

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΘΕΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ  
AD-HOC ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ  
ΔΙΚΤΥΑ**

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Γ. ΣΠΑΝΑΚΗΣ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2004

Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

**ΘΕΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ  
AD-HOC ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ  
ΔΙΚΤΥΑ**

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Γ. ΣΠΑΝΑΚΗΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ηράκλειο 2004

Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

**ΘΕΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ AD-HOC  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ**

Εργασία που υποβλήθηκε από τον  
ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Γ. ΣΠΑΝΑΚΗ  
ως μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων  
για την απόκτηση  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ  
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Συγγραφέας:

---

Εμμανουήλ Γ. Σπανάκης  
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών  
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εξεταστική Επιτροπή:

---

Απόστολος Τραγανίτης, Καθηγητής  
Επόπτης – Επιβλέπων  
Πρόεδρος

---

Παναγιώτης Τσακαλίδης, Αναπλ. Καθηγητής,  
Μέλος

---

Βασίλειος Σύρης, Επίκ. Καθηγητής  
Μέλος

Δεκτή:

---

Δημήτρης Πλεξουσάκης  
Πρόεδρος Επιτροπής Μεταπτυχιακών Σπουδών

Φεβρουάριος 2004

## ΘΕΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ AD-HOC ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Εμμανουήλ Γ. Σπανιάκης

Μεταπτυχιακή Εργασία

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών  
Πανεπιστήμιο Κρήτης

### Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία ραγδαία εξάπλωση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών. Ένα ad-hoc ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο κινητών κόμβων έχει την δυνατότητα για ασύρματη μεταφορά δεδομένων και δημιουργείται δυναμικά και αυτόνομα.

Η διαδικασία εύρεσης των διαδρομών που πρέπει να ακολουθήσουν τα δεδομένα για να μεταφερθούν από τον ένα κόμβο στον άλλο ονομάζεται δρομολόγηση και είναι μία από τις ουσιώδεις λειτουργίες που πρέπει να υποστηρίζει ένα δίκτυο. Η δρομολόγηση σε δίκτυα ad-hoc αποτελεί βασικό πεδίο έρευνας επειδή τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν είναι αποδοτικά εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των δικτύων αυτών. Η ομάδα εργασίας MANET του IETF έχει στόχο την προτυποποίηση ενός αποδοτικού πρωτοκόλλου δρομολόγησης για τα δίκτυα αυτά.

Στην παρούσα εργασία περιγράφουμε τα σημαντικότερα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν προταθεί και τα κατηγοριοποιούμε σύμφωνα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Μελετούμε διεξοδικά το σημαντικότερο από αυτά, το πρωτόκολλο δυναμικής δρομολόγησης πηγής (Dynamic Source Routing). Ο αλγόριθμος δρομολόγησης αυτού του πρωτοκόλλου είναι απλός και αποδοτικός, σχεδιασμένος ειδικά για χρήση πάνω από ασύρματα δίκτυα ad-hoc πολλαπλών συνδέσεων με κινούμενους κόμβους. Ο αλγόριθμος του DSR επιτρέπει στο δίκτυο να είναι πλήρως αυτόνομο, τόσο στη διαδικασία οργάνωσης, όσο και στη διαδικασία δρομολόγησης, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία κάποιας προϋπάρχουσας υποδομής δικτύου ή διαχείρισης δικτύου.

Η ανάλυση του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου δημιουργεί ερωτηματικά σχετικά με την απόδοσή του. Αν και έχουν ήδη προταθεί πολλοί τρόποι βελτίωσης του πρωτοκόλλου, στην παρούσα εργασία μελετάμε, παρουσιάζουμε και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσπάθειας βελτίωσης της απόδοσης του πρωτοκόλλου δρομολόγησης DSR με χρήση τεχνικών για την καλύτερη διαχείριση των αποθηκευμένων πληροφοριών δρομολόγησης στις Route Cache των κόμβων του δικτύου.

Αρχικά μελετάμε διεξοδικά, μέσω προσομοίωσης στο OPNET, το πρωτόκολλο DSR. Εστιάζουμε στο χρόνο ζωής των διαδρομών διαφορετικού μήκους σε ένα ασύρματο δίκτυο ad-hoc. Επιβεβαιώνουμε, για το πρωτόκολλο DSR, τα αποτελέσματα που προβλέπει η μαθηματική ανάλυση. Στη συνέχεια επεκτείνουμε

τις λειτουργίες της Route Cache, ώστε να μη χρησιμοποιεί μία διαδρομή πέραν του προβλεπόμενου χρόνου ζωής της. Για το σκοπό αυτό αναπτύσσουμε αλγόριθμο, ο οποίος εκτιμά το χρόνο ζωής των διαδρομών κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου και χρησιμοποιεί την εκτίμηση αυτή στη διαδικασία της δρομολόγησης.

Επιβεβαιώνουμε, ότι η χρήση της παραμέτρου Time-To-Live (TTL) των αποθηκευμένων διαδρομών δρομολόγησης επιτυγχάνει σημαντικές βελτιώσεις: α) στη μείωση της συνολική καθυστέρησης μετάδοσης των δεδομένων, β) στη αύξηση της διαπερατότητας του δικτύου (throughput) και γ) στη μείωση του ποσοστού λανθασμένων πληροφοριών που υπάρχουν σε μία Route Cache.

## Abstract

A vast expansion of wireless telecommunications technologies has been observed over the last years. A Mobile Ad hoc NETWORK (MANET) is an autonomous and dynamic system of mobile hosts that use wireless communication technologies for data transfer

Routing is the process of defining the path of the transmitted data that need to be traversed through a MANET and it is one of the basic network functions. Routing in mobile ad-hoc networks constitutes a basic field of research because the existing routing protocols perform poorly due to the special characteristics of this kind of networks.

We will describe the most important suggested protocols and categorize them according to their individual features. The most important amongst them is the Dynamic Source Routing protocol (DSR) is a simple and efficient routing protocol designed specifically for use in multi-hop wireless ad hoc networks of mobile nodes. Using DSR, the network is completely self-organizing and self-configuring, requiring no existing network infrastructure or administration.

The use of this protocol has raised many questions concerning its performance. There are several ways for improving the DSR protocol's performance; we present and compare the results of using a technique for the management of the routing data stored in the route caches of the nodes by optimizing the cached route lifetime using a Time-To-Live (TTL) interval. Firstly, we study the route lifetime for different length routes in an ad-hoc wireless network. We compare the result with those obtained from a mathematical analysis and conclude that the use of this technique enables the protocol to avoid using routes that lead to time consuming "errors". In addition, an algorithm that estimates the lifetime of all routes while the network is active and uses this estimate for routing, was developed.

Finally we confirm that the use of the Time-To-Live (TTL) parameter in route caching in a on-demand routing protocol, can significantly improve the network's throughput, decrease the total data transmission delay, and decrease the route cache's erroneous information ratio.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Ασύρματα ad-hoc τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.....	11
1.1.	Περίληψη της εργασίας .....	13
1.2.	Δομή της Εργασίας.....	15
2.	Ασύρματα ad-hoc δίκτυα .....	16
2.1.	Ορισμός ενός ασύρματου ad-hoc δικτύου .....	16
2.2.	Μοντέλα Λειτουργίας Ad-hoc ασύρματων δικτύων .....	17
2.3.	Κινητικότητα κόμβων.....	18
2.4.	Εφαρμογές Mobile ασύρματων Ad-hoc δικτύων .....	18
3.	Δρομολόγηση, ορισμός προβλήματος.....	21
3.1.	Το πρόβλημα της δρομολόγησης στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα.....	22
3.2.	Δρομολόγηση στο επίπεδο των συνδέσεων .....	22
3.3.	Δρομολόγηση με την χρήση του διανύσματος της απόστασης.....	23
3.4.	Δρομολόγηση πηγής.....	23
3.5.	Τεχνική πλημμύρας.....	23
3.6.	Proactive versus Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης .....	24
3.7.	Ομάδα εργασίας MANET .....	25
3.8.	Περιγραφή πρωτοκόλλων δρομολόγησης των MANET's. ....	27
3.8.1.	Proactive και Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης .....	27
3.8.2.	Proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης .....	27
3.8.2.1.	Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol .....	28
3.8.2.2.	The Wireless Routing Protocol.....	29
3.8.3.	Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	31
3.8.3.1.	Δυναμική δρομολόγηση πηγής (Dynamic Source Routing) .....	31
3.8.3.2.	The Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol .....	32
3.8.3.3.	Δρομολόγηση αναστροφής συνδέσεων.....	35
3.8.4.	Δρομολόγηση με την χρήση πληροφοριών θέσεως .....	38
3.8.4.1.	Location Aided Routing (LAR) .....	38
3.8.4.2.	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM).....	39
3.8.4.3.	Relative Distance Micro Discovery Ad-Hoc Routing .....	40
3.8.5.	Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	42
3.8.5.1.	Πρωτόκολλο δρομολόγησης ζώνης (Zone Routing Protocol) ZRP 42	
3.8.5.2.	Fisheye State Routing (FSR) .....	43
3.8.5.3.	Landmark Routing (LANMAR) for MANET' with Group Mobility 44	
3.8.6.	Άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	45
3.8.6.1.	Signal Stability Routing (SSR).....	45
3.8.6.2.	Power Aware Routing.....	46
3.8.6.3.	Associativity Based Routing.....	46
3.8.7.	Πολλαπλής διανομής, πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	47
3.8.7.1.	Multicasting AODV (MAODV).....	48
3.8.7.2.	On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP).....	48
4.	Dynamic Source Routing for Multihop Wireless Ad-hoc Networks .....	50
4.1.	Εισαγωγή.....	51

4.2.	Υποθέσεις στην λειτουργία του πρωτοκόλλου .....	51
4.2.1.	Διαθεσιμότητα των κόμβων και συμμετοχή στις λειτουργίες του πρωτοκόλλου.....	52
4.2.2.	Διάμετρος του δικτύου .....	52
4.2.3.	Αλλοιωμένα πακέτα.....	52
4.2.4.	Μοντέλο κίνησης των κόμβων .....	52
4.2.5.	Λειτουργία promiscuous mode .....	53
4.2.6.	Αμφίδρομη και μη-αμφίδρομη επικοινωνία .....	53
4.2.7.	Ανάθεση διευθύνσεων IP στους κόμβους του δικτύου. ....	54
4.3.	Περιγραφή του πρωτοκόλλου DSR.....	54
4.3.1.	Επισκόπηση και Σημαντικές Ιδιότητες του πρωτοκόλλου.....	54
4.4.	Μηχανισμός εύρεσης διαδρομών.....	56
4.5.	Μηχανισμός συντήρησης διαδρομών στον DSR.....	59
4.6.	Επιπρόσθετες λειτουργίες εύρεσης διαδρομών.....	61
4.6.1.	Παρακολούθηση και αποθήκευση επιπρόσθετων πληροφοριών δρομολόγησης.....	61
4.6.2.	Απαντώντας στο μήνυμα «Route Request» χρησιμοποιώντας πληροφορίες από την «Route Cache». ....	63
4.6.3.	Παρεμπόδιση των πολλαπλών «Route Reply» (Route Reply Storms).....	64
4.6.4.	Όριο προώθησης ενός «Route Request».....	66
4.7.	Πρόσθετα χαρακτηριστικά γνωρίσματα συντήρησης διαδρομών.....	66
4.7.1.	Διάσωση πακέτων .....	66
4.7.2.	Αυτόματος περιορισμός του μήκους των διαδρομών .....	67
4.7.3.	Αυξανόμενη διάδοση των μηνυμάτων «Route Error» (Increased Spreading of Route Error Messages).....	68
4.7.4.	Αποθηκεύοντας αρνητικές πληροφορίες .....	68
4.8.	Υποστήριξη για ετερογενή δίκτυα και το mobile IP .....	68
4.8.1.	Χρήση δεικτών διεπαφών στον DSR.....	69
4.8.2.	Διασύνδεση με το Διαδίκτυο (Ιντερνετ) και mobile IP.....	70
4.8.3.	Multicast Routing with DSR .....	70
5.	Δρομολόγηση και Caching.....	71
5.1.	Τρόποι βελτίωσης της απόδοσης των πρωτοκόλλων δρομολόγησης... ..	72
5.2.	Το πρόβλημα του Caching στους αλγόριθμους δρομολόγησης πηγής.....	73
5.2.1.	Λόγοι και οφέλη της αποθήκευσης διαδρομών σε ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης .....	73
5.2.2.	Μειονεκτήματα της αποθήκευσης διαδρομών σε ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης .....	74
5.3.	Έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία για την αποθήκευση διαδρομών.....	75
5.3.1.	Βελτιστοποίηση της απόδοσης με τη χρήση της παραμέτρου Time-To-Live (TTL).....	75
5.3.1.1.	Χαρακτηριστικά της παραμέτρου TTL.....	77
5.3.1.2.	Μέθοδος υπολογισμού της βέλτιστης τιμής TTL.....	77
5.3.1.2.1.	Αναμενόμενη καθυστέρηση δρομολόγησης.....	78
5.3.1.2.2.	Υπολογισμός βέλτιστου TTL για αποθηκευμένες διαδρομές στους κόμβους πηγής.....	79
5.3.1.2.3.	Βελτιστοποίηση του TTL για αποθηκευμένες διαδρομές στους ενδιάμεσους κόμβους.....	79
5.3.1.2.4.	Αποτελέσματα προσομοίωσης .....	81
5.3.1.2.5.	Αναμενόμενη καθυστέρηση δρομολόγησης.....	81



