, no.6, pp.138-147, June 2001.
- [41] S. Singh and C. S. Raghavendra. "PAMAS-Power Aware Multi-Access protocol with Signaling for Ad Hoc Networks," *ACM Commun. Rev.*, July 1998.
- [42] K. Scott and N. Bambos, "Routing and Channel Assignment for Low Power Transmission in PCS," *Proc. ICUPC '96*, vol. 2, pp. 498-502, Oct. 1996.
- [43] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra, "Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks," *Proc. MobiCom '98*, Dallas, TX. Oct. 1998.
- [44] S. Vinoski, "Service Discovery 101," *IEEE Internet Comp.*, vol. 7, no. 1, Jan. 2003, pp. 69-71.
- [45] http://en.wikipedia.org/wiki/Service_discovery
- [46] E. Guttman, C. Perkins, J. Veizades, and M. Day, "Service Location Protocol, Version 2," Request for Comments Standards Track 2608, Internet Engineering Task Force, June 1999.
- [47] Sun Microsystems, Jini Device Architecture Specification, Version 2.0. <http://www.sun.com/software/jini/whitepapers/jini-datasheet0601.pdf>
- [48] Salutation Consortium, "Salutation Architecture Overview." White Paper, 1998. <http://www.salutation.org/whitepaper/originalwp.pdf>
- [49] Universal Plug and Play Forum, Universal Plug and Play Device Architecture, Version 1.0, June 2000. <http://www.upnp.org/resources/documents.asp>
- [50] Bluetooth SIG, Specification of the Bluetooth System, Volume 1, 2001. <http://www.bluetooth.com>.
- [51] M. Nidd, "Service Discovery in DEAPspace," *IEEE Personal Comm.*, pp. 39-45, August 2001.
- [52] M. Storey, G. Blair, and A. Friday, "MARE: resource discovery and configuration in ad hoc networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 7, pp. 377 - 387, 2002.
- [53] F. Zhu, M. Mutka, and L. Ni, "Splendor: A secure, private, and location aware service discovery protocol supporting mobile services," in *Proceeding of the 1st IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications*, pp. 235-242, IEEE Computer Society Press, March 2003.

- [54] S. Helal, N. Desai, V. Verma, and C. Lee, "Konark - A Service Discovery and Delivery Protocol for Ad-hoc Networks," in Proceedings of the Third IEEE Conference on Wireless Communication Networks (WCNC), vol. 3, pp. 2107–2113, March 2003.
- [55] D. Chakraborty, A. Joshi, Y. Yesha, T. Finin, "GSD: A Novel Group-based Service Discovery Protocol for MANETS", Computer Science And Electrical Engineering, University of Maryland, Baltimore County.
- [56] http://en.wikipedia.org/wiki/Ad_hoc_protocol_list#Proactive_Routing_.28Table-driven.29
- [57] Performance of Service Location Protocols in MANET Based on Reactive Routing Protocols Volume 3421/2005 2005 pages 234-241 Friday, April 01, 2005.
- [58] A. Varshavsky, B. Reid, and E. de Lara, "The Need for Cross-Layer Service Discovery in MANETs," Tech. Rep. CSRG-492, UofT Comp. Sci., 2004.
- [59] K. Chen, S. H. Shah, and K. Nahrstedt. Cross-layer design for data accessibility in mobile ad hoc networks. Wireless Personal Communications: An International Journal, 21(1):49–76, Apr. 2002.
- [60] V. T. Raisinghani and S. Iyer. Cross-layer design optimizations in wireless protocol stack. Computer Communications, 2003.
- [61] C.K. Toh, G. Guillermo, DK Kim and Victor Li, "Service Location Protocols for Mobile Ad Hoc Networks", Journal on Ad Hoc & Ubiquitous Computing", Vol. 2, No.4, 2007.
- [62] Juan, Pietro, DK Kim and C K Toh "A Low-Complexity Routing Algorithm with Power Control for Self-Organizing Short-Range Wireless Networks", Wireless Personal Communications Journal, Vol. 41 No. 3, 2007.
- [63] C K Toh, A N Le, and YZ Cho, "Load Balanced Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks", IEEE Communications Magazine, Vol. 47, No. 8, 2009.
- [64] A.N.Mian, R. Baldoni, R. Beraldi, "A Survey of Service Discovery Protocols in Multihop Mobile Ad Hoc Networks", IEEE Pervasive Computing, Vol. 8 , No. 1, pp 66-74, 2009.
- [65] Cao Jianglian, Zhang Zhaoxiao, Zeng Wenli Pei Tingrui, " Energy-aware AODV Routing for Ad Hoc Networks", IEEE Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, Vol. 2, pp. 466-468, April 2009.
- [66] Lixin Li, Huisheng Zhang, " Research on Cross-Layer Design for MANET", IEEE Intelligent Information Technology Application, IITA 2009, Vol. 2, pp 225-228, 2009.
- [67] Giagkos Alexandros and Myra S. Wilson, "A Cross-layer Design for Bee-Inspired Routing Protocols in MANETs", in Proceedings of TAROS 2009, Ulster University, Derry, Aug 31st - Sept 2nd, 2009, pp. 25-32.