5.3.1.2.6.	Βελτίωση της απόδοσης με την βελτιστοποίηση του χρόνου ζωής των διαδρομών.....	82
5.3.2.	Ensuring Cache Freshness in On-Demand Ad Hoc Network Routing Protocols.....	83
5.3.2.1.	Περιγραφή της μεθόδου.....	84
5.3.2.2.	Ανάλυση του πρωτοκόλλου.....	87
5.3.2.2.1.	Network Overhead.....	87
5.3.2.2.2.	Storage Overhead.....	87
5.3.2.2.3.	Αποτελέσματα.....	87
5.4.	Πειραματικός έλεγχος της βελτίωσης της απόδοσης της Route Cache σε ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης.....	88
6.	Περιγραφή περιβάλλοντος προσομοίωσης και πειραμάτων.....	89
6.1.	Περιγραφή του προγράμματος προσομοίωσης δικτύων OPNET.....	89
6.1.1.	Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του OPNET modeler.....	90
6.1.2.	Γιατί επιλέξαμε το συγκεκριμένο εργαλείο.....	93
6.2.	Υλοποίηση του DSR στο OPNET.....	94
6.2.1.	Ο λόγος υλοποίησης του DSR στο OPNET.....	94
6.2.2.	Το πρωτόκολλο DSR, υλοποίηση του μοντέλου στο OPNET.....	95
6.2.2.1.	Περιγραφή των στρωμάτων του μοντέλου των κόμβων του DSR:.....	96
6.2.2.2.	Το μοντέλο δρομολόγησης DSR.....	97
6.2.2.2.1.	Βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας του DSR.....	97
6.2.2.2.1.1.	Μηχανισμός εύρεσης διαδρομών.....	97
6.2.2.2.1.2.	Μη-υλοποιημένοι μηχανισμοί.....	100
6.2.2.2.1.3.	Μηχανισμοί συντήρησης διαδρομών.....	101
6.2.2.2.1.4.	Στρατηγικές «Route Caching».....	102
6.2.2.2.1.5.	Αμφίδρομες συνδέσεις.....	103
6.2.2.2.2.	Μηχανισμοί που δεν έχουν υλοποιηθεί στο συγκεκριμένο μοντέλο.....	103
6.2.2.2.2.1.	Επίπεδο IP.....	103
6.2.2.2.2.2.	Λειτουργία riggybacking στα μηνύματα ελέγχου.....	104
6.2.2.2.2.3.	Διάσωση πακέτων δεδομένων.....	104
6.2.2.2.3.	Η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων της διαδικασίας δρομολόγησης DSR.....	104
6.3.	Μοντέλα κινητικότητας.....	107
6.3.1.	Billiard Mobility Model.....	107
6.3.2.	Waypoint Mobility Model.....	108
6.4.	Περιγραφή του περιβάλλοντος προσομοίωσης και πειραμάτων.....	109
6.4.1.	Σεναρίων μοντέλου προσομοίωσης.....	109
6.5.	Παράμετροι προσομοίωσης.....	110
6.5.1.	Μέγεθος του δικτύου.....	111
6.5.2.	Κινητικότητα (mobility) των κόμβων.....	111
6.5.2.1.	Παράμετροι μοντέλου Billiard.....	112
6.5.2.2.	Παράμετροι μοντέλου Waypoint.....	112
7.	Μέθοδος, μελέτη και εξαγωγή συμπερασμάτων.....	114
7.1.	Σκοπός αυτής της εργασίας.....	114
7.2.	Μέθοδος.....	114
7.2.1.	Εκτιμώμενος χρόνος ζωής διαδρομών (Μαθηματική ανάλυση).....	114
7.2.1.1.	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	116
7.2.1.2.	Συμπεράσματα.....	117
7.2.2.	Μελέτη του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης DSR.....	118
7.2.3.	Μετάδοση πακέτων δεδομένων.....	118

7.2.4.	Πειραματική μελέτη χρόνου ζωής διαδρομών .....	119
7.2.5.	Μέσος χρόνος ζωής μίας διαδρομής.....	120
7.2.6.	Χρόνος ζωής μίας διαδρομής σε διαφορετικά πειράματα.....	123
7.2.6.1.	Στατιστικά στοιχεία .....	123
7.2.6.2.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard» .....	123
7.2.6.3.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint» .....	124
7.2.6.4.	Αποτελέσματα πειραμάτων .....	124
7.2.7.	Σύγκριση αποτελεσμάτων. ....	125
7.2.8.	Εφαρμογή του TTL στο μοντέλο του DSR στο OPNET .....	126
7.2.8.1.	Υλοποίηση.....	127
7.2.8.2.	Επιλογή του Time-to-Live (TTL) .....	128
7.2.8.3.	Περιβάλλον εκτέλεσης πειραμάτων.....	132
7.2.8.4.	Στατιστικά στοιχεία .....	133
7.2.8.5.	Αποτελέσματα .....	134
7.2.8.5.1.	Βελτίωσης του miss_ratio. ....	135
7.2.8.5.1.1.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».....	135
7.2.8.5.1.1.1.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint» .....	136
7.2.8.5.2.	Βελτίωση της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio .....	138
7.2.8.5.2.1.1.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».....	138
7.2.8.5.2.1.2.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint» .....	140
7.2.8.5.3.	Βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio.....	142
7.2.8.5.3.1.1.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».....	142
7.2.8.5.3.1.2.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint» .....	145
7.2.8.6.	Συμπεράσματα από την χρήση του TTL.....	147
7.2.8.6.1.	Κέρδος στην απόδοση του αλγορίθμου.....	147
7.2.8.6.2.	Βέλτιστη απόδοσης του αλγορίθμου δρομολόγησης.....	149
7.2.8.6.3.	Μελέτη των αποτελεσμάτων.....	152
7.2.8.6.4.	Μείωση του αριθμού των λαθών δρομολόγησης.....	153
7.2.8.6.5.	Λάθη δρομολόγησης .....	154
7.2.8.6.6.	Καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων δεδομένων.....	154
7.2.8.6.7.	Πειραματικά αποτελέσματα.....	155
7.2.8.6.8.	Δίκτυο κόμβων με χρήση του μοντέλου κίνηση «billiard» .....	156
7.2.8.6.8.1.	Δίκτυο 16 κόμβων .....	156
7.2.8.6.8.2.	Δίκτυο 20 κόμβων.....	157
7.2.8.6.8.3.	Δίκτυο 30 κόμβων .....	157
7.2.8.6.9.	Δίκτυο κόμβων με χρήση του μοντέλου κίνηση «waypoint» .....	158
7.2.8.6.9.1.	Δίκτυο 16 κόμβων .....	158
7.2.8.6.9.2.	Δίκτυο 20 κόμβων .....	159
7.2.8.6.9.3.	Δίκτυο 30 κόμβων .....	160
7.2.8.7.	Συμπεράσματα .....	160
8.	Μελλοντική Δουλειά .....	162
8.1.	Ερευνητικά θέματα και προβλήματα στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα... ..	163
8.1.1.	Scalability .....	163
8.1.2.	Ποιότητα υπηρεσιών σε ad-hoc ασύρματα δίκτυα .....	164
8.1.3.	Client-Server vs. Peer to Peer application model .....	165
8.1.4.	Security .....	167
8.2.	Μελλοντική δουλειά στο πρόβλημα του caching .....	168
8.2.1.	Χαρακτηρισμός διαδρομών δρομολόγησης .....	169
8.2.2.	Εφαρμογή του TTL και σε άλλους αλγόριθμους δρομολόγησης.....	169
8.3.	Βελτίωση παραμέτρων προσομοίωσης.....	170

9.	Παράρτημα Α – Υλοποίηση στο MATLAB.....	172
9.1.	Κώδικας υλοποίηση μεθόδου bisection.....	172
9.2.	Υπολογισμός εκτιμώμενων τιμών του TTL.....	173
10.	Αποτελέσματα μετρήσεων του χρόνου ζωής διαδρομών.....	174
10.1.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint».....	174
10.1.1.	Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 16 κόμβων.....	175
10.1.2.	Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 20 κόμβων.....	177
10.1.3.	Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 30 κόμβων.....	179
10.2.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».....	181
10.2.1.	Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 16 κόμβων.....	181
10.2.2.	Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 20 κόμβων.....	184
10.2.3.	Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 30 κόμβων.....	186
11.	Παράρτημα Γ.....	188
11.1.	Αποτελέσματα εφαρμογής του TTL.....	188
11.2.	Γραφικές παραστάσεις ποσοστών κέρδους από την εφαρμογή του TTL στις Route Caches των κόμβων.....	188
11.2.1.	Κέρδος του Miss Ratio.....	188
11.2.2.	Κέρδος του Miss Ratio και του average delay.....	189
11.2.3.	Κέρδος του Miss Ratio και του average delay και του Throughput.....	190
11.3.	Γραφικές παραστάσεις εφαρμογής του TTL στις Route Caches των κόμβων.....	191
11.3.1.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».....	192
11.3.1.1.	Δίκτυο 16 κόμβων.....	192
11.3.1.1.1.	Δίκτυο 20 κόμβων.....	193
11.3.1.1.2.	Δίκτυο 30 κόμβων.....	194
11.3.1.2.	Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint».....	195
11.3.1.2.1.	Δίκτυο 16 κόμβων.....	195
11.3.1.2.2.	Δίκτυο 20 κόμβων.....	196
11.3.1.2.3.	Δίκτυο 30 κόμβων.....	197
11.4.	Γραφικές παραστάσεις εφαρμογής του TTL στις Route Caches των κόμβων.....	197
12.	Βιβλιογραφία.....	198

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Μηχανισμός Εύρεσης Διαδρομών (παράδειγμα) .....	57
Εικόνα 2: Περίπτωση ενεργοποίησης μηχανισμού συντήρησης διαδρομών .....	60
Εικόνα 3: Περιορισμοί στην εναποθήκευση των πληροφοριών δρομολόγησης.....	62
Εικόνα 4: Αποφυγή απάντησης σε αίτημα δρομολόγησης λόγω ύπαρξης διπλότυπων συνδέσεων στη διαδρομή .....	63
Εικόνα 5: Πολλαπλά μηνύματα απάντησης διαδρομών (Route Reply Storm) .....	65
Εικόνα 6: Αναμενόμενη καθυστέρηση δρομολόγησης .....	81
Εικόνα 7: Απόδοση με χρήση βέλτιστου TTL .....	83
Εικόνα 8: Οι «epoch numbers» σε ένα κόμβο.....	85
Εικόνα 9: Ιεραρχικό μοντέλο στον OPNET Modeler.....	92
Εικόνα 10: Μοντέλο στο επίπεδο του κόμβου.....	95
Εικόνα 11: Αποθήκευση αμφίδρομων διαδρομών στην Route Cache .....	103
Εικόνα 12: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων στο επίπεδο δρομολόγησης.....	105
Εικόνα 13: Billiard mobility model .....	108
Εικόνα 14: Waypoint mobility model.....	108
Εικόνα 15: Μοντέλο συνεχούς χρόνου κατάστασης συνδέσεων .....	116
Εικόνα 16: Τιμές Time-To-Live από την ανάλυση .....	117
Εικόνα 17: Μέσος χρόνος ζωής μίας διαδρομής.....	120
Εικόνα 18: Μέσος χρόνος ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση.....	122
Εικόνα 19: Συνολική απεικόνιση του χρόνου ζωής των διαδρομών στον DSR .....	125
Εικόνα 20: Τα πειραματικά με τα αναλυτικά αποτελέσματα.....	126
Εικόνα 21: Εμφάνιση λάθους στην μετάδοση πακέτου δεδομένων.....	129
Εικόνα 22: Άκωρες διαδρομές δρομολόγησης και πλήθος αυτών που αποφεύγονται με την χρήση του Time-to-Live.....	131
Εικόνα 23: Έγκυρες Διαδρομές δρομολόγησης και πλήθος αυτών που δεν χρησιμοποιούνται με την χρήση του Time-to-Live.....	131
Εικόνα 24: Εκτιμώμενος χρόνος ζωής διαδρομών.....	133
Εικόνα 25: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων .....	175
Εικόνα 26: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων .....	175
Εικόνα 27: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων .....	176
Εικόνα 28: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων .....	176
Εικόνα 29: Δρικότυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων .....	177
Εικόνα 30: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων .....	177
Εικόνα 31: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων.....	178
Εικόνα 32: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων.....	178
Εικόνα 33: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων .....	179
Εικόνα 34: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων .....	179
Εικόνα 35: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων .....	180
Εικόνα 36! Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων .....	180
Εικόνα 37: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων .....	181
Εικόνα 38: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων .....	182
Εικόνα 39: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων .....	182
Εικόνα 40: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων .....	183
Εικόνα 41: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων .....	184

Εικόνα 42: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων.....	184
Εικόνα 43: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων.....	185
Εικόνα 44: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων.....	185
Εικόνα 45: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων.....	186
Εικόνα 46: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων.....	186
Εικόνα 47: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων.....	187
Εικόνα 48: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων.....	187

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σενάρια εκτέλεσης των πειραμάτων του DSR στο OPNET .....	110
Πίνακας 2: Πίνακας τιμών του χρόνου ζωής διαδρομών.....	133
Πίνακας 3: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 16 κόμβων .....	136
Πίνακας 4: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 20 κόμβων .....	136
Πίνακας 5: : Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 30 κόμβων .....	136
Πίνακας 6: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 16 κόμβων .....	137
Πίνακας 7: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 20 κόμβων .....	137
Πίνακας 8: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 30 κόμβων .....	138
Πίνακας 9: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 16 κόμβων.....	139
Πίνακας 10: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 20 κόμβων.....	139
Πίνακας 11: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 30 κόμβων.....	140
Πίνακας 12: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 16 κόμβων.....	141
Πίνακας 13: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 20 κόμβων.....	141
Πίνακας 14: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 30 κόμβων.....	142
Πίνακας 15: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 16 κόμβων.....	143
Πίνακας 16: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 20 κόμβων.....	144
Πίνακας 17: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 30 κόμβων.....	144
Πίνακας 18: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 16 κόμβων.....	145
Πίνακας 19: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 20 κόμβων.....	146
Πίνακας 20: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss_ratio για πειράματα 30 κόμβων.....	147
Πίνακας 21: Κέρδος του miss ratio .....	147
Πίνακας 22: Κέρδος του miss ratio και του Average Delay.....	148
Πίνακας 23: Κέρδος του miss ratio, του Average Delay και του Throughput .....	148
Πίνακας 24: Απόδοση του πρωτοκόλλου με την χρήση σταθερού TTL για το μοντέλο κίνησης billiard.....	151

Πίνακας 25: Απόδοση του πρωτοκόλλου με την χρήση σταθερού TTL για το μοντέλο κίνησης waypoint .....	152
---	-----

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα στο σημείο αυτό, να ευχαριστήσω θερμά τον επόπτη μου κ. Απόστολο Τραγανίτη, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας, αλλά και για την μεγάλη εμπειρία που απέκτησα στην περιοχή της έρευνας από τη συνεργασία μας. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες και στα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. κ. .Σύρη Βασίλη και Τσακαλίδη Παναγιώτη, για τις πολύτιμες παρατηρήσεις που έκαναν στην παρούσα εργασία.

Παράλληλα, θέλω να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Γιώργο και Ανδρονίκη καθώς και στον αδερφό μου Μάριο για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια που μου προσέφεραν όλο το διάστημα, των ακαδημαϊκών μου σπουδών.

Θα ήθελα να επίσης να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου που μου συμπαραστάθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Κώστα Μαριά, για την πολύτιμη βοήθεια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Τίτσια, που χωρίς την πολύτιμη συμπαράσταση, υποστήριξη και αγάπη της δε θα έφτανα σήμερα να γράφω αυτές τις γραμμές.



# Κεφάλαιο 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1. Ασύρματα ad-hoc τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια τρομακτική αύξηση του πλήθους των φορητών υπολογιστών και υπολογιστών χειρός η οποία σε συνδυασμό με την σύγχρονη τάση για δημιουργία συστημάτων, μικρότερου μεγέθους, με όλο και μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, είχε σαν αποτέλεσμα την ανάγκη για δημιουργία νέων εφαρμογών, πρωτοκόλλων, αλγορίθμων και δια-επικοινωνιακών συστημάτων, με σκοπό να καλύψουν τις αυξανόμενες ανάγκες των πολιτών, που χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνολογίες. Ταυτόχρονα παρατηρείται μία μεγάλη εξάπλωση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, τόσο με την ραγδαία εξάπλωση της κινητής τηλεφωνίας, όσο και των άλλων ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων δεδομένων. Οι προβλέψεις των ειδικών για τις δύο αυτές τάσεις, που παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια, είναι ότι σύντομα θα υπάρχουν σε χρήση παραπάνω από ένα δισεκατομμύριο ασύρματες τηλεπικοινωνιακές συσκευές κάθε είδους και ανά έτος θα διαθέτονται στην παγκόσμια αγορά περισσότερα από 200 εκατομμύρια ασύρματα τηλέφωνα. Οι προβλέψεις αυτές πιστεύεται ότι θα αλλάξουν την έννοια της φράσης που όλοι χρησιμοποιούν «μείνε σε επαφή». Όλοι από οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκονται θα μπορούν να έρθουν σε επαφή με οποιοδήποτε άλλο πρόσωπο ή υπηρεσία επιθυμούν. Σήμερα οι άνθρωποι χρησιμοποιούν διάφορες τηλεπικοινωνιακές συσκευές, τόσο για τις καθημερινές συνομιλίες και επαφές με άλλους ανθρώπους, όσο και για την ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών από οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκονται. Στην νέα πραγματικότητα που διαφαίνεται ότι θα φέρουν, λόγω της γρήγορης εξάπλωσης τους, οι ασύρματες φορητές υπολογιστικές συσκευές, έρχεται η επιστήμη των υπολογιστών και συγκεκριμένα ο τομέας των ασύρματων δικτύων να αναπτύξει τα απαραίτητα πρωτόκολλα, συστήματα επικοινωνιών, για να μπορέσει να ικανοποιήσει τις ανάγκες των χρηστών, για εύκολη και άνετη πρόσβαση σε κάθε είδους υπηρεσίες και πληροφορίες μέσω αυτών των τεχνολογιών.

Στην νέα αυτή πραγματικότητα, στην οποία κατευθυνόμαστε, βασικό ρόλο θα έρθουν να παίζουν οι νέες υπηρεσίες για τις νέες κατηγορίες χρηστών που θα χρησιμοποιούν τους υπολογιστές και τις υπηρεσίες από οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκονται. Η

βασική τους ανάγκη όμως θα παραμείνει η ίδια και αυτή δεν είναι άλλη από την καθολική και εύκολη πρόσβαση στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό. Οι χρήστες απαιτούν, και δίκαια από κάθε άποψη, η έλευση των νέων τεχνολογιών να μπορέσει να τους εξασφαλίσει αυτό που σήμερα έχουν, καθολική πρόσβαση σε υπηρεσίες τόσο για προσωπική όσο και για επαγγελματική χρήση, διευκολύνοντας τον τρόπο που γίνεται αυτό, με την μικρότερη δυνατή καθυστέρηση και κόστος και την μεγαλύτερη δυνατή ευκολία και ευελιξία. Σήμερα αυτό είναι δυνατόν αφού υπάρχουν ασύρματες τεχνολογίες, που μπορούν να επιτρέψουν την γρήγορη, ικανοποιητική και χωρίς μεγάλο κόστος επικοινωνία, καθώς και συσκευές που έρχονται να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των χρηστών. Στο μέλλον πιστεύεται ότι όλοι οι πολίτες θα έχουν αυτού του τύπου τις επικοινωνίες δεδομένες.

Σήμερα παρατηρούμε μία έξαρση στην ανάπτυξη και δημιουργία τεχνολογικών λύσεων για να μπορέσουν να υποστηρίξουν την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων. Οι υπολογιστές αναπτύσσονται όλο και περισσότερο αποκτώντας όλο και περισσότερες δυνατότητες και παράλληλα το λογισμικό εξελίσσεται γοργά για να μπορέσει να υποστηρίξει τις νέες υπηρεσίες και τεχνολογίες. Στην παγκόσμια αγορά καθημερινά εμφανίζονται όλο και περισσότερα προϊόντα προς αυτή την κατεύθυνση από ότι στο παρελθόν. Σε αυτό έχει συμβάλει, τα τελευταία χρόνια, η αύξηση του εύρους των ασύρματων καναλιών, που είναι μεγαλύτερο από δέκα έως εκατό φορές, από αυτό που είχαμε στη διάθεση μας μερικά χρόνια πριν. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την εξέλιξη στην ευκολία με την οποία ο οποιοσδήποτε μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό, έχουν σαν αποτέλεσμα να θεωρούνται δεδομένες όλο και περισσότερες από τις βασικές λειτουργίες ενός δικτύου, πράγμα το οποίο δημιουργεί προκλήσεις σε μία ανερχόμενη τεχνολογία, αφού πέρα από τα προβλήματα που έχει να λύσει, πρέπει να φροντίσει να υποστηρίξει και το σύνολο των λειτουργιών που οι χρήστες σήμερα θεωρούν δεδομένες.

Σήμερα παρατηρούμε μία έξαρση στην ανάπτυξη και δημιουργία τεχνολογικών λύσεων για να μπορέσουν να υποστηρίξουν την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων. Οι υπολογιστές αναπτύσσονται όλο και περισσότερο αποκτώντας όλο και περισσότερες δυνατότητες και παράλληλα το λογισμικό εξελίσσεται γοργά για να μπορέσει να υποστηρίξει τις νέες υπηρεσίες και τεχνολογίες. Στην παγκόσμια αγορά καθημερινά εμφανίζονται όλο και περισσότερα προϊόντα προς αυτή την κατεύθυνση από

ότι στο παρελθόν. Σε αυτό έχει συμβάλει, τα τελευταία χρόνια, η αύξηση του εύρους των ασύρματων καναλιών, που είναι μεγαλύτερο από δέκα έως εκατό φορές, από αυτό που είχαμε στη διάθεση μας μερικά χρόνια πριν. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την εξέλιξη στην ευκολία με την οποία ο οποιοσδήποτε μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό, έχουν σαν αποτέλεσμα να θεωρούνται δεδομένες όλο και περισσότερες από τις βασικές λειτουργίες ενός δικτύου, πράγμα το οποίο δημιουργεί προκλήσεις σε μία ανερχόμενη τεχνολογία, αφού πέρα από τα προβλήματα που έχει να λύσει, πρέπει να φροντίσει να υποστηρίξει και το σύνολο των λειτουργιών που οι χρήστες σήμερα θεωρούν δεδομένες.

### **1.1. Περίληψη της εργασίας**

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία μεγάλη εξάπλωση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών, εξαιτίας της ραγδαίας εξάπλωσης τόσο της κινητής τηλεφωνίας, όσο και των άλλων ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων δεδομένων. Ένα ad-hoc ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο αποτελείται από δύο ή περισσότερους κινητούς κόμβους, οι οποίοι έχουν δυνατότητα για ασύρματη μετάδοση και λήψη δεδομένων και μπορεί να δημιουργείται δυναμικά και αυτόνομα. Οι κόμβοι του δικτύου έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας με οποιοδήποτε άλλο κόμβο που βρίσκεται στην εμβέλειά τους ή στην εμβέλεια ενός γειτονικού τους κόμβου. Στην περίπτωση που απαιτούνται περισσότεροι του ενός κόμβοι για να μεταδοθούν τα δεδομένα στον προορισμό τους, οι ενδιάμεσοι κόμβοι παίζουν τον ρόλο του διαβιβαστή.

Η διαδικασία εύρεσης των διαδρομών που πρέπει να ακολουθήσουν τα δεδομένα για να μεταφερθούν από τον ένα κόμβο του δικτύου στον άλλο ονομάζεται δρομολόγηση και είναι από τις βασικότερες λειτουργίες που πρέπει να υποστηρίξει ένα τέτοιο δίκτυο, ενώ αποτελεί βασικό ερευνητικό θέμα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών κάνουν μη αποδοτική την εφαρμογή των ήδη γνωστών πρωτοκόλλων δρομολόγησης και είναι απαραίτητη η δημιουργία νέων, σχεδιασμένων να λειτουργούν ειδικά σε αυτού του τύπου τα δίκτυα. Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί και κατατεθεί διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης, στην ομάδα εργασίας MANET, της οποίας ο στόχος είναι η προτυποποίηση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης για τα δίκτυα αυτά. Στην εργασία αυτή περιγράφουμε τα σημαντικότερα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν προταθεί και τα κατηγοριοποιούμε σύμφωνα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

Μελετούμε διεξοδικά το σημαντικότερο από αυτά, τον αλγόριθμο δυναμικής δρομολόγησης πηγής (Dynamic Source Routing). Ο αλγόριθμος αυτός είναι ένα απλό και αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης σχεδιασμένο ειδικά για χρήση πάνω από ασύρματα δίκτυα ad-hoc πολλαπλών συνδέσεων στα οποία οι κόμβοι κινούνται. Ο DSR επιτρέπει στο δίκτυο, στο οποίο χρησιμοποιείται, να είναι πλήρως αυτόνομο τόσο στη διαδικασία οργάνωσης, όσο και στη διαδικασία δρομολόγησης, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία κάποιας προϋπάρχουσας δικτυακής υποδομής ή διαχείρισης του δικτύου.

Η μελέτη του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου δημιούργησε πολλά ερωτηματικά σχετικά με την απόδοσή του. Αν και προτείνονται πολλοί τρόποι βελτίωσης του πρωτοκόλλου, στη συγκεκριμένη εργασία μελετάμε, παρουσιάζουμε και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσπάθειας βελτίωσης της απόδοσης του πρωτοκόλλου δρομολόγησης DSR, χρησιμοποιώντας τεχνικές καλύτερης διαχείρισης των αποθηκευμένων πληροφοριών δρομολόγησης στις Route Caches των κόμβων του δικτύου. Αρχικά μελετάμε το χρόνο ζωής των διαδρομών διαφορετικού μήκους σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο. Συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν από τη μαθηματική ανάλυση και συμπεραίνουμε ότι η χρήση του χρόνου ζωής αποτρέπει το πρωτόκολλο να χρησιμοποιεί διαδρομές οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν λάθη και μάλιστα χρονοβόρα. Στη συνέχεια υλοποιήσαμε στο μοντέλο του DSR στο OPNET την τεχνική της βελτίωσης στη χρήση των αποθηκευμένων πληροφοριών δρομολόγησης. Συγκεκριμένα επεκτείναμε τις λειτουργίες της Route Cache του μοντέλου, ούτως ώστε να μην χρησιμοποιεί μία διαδρομή πέραν του προβλεπόμενου χρόνου ζωής της. Αναπτύχθηκε αλγόριθμος ο οποίος εκτιμά το χρόνο ζωής των διαδρομών κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου και χρησιμοποιεί την εκτίμηση στη διαδικασία της δρομολόγησης.

Επιβεβαιώνουμε, ότι η χρήση της παραμέτρου Time-To-Live (TTL) των αποθηκευμένων διαδρομών δρομολόγησης επιτυγχάνει σημαντικές βελτιώσεις: α) στη μείωση της συνολική καθυστέρησης μετάδοσης των δεδομένων, β) στη αύξηση της διαπερατότητας του δικτύου (throughput) και γ) στη μείωση του ποσοστού λανθασμένων πληροφοριών που υπάρχουν σε μία Route Cache.

## 1.2. Δομή της Εργασίας

Στην συγκεκριμένη εργασία αρχικά θα μιλήσουμε για τα ασύρματα δίκτυα ad-hoc. Αρχικά στο δεύτερο κεφάλαιο θα δώσουμε τον ορισμό, θα περιγράψουμε τα μοντέλα λειτουργίας τους, θα μιλήσουμε για τους τύπους κίνησης των κόμβων και θα περιγράψουμε τις κυριότερες εφαρμογές που υπάρχουν στα δίκτυα ad-hoc. Στο τρίτο κεφάλαιο θα περιγράψουμε το πρόβλημα της δρομολόγησης και θα προσπαθήσουμε να κατηγοριοποιήσουμε τα σημαντικότερα πρωτοκόλλα δρομολόγησης που υπάρχουν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας θα περιγράψουμε το πρωτόκολλο δυναμικής δρομολόγησης, τις βασικές λειτουργίες και ιδιότητες αυτού. Θα περιγράψουμε και τον τρόπο χρήσης της Route Cache όπως τον ορίζει το πρωτόκολλο. Στο επόμενο κεφάλαιο θα μιλήσουμε για το θέμα χρήσης τεχνικών αποθήκευσης πληροφοριών δρομολόγησης και θα αναφέρουμε τρόπους αποδοτικής βελτίωσης του μηχανισμού αυτού. Θα εστιάσουμε στην διαδικασία βελτιστοποίησης της απόδοσης του πρωτοκόλλου DSR με την χρήση της παραμέτρου TTL, που περιγράφει τον εκτιμώμενο χρόνο ζωής μίας διαδρομής. Θα περιγράψουμε τρόπους μαθηματικού υπολογισμού της παραμέτρου αυτής, από την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Στο έκτο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο περιβάλλον προσομοίωσης και εκτέλεσης των πειραμάτων. Θα περιγράψουμε το μοντέλο του DSR στο OPNET που χρησιμοποιήσαμε για την εκτέλεση των πειραμάτων και την συλλογή των αποτελεσμάτων. Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφουμε την αμέθοδο που προτείνουμε για την βελτίωση της απόδοσης του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης πηγής DSR και αναλύουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρουμε την μελλοντική δουλειά που πρέπει να γίνει στο πεδίο των ασύρματων δικτύων ad-hoc, και ειδικότερα στην επίλυση του προβλήματος της δρομολόγησης.

## **Κεφάλαιο 2**

### **ΑΣΥΡΜΑΤΑ AD-HOC ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ**

#### **2. Ασύρματα ad-hoc δίκτυα**

##### **2.1. Ορισμός ενός ασύρματου ad-hoc δικτύου**

Ένα ad-hoc ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο αποτελείται από δύο ή περισσότερους κινητούς κόμβους, υπολογιστικές συσκευές (φορητούς υπολογιστές, υπολογιστές χειρός, κινητά τηλέφωνα κ.τ.λ.), οι οποίοι έχουν δυνατότητα για ασύρματη μετάδοση και λήψη δεδομένων. Οι συσκευές μέσα σε ένα τέτοιο δίκτυο έχουν την δυνατότητα επικοινωνίας με οποιαδήποτε άλλη συσκευή, η οποία βρίσκεται στην εμβέλεια τους ή στην εμβέλεια μιας γειτονικής τους συσκευής. Στην πρώτη περίπτωση η επικοινωνία γίνεται απευθείας μεταξύ των δύο κόμβων, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η επικοινωνία γίνεται με τη χρήση ενός ή περισσότερων ενδιάμεσων κόμβων, οι οποίοι αναλαμβάνουν την μεταγωγή των δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη.

Ένα ad-hoc ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο έχει την δυνατότητα να δημιουργείται δυναμικά και αυτόνομα χωρίς να χρειάζεται την παρουσία άλλων ενεργών και μη ενεργών δικτυακών συσκευών και μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά στις εκάστοτε συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι έχει την ικανότητα να ξανά-προσαρμόζεται και να δημιουργείται από την αρχή και οι ίδιοι οι κόμβοι, που αποτελούν το δίκτυο, αναλαμβάνουν και την διαχείριση των πόρων και την επιτέλεση των λειτουργιών του. Ο όρος ad-hoc σημαίνει ότι το δίκτυο μπορεί να πάρει πολλές μορφές, να αποτελείται από κόμβους που κινούνται στο χώρο, να λειτουργεί αυτόνομα και να είναι διασυνδεδεμένο με κάποιο άλλο δίκτυο. Οι συσκευές που μετέχουν σε ένα τέτοιο δίκτυο, πρέπει να μπορούν να αντιλαμβάνονται την παρουσία άλλων συσκευών, που θα μπορούσαν να συμμετέχουν στο ίδιο δίκτυο, καθώς και να μπορούν να ενεργοποιήσουν τις κατάλληλες διαδικασίες, πρωτόκολλα διασύνδεσης, ούτως ώστε να είναι αυτό εφικτό, με απώτερο σκοπό την επικοινωνία, την ανταλλαγή δεδομένων και την χρήση των υπηρεσιών του δικτύου.

## 2.2. Μοντέλα Λειτουργίας Ad-hoc ασύρματων δικτύων

Τα ασύρματα δίκτυα ad-hoc αποτελούνται από κινητούς κόμβους οι οποίοι πρέπει να επιτελέσουν επιπλέον έργο για να μπορέσει το δίκτυο να λειτουργήσει. Στην περίπτωση που μας αφορά, οι κόμβοι των δικτύων αυτών πρέπει να φροντίσουν να εκτελούνται οι βασικές λειτουργίες ενός δικτύου για τη μεταγωγή δεδομένων μεταξύ των κόμβων του δικτύου, εργασία που στα κλασσικά δίκτυα την επιτελούν οι δρομολογητές και τα άλλα ενεργά μη τερματικά στοιχεία του δικτύου. Η καταγραφή των βέλτιστων διαδρομών, μέσω των ενεργών συνδέσεων ενός δικτύου για την μεταφορά δεδομένων, είναι από τις βασικότερες λειτουργίες που πρέπει να έχει ένα δίκτυο υπολογιστών, αφού πολύ απλά χωρίς αυτή δεν είναι δυνατό να υπάρξει.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη πρωτοκόλλων διαθέσιμα σήμερα για την δρομολόγηση δεδομένων σε ένα δίκτυο υπολογιστών, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν αρκετά ικανοποιητικά. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι σχεδιασμένα να μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα ad-hoc δίκτυο, το οποίο δεν έχει την υποδομή που έχουν τα κλασσικά δίκτυα. Πολλά από τα πρωτόκολλα που έχουμε διαθέσιμα, στα κλασσικά ενσύρματα δίκτυα, δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε δίκτυα χωρίς υποδομή. Για να είναι δυνατή η λειτουργία τους, είναι απαραίτητες αλλαγές για να μπορέσουν να προσαρμοστούν στα χαρακτηριστικά των ad-hoc δικτύων. Από παρατηρήσεις, πειράματα και προσομοιώσεις που έχουν γίνει, τα πρωτόκολλα αυτά σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να έχουν την αναμενόμενη απόδοση και σίγουρα δεν πετυχαίνουν την ίδια απόδοση με αυτή που έχουν, όταν εφαρμόζονται στα κλασσικά δίκτυα. Το γεγονός αυτό μας κάνει να πιστεύουμε ότι για να αντιμετωπίσουμε αποτελεσματικά το πρόβλημα της δρομολόγησης χρειαζόμαστε νέα πρωτόκολλα, τα οποία θα δημιουργηθούν για να λειτουργούν αποκλειστικά σε συνθήκες όπως αυτές που υπάρχουν στα ad-hoc δίκτυα.

Ένα ad-hoc δίκτυο ορίζεται σαν ένα δίκτυο, το οποίο μπορεί να υπάρχει και να λειτουργεί, χωρίς να είναι αναγκαία η διασύνδεση του με κάποια υπάρχουσα δικτυακή υποδομή ή διαχείριση, και επιτρέπει στους κόμβους που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό να επιτελέσουν όποιες λειτουργίες επιθυμούν για την ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών. Σαν παράδειγμα μπορούμε να πούμε ότι ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο, πολύ απλά, μπορεί να δημιουργηθεί όταν σε ένα χώρο, πχ ένα δωμάτιο, ανοίγουν

κάποιοι φορητοί υπολογιστές, οι οποίοι διαθέτουν ασύρματες κάρτες δικτύου και μπορούν απλά ενεργοποιώντας τις να μπορέσουν να σχηματίσουν ένα ασύρματο δίκτυο μεταξύ τους, για να ανταλλάξουν δεδομένα.

### **2.3. Κινητικότητα κόμβων**

Όπως γνωρίζουμε στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα οι κόμβοι μπορούν να κινούνται. Αυτό είναι ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτού του τύπου και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια κάθε ερευνητικής μελέτης πάνω στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Για να μπορέσουμε να συμπεριλάβουμε το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό των κόμβων στις διάφορες προσομοιώσεις, έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα κίνησης των κόμβων, με τα οποία μπορούμε να προσομοιώσουμε, κατά το δυνατό, την κίνηση που θα είχαν οι κόμβοι, εάν λειτουργούσαν σε ένα πραγματικό δίκτυο. Τα διάφορα μοντέλα που υπάρχουν βασίζονται κυρίως σε στατιστικές μελέτες γύρω από την κίνηση των ad-hoc κόμβων.

Τα μοντέλα κινητικότητας των κόμβων των ad-hoc ασύρματων δικτύων είναι από τις σημαντικές δομικές μονάδες μιας προσομοίωσης, σύμφωνα με τις μελέτες που έχουν γίνει πάνω στα ασύρματων αυτά δίκτυα. Οι ερευνητές μπορούν να επιλέξουν από μία ποικιλία μοντέλων, που έχουν αναπτυχθεί για την περιοχή των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και κατ' επέκταση και των ασύρματων ad-hoc δικτύων. Σχετική βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο θέμα μπορεί να βρεθεί στο [Bettstetter 2001].

### **2.4. Εφαρμογές Mobile ασύρματων Ad-hoc δικτύων**

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές στα κινητά ad-hoc ασύρματα δίκτυα. Στην πραγματικότητα οποιαδήποτε καθημερινή εφαρμογή όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και η μεταφορά αρχείων, μπορεί να θεωρηθεί εύκολα υλοποιήσιμη μέσα σε ένα περιβάλλον ad-hoc δικτύων. Οι υπηρεσίες του παγκόσμιου ιστού είναι επίσης δυνατόν να λειτουργήσουν σε περίπτωση που οποιοσδήποτε κόμβος στο ad-hoc δίκτυο μπορεί να χρησιμεύσει ως μια πύλη προς το διαδίκτυο.

Δεν χρειάζεται να υπογραμμίσουμε το ευρύ φάσμα των στρατιωτικών εφαρμογών που έχουν δημιουργηθεί για τα ειδικά δίκτυα. Η τεχνολογία δικτύων αυτού του τύπου αναπτύχθηκε αρχικά λαμβάνοντας υπόψη στρατιωτικές εφαρμογές, ειδικά στο πεδίο



μάχη όπου ένα κλασικό δίκτυο με προϋπάρχουσα υποδομή είναι σχεδόν αδύνατο να υπάρξει. Τα ad-hoc δίκτυα έχουν την ικανότητα της αυτό-δημιουργίας και αυτονομίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου άλλες τεχνολογίες είτε αποτυγχάνουν είτε δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Τα προηγμένα σύγχρονα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των ασύρματων ad-hoc δικτύων, όπως το μεγάλο εύρος ζώνης του ασύρματου καναλιού, που τα κάνει συμβατά με τις εφαρμογές πολυμέσων, την ικανότητα μεταγωγής (roaming) και τέλος το συντονισμό και την ικανότητα συνεργασία με άλλες δομές δικτύων, δημιουργούν την ανάγκη σχεδιασμού και υλοποίησης νέων εφαρμογών.

Μερικές γνωστές εφαρμογές των ad-hoc δικτύων είναι:

- Συλλογική συνεργασία (Collaborative Work) – Με τον όρο αυτό περιγράφουμε όλες τις περιπτώσεις όπου οι άνθρωποι επιθυμούν να ανταλλάξουν δεδομένα, για να μπορέσουν να εργαστούν και να συνεργαστούν για την ολοκλήρωση συγκεκριμένων διεργασιών, είτε αυτές έχουν να κάνουν με την εργασία τους είτε με την διασκέδαση τους. Η ανάγκη για επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων είναι κρισιμότερο να συμβεί σε εξωτερικό περιβάλλον και χώρο και όχι στα γραφεία, στα σπίτια ή όπου αλλού είναι δυνατή η χρησιμοποίηση κλασικών δικτύων. Τα ad-hoc δίκτυα έρχονται να ικανοποιήσουν ακριβώς αυτή την ανάγκη και να δώσουν λύση στο πρόβλημα της επικοινωνίας των υπολογιστικών συστημάτων, χωρίς αυτά να είναι απαραίτητα συνδεδεμένα σε κάποια δικτυακή υποδομή.
- Οι εφαρμογές διαχείρισης κρίσεων (Crisis Management Applications) – Οι εφαρμογές αυτές έρχονται να υποστηρίξουν τους μηχανισμούς αντιμετώπισης κρίσεων που καλούνται να αντιμετωπίσουν, παραδείγματος χάριν φυσικές καταστροφές, όπου η τηλεπικοινωνιακή υποδομή μπορεί να είναι εκτός λειτουργίας και η γρήγορη αποκατάσταση της είναι σημαντικά κρίσιμη. Με τη χρησιμοποίηση των ad-hoc δικτύων, μια προσωρινή υποδομή θα μπορούσε να οργανωθεί σε ώρες αντί για ημέρες ή εβδομάδες, που θα απαιτούνταν για τα κλασικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Επίσης τα ad-hoc δίκτυα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση και διάσωση πολιτών που βρίσκονται εγκλωβισμένοι, πχ σε ένα κτίριο ή μια υπόγεια σήραγγα, μετά από μια μεγάλη καταστροφή όπως ένα σεισμό.

- Δίκτυα μικρής εμβέλειας, προσωπικά ασύρματα δίκτυα, Bluetooth (Personal Area Networks (PAN), Bluetooth) – Ένα PAN είναι ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο μικρής εμβέλειας, του οποίου οι κόμβοι βρίσκονται κοντά σε ένα άτομο, και συνήθως είναι εγκατεστημένοι στα ρούχα του ή σε προσωπικά του αντικείμενα.

## Κεφάλαιο 3

### ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ AD-HOC

#### 3. Δρομολόγηση, ορισμός προβλήματος

Είναι σαφές ότι η δρομολόγηση σε ένα Mobile Ad-Hoc δίκτυο (MANET) είναι εγγενώς διαφορετική από την δρομολόγηση στα κλασικά ενσύρματα δίκτυα. Η δρομολόγηση σε ένα τέτοιο δίκτυο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένης της τοπολογίας των κόμβων, της επιλογής των διαδρομών, της κινητικότητας των κόμβων του δικτύου, την πρωτοβουλία έκδοσης ενός νέου αιτήματος δρομολόγησης και άλλων χαρακτηριστικών που θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν στην εύρεση των βέλτιστων διαδρομών γρήγορα και αποτελεσματικά. Η μικρή διαθεσιμότητα πόρων στα ad-hoc ασύρματα δίκτυα απαιτεί αποδοτική χρησιμοποίηση τους και ως εκ τούτου επιβάλλει την βέλτιστη δρομολόγηση των δεδομένων. Επίσης, η ιδιαίτερα δυναμική φύση των ad-hoc δικτύων επιβάλλει την ύπαρξη αυστηρών περιορισμών στη δρομολόγηση των πρωτοκόλλων που σχεδιάζονται συγκεκριμένα για αυτά, επηρεάζοντας κατά συνέπεια τις κατευθύνσεις στην μελέτη και έρευνα που συντελείται γύρω από αυτά τα πρωτόκολλα. Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στο σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης [Jubin 1987] για ένα ad-hoc δίκτυο είναι το γεγονός ότι, από τη μια πλευρά, κάθε κόμβος του δικτύου πρέπει να κατέχει πληροφορίες τουλάχιστον για τις ενεργές συνδέσεις με τους γείτονές του για τον καθορισμό μιας διαδρομής και αφ' ετέρου η τοπολογία των δικτύων αυτών μπορεί να αλλάξει αρκετά συχνά με αποτέλεσμα να αλλάζει και το σύνολο των γειτόνων του κάθε κόμβου. Επιπλέον, καθώς ο αριθμός των κόμβων του δικτύου μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος, η εύρεση μιας διαδρομής προς κάποιο προορισμό απαιτεί επίσης τη συχνή ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης μεταξύ των κόμβων. Κατά συνέπεια, ο όγκος των νέων πληροφοριών δρομολόγησης είναι αρκετά μεγάλος και αυξάνεται όταν στο δίκτυο υπάρχουν κόμβοι υψηλής κινητικότητας. Οι κόμβοι αυτοί μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες καθυστερήσεις και συμφόρηση στο ασύρματο κανάλι κάνοντας αδύνατη ή πολύ δύσκολη την μετάδοση πραγματικών δεδομένων [Corson 1996].

### **3.1. Το πρόβλημα της δρομολόγησης στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα**

Το πρόβλημα της δρομολόγησης σε ένα ασύρματο ad-hoc τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, το οποίο αποτελείται από κινητούς κόμβους, ορίζεται ως η διαδικασία εύρεσης μιας διαδρομής από έναν κόμβο του δικτύου προς ένα άλλο κόμβο του ίδιου δικτύου με σκοπό την μεταφορά δεδομένων. Ως διαδρομή σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο ορίζουμε την ακολουθία των κόμβων μέσω των οποίων θα διαβιβαστούν τα πακέτα δεδομένων στον προορισμό τους. Υποθέτουμε ότι οι κόμβοι, στο δίκτυο αυτό, δεν μπορούν να μεταβιβάσουν απευθείας τα δεδομένα ο ένας στον άλλο, λόγω της περιορισμένης εμβέλειας του ασύρματου πομπού και γι' αυτό χρησιμοποιούνται ενδιάμεσοι κόμβοι για να μπορέσουν να μεταδοθούν τα δεδομένα στον προορισμό τους. Οι κόμβοι σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούν και κινούνται, με αποτέλεσμα η θέση τους στο δίκτυο να αλλάζει συνεχώς. Καθώς αλλάζει η θέση τους, αλλάζει και η κατάσταση του δικτύου, άλλες συνδέσεις γίνονται ενεργές, άλλες ανενεργές, νέοι κόμβοι εισέρχονται και προσθέτονται στο δίκτυο, ενώ άλλοι απομακρύνονται και αποβάλλονται. Το γεγονός αυτό επιβάλλει οι κόμβοι του δικτύου άλλες φορές να παίζουν το ρόλο τερματικών κόμβων, που είναι είτε οι κόμβοι προέλευσης είτε οι κόμβοι του προορισμού των πακέτων, που ταξιδεύουν στο δίκτυο και άλλες το ρόλο των δρομολογητών ή των μεταγωγέων, που φροντίζουν να προωθήσουν πακέτα, που δεν προορίζονται γι' αυτούς στους κόμβους προορισμού. Για το λόγο αυτό, σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο είναι απαραίτητο ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, για να διατηρηθούν οι βασικές λειτουργίες του δικτύου, τις οποίες τώρα έχουν επιφορτιστεί οι κόμβοι.

### **3.2. Δρομολόγηση στο επίπεδο των συνδέσεων**

Στη δρομολόγηση στο επίπεδο συνδέσεων κάθε κόμβος διατηρεί μια άποψη της τοπολογίας του δικτύου με ένα βάρος για κάθε σύνδεση. Κάθε κόμβος μεταδίδει σε όλους του υπόλοιπους κόμβους περιοδικά τις πληροφορίες δρομολόγησης που κατέχει, τις οποίες λαμβάνουν οι υπόλοιποι κόμβοι του δικτύου και ενημερώνουν του πίνακες με τις δικές τους πληροφορίες δρομολόγησης. Στη συνέχεια εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο εύρεσης της συντομότερης διαδρομής επιλέγουν τον επόμενο κόμβο για κάθε ξεχωριστό προορισμό. Ασυνεπείς απόψεις της τοπολογίας του δικτύου μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό βρόχων στις διαδρομές, πράγμα που επηρεάζει την

απόδοση του αλγόριθμου δρομολόγησης και σκοπός είναι ο εντοπισμός και η απαλοιφή αυτών.

### **3.3. Δρομολόγηση με την χρήση του διανύσματος της απόστασης**

Κάθε κόμβος κοιτάει μόνο το κόστος των εξερχόμενων συνδέσεων του και αντί της μετάδοσης αυτών των πληροφοριών σε όλους τους κόμβους, μεταδίδει περιοδικά σε κάθε ένα από τους γείτονές του την διαιά του εκτίμηση της πιο σύντομης διαδρομής προς κάθε άλλο κόμβο στο δίκτυο. Οι κόμβοι που λαμβάνουν την πληροφορία αυτή την χρησιμοποιούν για να υπολογίσουν εκ νέου τις διαδρομές προς όλους τους κόμβους του δικτύου, χρησιμοποιώντας ενός αλγορίθμου εύρεσης των συντομότερων μονοπατιών.

### **3.4. Δρομολόγηση πηγής**

Η δρομολόγηση πηγής περιγράφει ότι κάθε πακέτο έχει ενσωματωμένο το πλήρες μονοπάτι προς τον κόμβο προορισμού. Ο ενδιαφερόμενος κόμβος συλλέγει όλες τις δυνατές επιλογές διαδρομών και επιλέγει την καλύτερη, σύμφωνα με ένα μέτρο σύγκρισης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι είναι πολύ εύκολο να αποφευχθούν οι κυκλικοί βρόχοι στις διαδρομές δρομολόγησης, αφού ο κόμβος που επιλέγει μια διαδρομή μπορεί να εξασφαλίσει ότι δεν περιέχει βρόγχους. Το μειονέκτημα είναι ότι για κάθε πακέτο απαιτείται μία μικρή αρχική καθυστέρηση για την εύρεση μιας διαδρομής.

### **3.5. Τεχνική πλημμύρας**

Πολλά πρωτοκόλλα δρομολόγησης για να μεταδώσουν πληροφορίες δρομολόγησης, τις εκπέμπουν από τον κόμβο προέλευσης προς όλους τους άλλους κόμβους του δικτύου με την τεχνική της πλημμύρας. Η τεχνική αυτή είναι μια ευρέως χρησιμοποιημένη μορφή ασύρματης μετάδοσης και λειτουργεί ως εξής. Ο κόμβος προέλευσης στέλνει τις πληροφορίες του στους γείτονές του (στην ασύρματη περίπτωση, αυτό σημαίνει, σε όλους τους κόμβους που είναι μέσα στη εμβέλεια του πομπού). Οι γείτονες αναμεταδίδουν στους γείτονές τους τις πληροφορίες που λαμβάνουν. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου οι πληροφορίες δρομολόγησης παραληφθούν από όλους τους κόμβους του δικτύου. Ένας κόμβος αναμεταδίδει κάθε πακέτο μόνο μια φορά. Αν λάβει ξανά πακέτο που έχει ήδη προωθήσει απλά το αγνοεί και για να το

εξασφαλίσει αυτό χρησιμοποιεί έναν αριθμό ο οποίος αυξάνεται για κάθε νέο πακέτο που ο κόμβος στέλνει.

### **3.6. Proactive versus Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης**

Στα πρωτόκολλα δρομολόγησης βασική λειτουργία είναι η διαδικασία εύρεσης των διαδρομών ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου. Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα ερευνητικά θέματα, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, είναι το εάν οι κόμβοι σε ένα ad-hoc δίκτυο θα πρέπει να κρατούν στοιχεία για κάθε δυνατή διαδρομή ανάμεσα σε δύο οποιοδήποτε κόμβους του δικτύου ή θα πρέπει να κρατούν στοιχεία μόνο για τις διαδρομές εκείνες που είναι άμεσου ή μεγάλου ενδιαφέροντος. Στην πράξη αυτό που συμβαίνει είναι ότι οι κόμβοι του δικτύου δεν χρειάζονται κάποια διαδρομή προς ένα άλλο κόμβο παρά μόνο στην περίπτωση που χρειαστούν να στείλουν δεδομένα προς αυτόν, είτε αυτός είναι ο κόμβος προορισμού των δεδομένων, είτε είναι ένας ενδιάμεσος κόμβος που πρέπει να περάσουν τα δεδομένα για να φτάσουν στον τελικό προορισμό τους. Η έρευνα και η ανάλυση που γίνεται, πάνω σε διάφορα σενάρια και πρωτόκολλα έχει ως στόχο να αποδείξει ποια από τις δύο απόψεις είναι η πιο αποδοτική και γιατί.

Τα πρωτόκολλα τα οποία κρατούν στοιχεία για όλες τις πιθανές διαδρομές που μπορεί να χρειαστούν οι κόμβοι σε ένα δίκτυο έχουν το πλεονέκτημα ότι όταν ζητηθεί μία συγκεκριμένη διαδρομή, από οποιοδήποτε σημείο του δικτύου σε οποιοδήποτε άλλο, αυτή θα υπάρχει και θα προωθηθεί προς χρήση χωρίς καθυστέρηση. Με άλλα λόγια όποια διαδρομή και αν επιθυμούμε να ζητήσουμε προς χρήση, αν υπάρχει, θα μπορούμε να την έχουμε στη διάθεση μας χωρίς να περιμένουμε, επειδή η διαδικασία αναζήτησης έχει ήδη ολοκληρωθεί και τα αποτελέσματα βρίσκονται έτοιμα προς χρήση. Τέτοια πρωτόκολλα ονομάζονται proactive και το βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι περιοδικά αναζητούν όλες τις πιθανές διαδρομές προς κάθε κόμβο του δικτύου, για να μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν όποια στιγμή τις χρειαστούν.

Από την άλλη μεριά έχουμε τα πρωτόκολλα τα οποία ενεργοποιούν την διαδικασία εύρεσης ενός μονοπατιού (διαδρομής) από ένα κόμβο σε ένα άλλο, μόνο όταν εκδοθεί από τον ενδιαφερόμενο κόμβο ανάλογο αίτημα. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι φυσικό να κάνουν σαφώς μικρότερη χρήση του εύρους καναλιού σε σχέση με τα προηγούμενα πρωτόκολλα για την εύρεση των ζητούμενων διαδρομών. Έχουν όμως το σημαντικό μειονέκτημα της αρχικής καθυστέρησης κάθε φορά που ζητείται μία διαδρομή, αφού

πριν προωθηθεί στον αιτούντα κόμβο πρέπει να ενεργοποιηθεί η διαδικασία εύρεσης και μετά να τον εξυπηρετήσουν.

### **3.7. Ομάδα εργασίας MANET**

Ο σκοπός αυτής της ομάδας εργασίας είναι η τυποποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης IP, κατάλληλα για την εφαρμογή τους σε ασύρματα στατικά και δυναμικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα επικοινωνιών. Η θεμελιώδης σχεδιαστική αρχή των πρωτοκόλλων αυτών είναι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που έχουν οι ασύρματες συνδέσεις σε ένα δίκτυο και το πώς αυτά μπορούν να επηρεάσουν ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης. Η δρομολόγηση σε ένα δυναμικό ασύρματο δίκτυο επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από παράγοντες όπως, οι σχετικές θέσεις των κόμβων στο δίκτυο, η κίνηση των κόμβων, η εμβέλεια των ασύρματων πομποδεκτών, τα φυσικά εμπόδια ή άλλες πηγές παρεμβολής που μπορεί να επηρεάζουν την μετάδοση. Τα χαρακτηριστικά αυτά και άλλα τα οποία δεν αναφέρουμε, έχουν σαν αποτέλεσμα η δρομολόγηση να πρέπει να εκτελείται δυναμικά κάτω από διαφορετικές συνθήκες κάθε φορά. Το ζητούμενο λοιπόν και ο στόχος της συγκεκριμένης ομάδας εργασίας είναι η έρευνα και η μελέτη υποψήφιων πρωτοκόλλων δρομολόγησης, τα οποία θα μπορούν να ικανοποιούν τις ιδιαίτερες ανάγκες που παρουσιάζουν τα ασύρματα δίκτυα.

Στο παρελθόν αυτή η ομάδα εργασίας έχει εστιάσει την έρευνα της σε μια ευρεία σειρά από προβλήματα και ζητήματα απόδοσης των σχετικών υποψηφίων πρωτοκόλλων. Πλέον όμως ο σκοπός της είναι η συγκέντρωση και η προώθηση των προδιαγραφών διάφορων πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε μορφή RFC (Request For Comments). Μερικά από τα πρωτόκολλα αυτά είναι ο AODV, ο DSR, ο OLSR και το TBRPF. Τα πρωτόκολλα που αναφέραμε είναι αυτά τα οποία παρέμειναν υποψήφια για την έκδοση του τελικού προτύπου, μέσα από μια πλειάδα προτάσεων και υποψηφιοτήτων. Μπορούμε να πούμε ότι είναι τα περισσότερο ώριμα πρωτόκολλα, όσο αφορά την κατανόηση και εφαρμογή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των MANETs, κάτι που βρίσκουμε σε κάθε ένα από αυτά τα πρωτόκολλα. Αν και αυτά παρέχουν ένα βασικό σύνολο πρωτοκόλλων που καλύπτουν τις απαιτήσεις των MANETs, απαιτείται περισσότερη εμπειρία και πειραματισμός για την απόκτηση μιας καλύτερης άποψης για την συνολική τους απόδοση. Τελικός σκοπός της ομάδας εργασίας αυτής είναι λοιπόν να συντονίσει όλη αυτή την συζήτηση και έρευνα και να βοηθήσει στην καλύτερη και

γρηγορότερη αξιοποίηση των γνώσεων και των συμπερασμάτων που εξάγονται από την έρευνα που γίνεται από πολλές ομάδες πάνω στην δρομολόγηση στα Mobile Ad-hoc Networks [MANET].

Πάνω σε αυτή τη βάση η ομάδα εργασίας μετά την ολοκλήρωση της έρευνας και της εξαγωγής των συμπερασμάτων και των αποτελεσμάτων θα προσπαθήσει να σχεδιάσει, να αναπτύξει και να καθιερώσει ένα σύνολο κοινών χαρακτηριστικών δρομολόγησης, που πρέπει να έχει κάθε αλγόριθμος δρομολόγησης σε ένα ad-hoc mobile δίκτυο και θα το καταθέσει στον διεθνή οργανισμό Internet Standards. Οι γνώσεις που θα αποκτηθούν από την έρευνα στα υπάρχοντα πρωτόκολλα θα χρησιμοποιηθούν σαν βάση για την δημιουργία των σχεδιαστικών αρχών, για να προκύψει ένα νέο πρωτόκολλο δρομολόγησης, που θα είναι καθολικά αποδεκτό και αποδοτικό σε κάθε περίπτωση [MANET].

Ως τμήμα αυτής της προσπάθειας η ομάδα εργασίας θα εξετάσει τις πτυχές της ασφάλειας και του ελέγχου συμφόρησης στα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Σήμερα, την στιγμή συγγραφής της εργασίας αυτής παραμένουν δύο υποβληθέντα Internet-Drafts που περιγράφουν δύο πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα ασύρματα ad-hoc δίκτυα.

- The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)
- Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)

Επίσης με την μορφή RFCs (Request for Comments) υπάρχουν τα παρακάτω πρωτόκολλα:

- Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations (RFC 2501)
- Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing (RFC 3561)
- Optimized Link State Routing Protocol (RFC 3626)



### **3.8. Περιγραφή πρωτοκόλλων δρομολόγησης των MANET's.**

#### ***3.8.1. Proactive και Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης***

Τα ad-hoc πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν ως Proactive και Reactive. Τα πρώτα εξουσιοδοτούν τους κόμβους σε ένα ad-hoc κινητό δίκτυο να ανακαλύπτουν και να γνωρίζουν τις διαδρομές προς όλους τους πιθανούς προορισμούς του δικτύου έτσι ώστε, όταν πρέπει να διαβιβαστεί ένα πακέτο, να είναι ήδη γνωστή η διαδρομή που αυτό πρέπει να ακολουθήσει. Τα πρωτόκολλα της δεύτερης κατηγορίας υιοθετούν μια διαφορετική προσέγγιση με την οποία οι κόμβοι ανακαλύπτουν μόνο τις διαδρομές προς αυτούς τους προορισμούς, για τους οποίους γίνεται σχετική αίτηση εύρεσης μιας διαδρομής. Ένας κόμβος δεν χρειάζεται να γνωρίζει μια διαδρομή προς ένα προορισμό, παρά μόνο όταν πακέτα δεδομένων τα οποία πρέπει να προωθήσει, έχουν σαν τελικό προορισμό τους τον κόμβο αυτό. Τα proactive πρωτόκολλα έχουν το πλεονέκτημα ότι ένας κόμβος υπόκειται στην ελάχιστη καθυστέρηση για την απόκτηση μιας διαδρομής, αφού αυτή αν υπάρχει θα είναι διαθέσιμη στους πίνακες δρομολόγησης του συγκεκριμένου κόμβου. Εντούτοις τα πρωτόκολλα αυτά δεν είναι αποδοτικά σε όλες τις περιπτώσεις και σενάρια χρήσης, δεδομένου ότι χρησιμοποιούν ένα ουσιαστικό μέρος των πόρων του δικτύου για την διατήρηση και ανανέωση των πληροφοριών δρομολόγησης που γνωρίζουν οι κόμβοι. Για να αντιμετωπίσουν ακριβώς αυτό το μειονέκτημα, τα re-active πρωτόκολλα υιοθετούν την προσέγγιση της εύρεσης μιας διαδρομής για έναν προορισμό μόνο όταν αυτό απαιτείται. Τα re-active πρωτόκολλα καταναλώνουν πολύ λιγότερους πόρους σε σχέση με τα προηγούμενα, αλλά η αρχική καθυστέρηση εύρεσης μιας διαδρομής μπορεί να είναι σημαντικά μεγάλη και μπορεί να είναι, αν όχι μεγαλύτερη, συγκρίσιμη με τον χρόνο που απαιτείται για την μεταφορά των πραγματικών δεδομένων ανάμεσα σε δύο κόμβους. Εν συντομία, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι κανένα πρωτόκολλο δεν είναι υλοποιημένο να λειτουργεί το ίδιο αποδοτικά και αποτελεσματικά σε όλα τα πιθανά δικτυακά περιβάλλοντα και γι' αυτό έχουν γίνει προτάσεις που χρησιμοποιούν υβριδικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.

#### ***3.8.2. Proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης***

Σε αυτό το τμήμα εξετάζουμε μερικά από τα σημαντικότερα proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης.

### 3.8.2.1. *Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol*

Το (DSDV) [ Perkins 1994 ] είναι ένα δυναμικό πρωτόκολλο, που χρησιμοποιεί διανυσματικές αποστάσεις, βάση των συνδέσεων από τις οποίες αποτελείται κάθε διαδρομή, για την δρομολόγηση των δεδομένων σε ένα ad-hoc δίκτυο. Απαιτεί από κάθε κόμβο να μεταδίδει περιοδικά αναπροσαρμοσμένες πληροφορίες δρομολόγησης στους άλλους κόμβους του δικτύου. Κάθε κινητός κόμβος στο δίκτυο, διατηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης για όλους τους πιθανούς προορισμούς μέσα στο δίκτυο και τον αριθμό των απαιτούμενων συνδέσεων (hops) προς κάθε προορισμό. Κάθε καταχώρηση στον πίνακα αυτόν είναι μαρκιαρισμένη με έναν αριθμό ακολουθίας, που ορίζεται από τον κόμβο προορισμού. Οι αριθμοί ακολουθίας επιτρέπουν στους κόμβους να διακρίνουν τις διαδρομές που είναι αποθηκευμένες και διατηρημένες στους πίνακες δρομολόγησης για μεγάλο χρονικό διάστημα, από τις καινούριες διαδρομές, αποφεύγοντας, παράλληλα, με τον τρόπο αυτόν την δημιουργία βρόχων στα μονοπάτια δρομολόγησης. Περιοδικά, σε όλους τους κόμβους του δικτύου, μεταδίδονται ανανεωμένες πληροφορίες δρομολόγησης με σκοπό την διατήρηση της συνέπειας των δεδομένων που βρίσκονται αποθηκευμένα στους πίνακες δρομολόγησης στους κόμβους του ad-hoc δικτύου.

Για να αποτρέψουν την κυκλοφορία στο δίκτυο μεγάλου όγκου πληροφοριών δρομολόγησης, οι αναπροσαρμογές των διαδρομών μπορούν να χρησιμοποιήσουν δύο τύπους πακέτων για να προωθήσουν στους κόμβους του δικτύου τις νέες πληροφορίες, «πλήρεις μεταδόσεις όλων των καταχωρήσεων ενός πίνακα ή επιλεκτικές μεταδόσεις των νέων καταχωρήσεων των πινάκων δρομολόγησης». Στην πρώτη περίπτωση δημιουργούνται μηνύματα πακέτων που μεταφέρουν όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες δρομολόγησης, χρησιμοποιώντας πολλαπλές μονάδες δεδομένων (network protocol data units, NPDU) για την μετάδοση των πληροφοριών. Τα πακέτα αυτά μεταδίδονται σπάνια και συνήθως κατά την περίοδο μετακίνησης των κόμβων του δικτύου. Στην δεύτερη περίπτωση μεταδίδονται μηνύματα, που περιέχουν μόνο εκείνες τις πληροφορίες δρομολόγησης που έχουν αλλάξει από την τελευταία μετάδοση όλων των καταχωρήσεων των πινάκων δρομολόγησης. Κάθε μια από αυτές τις μεταδόσεις πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα συγκεκριμένο μέγεθος πακέτων NPDU, ούτως ώστε με τον τρόπο αυτό να μειωθεί ο όγκος της κυκλοφορίας που παράγεται. Οι κινητοί κόμβοι διατηρούν έναν πρόσθετο πίνακα όπου αποθηκεύουν τα δεδομένα

δρομολόγησης που περιέχονται στα μηνύματα των καινούριων μεταδιδόμενων πληροφοριών δρομολόγησης. Οι μεταδόσεις διαδρομών δρομολόγησης περιέχουν τη διεύθυνση του προορισμού, τον αριθμό των συνδέσεων που απαιτούνται για να φθάσουν στον προορισμό τους, τον αριθμό ακολουθίας των για την διαδρομή προς τον συγκεκριμένο προορισμό, καθώς επίσης και έναν νέο αριθμό μοναδικό για τη κάθε μετάδοση. Η διαδρομή που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί είναι αυτή που περιέχει τον πιο πρόσφατο αριθμό ακολουθίας. Σε περίπτωση που υπάρχουν διαδρομές με τον ίδιο αριθμό ακολουθίας, η διαδρομή με μικρότερο μήκος χρησιμοποιείται ως βέλτιστη.

Οι κόμβοι επίσης παρακολουθούν το χρόνο εγκαθίδρυσης των διαδρομών ή το μέσο σταθμισμένο χρόνο αναμονής των διαδρομών που παραλαμβάνονται για έναν προορισμό, προτού παραληφθεί η καλύτερη διαδρομή. Με τον τρόπο αυτό καθυστερούν την μετάδοσης πληροφοριών δρομολόγησης, μειώνοντας την κυκλοφορία του δικτύου, περιμένοντας να μεταδώσουν διαδρομές που θα μπορούσαν να είναι υποψήφιος για να επιλέγουν, δηλαδή οι κόμβοι αποφεύγουν να μεταδώσουν μια διαδρομή αν πιστεύουν ότι στο άμεσο μέλλον από ένα άλλο κόμβο υπάρχει πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα να μεταδοθεί μια καλύτερη διαδρομή.

#### 3.8.2.2. *The Wireless Routing Protocol*

Το ασύρματο πρωτόκολλο δρομολόγησης (WRP) [ Murthy 1996 ] είναι ένα πρωτόκολλο που βασίζεται σε πίνακες δρομολόγησης με στόχο την εύρεση και διατήρηση πληροφοριών δρομολόγησης μεταξύ όλων των κόμβων του δικτύου. Κάθε κόμβος στο δίκτυο είναι αρμόδιος για τη διατήρηση τεσσάρων πινάκων: του πίνακα απόστασης, του πίνακα δρομολόγησης, του πίνακα κόστους των συνδέσεων των κόμβων και τέλος ενός πίνακα που περιέχει ένα κατάλογο μηνυμάτων αναμετάδοσης (Message Retransmission List MRL). Κάθε καταχώρηση του MRL περιέχει τον αριθμό ακολουθίας του μηνύματος ενημέρωσης ενός μετρητή αναμετάδοσης, ενός διανύσματος καταχωρήσεων απαιτήσεων επιβεβαιώσεων, μίας για κάθε γειτονικό κόμβο, και ενός καταλόγου ενημερώσεων διαδρομών που περιέχονται στα μηνύματα ενημέρωσης. Για την μετάδοση από ένα κόμβο των αρχείων του MRL στους γείτονες του, μέσω ενός μηνύματος ενημέρωσης, είναι απαραίτητο να λάβει από κάθε κόμβο επιβεβαίωση της ορθής τους μετάδοσης.

Οι κόμβοι ενημερώνουν ο ένας τον άλλο για τις αλλαγές των συνδέσεων μεταξύ τους, λόγω της κινητικότητας, μέσω της χρήσης των μηνυμάτων ενημέρωσης. Ένα μήνυμα ενημέρωσης στέλνεται μόνο μεταξύ γειτονικών κόμβων και περιέχει έναν κατάλογο αναπροσαρμογών (με τον προορισμό, την απόσταση από τον προορισμό, και τον προκάτοχο του προορισμού), καθώς επίσης και έναν κατάλογο με τους κόμβους που πρέπει να απαντήσουν με μια επιβεβαίωση παραλαβής των δεδομένων αυτών (Acks). Μετά την επεξεργασία των νέων πληροφοριών δρομολόγησης από τους γείτονες ή την ανίχνευση μιας αλλαγής σε μια σύνδεση, στέλνονται μηνύματα αναπροσαρμογών στους γείτονες κόμβους, περιέχοντας τις αλλαγές που έχουν ανακαλυφθεί. Σε περίπτωση απώλειας μιας σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων, οι κόμβοι στέλνουν μηνύματα ενημέρωσης στους γείτονές τους. Οι γείτονες τροποποιούν έπειτα τις καταχωρήσεις τους και ελέγχουν για νέες πιθανές διαδρομές μέσω άλλων κόμβων, για κάθε πιθανό προορισμό. Οποιοσδήποτε νέες πορείες ανακαλυφθούν, μεταδίδονται και αυτές, έτσι ώστε να μπορούν να ενημερώσουν τους πίνακές τους και οι υπόλοιποι κόμβοι του δικτύου, αναλόγως.

Οι κόμβοι μαθαίνουν για την ύπαρξη των γειτόνων τους από την παραλαβή των μηνυμάτων επιβεβαίωσης ή άλλων μηνυμάτων. Εάν ένας κόμβος δεν μεταδίδει τέτοια μηνύματα, πρέπει να στείλει ένα (HELLO) μήνυμα εντός ενός καθορισμένου χρονικού διαστήματος, για να εξασφαλίσει την διασύνδεση με τους γείτονες του. Διαφορετικά, η έλλειψη μηνυμάτων οποιουδήποτε τύπου από κάποιο κόμβο, δείχνει αποτυχία για εκείνη τη σύνδεση, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει ένα λάθος συναγερμό. Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα (HELLO) μήνυμα από έναν νέο κόμβο του δικτύου, ο νέος κόμβος προστίθεται στον πίνακα δρομολόγησης και λαμβάνει ένα αντίγραφο των πινάκων δρομολόγησης του κόμβου στον οποίο έστειλε αρχικά το (HELLO) μήνυμα.

Μία σημαντική καινοτομία του WRP είναι ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνει την απομάκρυνση των κυκλικών βρόχων στις διαδρομές δρομολόγησης. Οι κόμβοι που συμμετέχουν στη διαδικασία δρομολόγησης επιβάλλεται να εκτελούν ελέγχους συνέπειας με τις παλιότερες πληροφορίες δρομολόγησης για κάθε διαδρομή, που αναφέρονται από όλους τους γείτονές τους, με αποτέλεσμα να εξαλείφουν οποιουδήποτε κυκλικές διαδρομές. Ταυτόχρονα παρέχουν την δυνατότητα διόρθωσης μιας διαδρομής μετά από την αποτυχία μιας σύνδεσης πάνω σε αυτή.

### **3.8.3. Reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης**

Σε αυτό το τμήμα περιγράφουμε τα σημαντικότερα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης.

#### **3.8.3.1. Δυναμική δρομολόγηση πηγής (Dynamic Source Routing)**

Ο δυναμικός αλγόριθμος δρομολόγησης πηγής (DSR) [ Johnson 1996 ] είναι μια καινοτόμα προσέγγιση στη δρομολόγηση ενός MANET, στην οποία οι κόμβοι επικοινωνούν χρησιμοποιώντας διαδρομές πηγής, που συμπεριλαμβάνονται στα πακέτα δεδομένων και τις οποίες χρησιμοποιούν οι ενδιαμέσοι κόμβοι για να τα προωθήσουν από τον κόμβο προέλευσης στον κόμβο προορισμού. Αναφέρεται ως ένα από τα καλά παραδείγματα reactive πρωτοκόλλου δρομολόγησης [ Perkins 2001 ]. Στον DSR, οι κινητοί κόμβοι διατηρούν Route Caches που περιέχουν καταχωρημένες τις διαδρομές πηγής τις οποίες ο κάθε κόμβος γνωρίζει. Οι καταχωρήσεις στην Route Cache ενημερώνονται συνεχώς καθώς νέες διαδρομές ανακαλύπτονται. Το πρωτόκολλο αποτελείται από δύο μηχανισμούς: τον μηχανισμό εύρεσης διαδρομών και τον μηχανισμό συντήρησης διαδρομών.

Όταν ένας κόμβος επιθυμεί να αποστείλει κάποια δεδομένα, αρχικά προσπαθεί να χρησιμοποιήσει μια διαδρομή που πιθανόν υπάρχει ήδη στην Route Cache του. Εάν μια ισχύουσα διαδρομή για τον συγκεκριμένο προορισμό υπάρχει, θα χρησιμοποιήσει αυτήν την διαδρομή για να μεταδώσει τα δεδομένα. Εάν όμως μια τέτοια διαδρομή δεν υπάρχει στην Route Cache, ενεργοποιείται η διαδικασία εύρεσης διαδρομών με τη μετάδοση ενός μηνύματος αιτήματος μιας νέας διαδρομής. Το μήνυμα αυτό περιέχει τη διεύθυνση προορισμού, μαζί με τη διεύθυνση του κόμβου προέλευσης και έναν μοναδικό αριθμό αναγνώρισης. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το πακέτο ελέγχει εάν έχει αποθηκευμένη μια ισχύουσα διαδρομή για τον συγκεκριμένο προορισμό. Εάν όχι, προσθέτει τη διεύθυνσή του στο πεδίο διευθύνσεων των κόμβων διέλευσης του πακέτου και προωθεί το μήνυμα στους γειτονικούς του κόμβους. Για να περιοριστεί ο αριθμός των μηνυμάτων που διαδίδονται από κάθε κόμβο, ένας κόμβος μεταδίδει ένα τέτοιο μήνυμα μόνο εάν το λάβει για πρώτη φορά και δεν υπάρχει ήδη η διεύθυνση του στο πεδίο διευθύνσεων των κόμβων που έχει επισκεφτεί το μήνυμα. Μια απάντηση σε ένα αίτημα εύρεσης μιας διαδρομής παράγεται, είτε όταν παραληφθεί το εν λόγω μήνυμα από τον κόμβο προορισμού, είτε όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος περιέχει στην Route Cache του μια ισχύουσα διαδρομή προς τον προορισμό. Στο πακέτο αποθηκεύεται όλη

η αλληλουχία κόμβων από την οποία έχει περάσει το πακέτο, έως ότου φτάσει στον κόμβο προορισμού ή σε έναν ενδιάμεσο κόμβο και δημιουργηθεί μια απάντηση διαδρομής (Route Reply).

Η συντήρηση διαδρομών πραγματοποιείται μέσω της χρήσης πακέτων λαθών (Route Error) σε διαδρομές και των πακέτων επιβεβαιώσεων. Τα πακέτα (Route Error) παράγονται σε έναν κόμβο όταν παρουσιαστεί πρόβλημα στην μετάδοση των δεδομένων στο επίπεδο συνδέσεων του δικτύου. Όταν ένα τέτοιο πακέτο παραληφθεί, η καταχωρημένη διαδρομή στην οποία παρουσιάστηκε το λάθος, καθώς και όλες οι άλλες, που περιέχουν το σύνδεσμο στον οποίο παρουσιάστηκε το πρόβλημα, αφαιρούνται από την Route Cache του κόμβου. Τα πακέτα επιβεβαιώσεων, εν αντιθέσει, καθώς και τα πακέτα παθητικών επιβεβαιώσεων χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν τη σωστή λειτουργία των συνδέσεων του δικτύου.

Περισσότερες λεπτομέρειες για την περιγραφή του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου θα βρείτε στο αντίστοιχο κεφάλαιο, που περιγράφει αναλυτικά και λεπτομερειακά το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, αφού αποτέλεσε το πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, για την μελέτη του χρόνου ζωής μία διαδρομής με συγκεκριμένο μήκος με σκοπό την βελτίωση της χρήσης της Route Cache των κόμβων που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα δρομολόγησης πηγής.

#### *3.8.3.2. The Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol*

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης (AODV) [ Perkins 1999 ] είναι ένας συνδυασμός του πρωτοκόλλου DSDV και του DSR. Δανείζεται το βασικό μηχανισμό ανακάλυψης διαδρομών και συντήρησης διαδρομών από τον DSR και τη χρήση της δρομολόγησης μέσω των συνδέσεων (hop-by-hop), τους αριθμούς ακολουθίας και τα περιοδικά αναγνωριστικά μηνύματα από τον DSDV. Ο AODV ελαχιστοποιεί τον αριθμό των αναγκαίων μεταδόσεων με την εύρεση διαδρομών μόνο κατόπιν παραγγελίας, σε αντιδιαστολή με τη διατήρηση ενός πλήρους καταλόγου διαδρομών προς κάθε πιθανό προορισμό του δικτύου όπως συμβαίνει στον αλγόριθμο DSDV. Ο AODV ταξινομείται ως ένας αλγόριθμος δρομολόγησης που λειτουργεί εξ' ολοκλήρου on-demand, δεδομένου ότι οι κόμβοι, που δεν ανήκουν σε μια συγκεκριμένη διαδρομή, δεν διατηρούν πληροφορίες δρομολόγησης γι' αυτή και δεν συμμετέχουν στη

ανταλλαγή πληροφοριών από πίνακες δρομολόγησης. Ο AODV υποστηρίζει μόνο συμμετρικές συνδέσεις και αποτελείται από δύο διαφορετικές φάσεις:

- Ανακάλυψη διαδρομών, συντήρηση διαδρομών, και
- Αποστολή δεδομένων.

Όταν ένας κόμβος επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα και δεν έχει ήδη μια έγκυρη διαδρομή προς τον προορισμό, ενεργοποιεί την διαδικασία εύρεσης διαδρομών για να εντοπίσει τον αντίστοιχο κόμβο προορισμού. Μεταδίδει ένα μήνυμα αιτήματος διαδρομών (RREQ) στους γείτονές του, οι οποίοι το διαβιβάζουν στους δικούς τους γείτονές και ούτως καθ' εξής, μέχρι το αίτημα να προσεγγίσει είτε τον κόμβο προορισμού, είτε έναν ενδιάμεσο κόμβο με μια ισχύουσα διαδρομή προς τον προορισμό. Ο AODV χρησιμοποιεί αριθμούς ακολουθίας για κάθε προορισμό για να εξασφαλίσει ότι όλες οι διαδρομές δεν περιέχουν βρόχους και περιγράφουν τις πιο πρόσφατες πληροφορίες δρομολόγησης. Κάθε κόμβος διατηρεί τον αριθμό ακολουθίας του, καθώς επίσης και ένα μοναδικό αριθμό ταυτότητας για κάθε μετάδοση, ο οποίος αυξάνεται για κάθε (RREQ) που ο κόμβος στέλνει και μαζί με τη διεύθυνση IP του κόμβου προσδιορίζει μοναδικά κάθε ξεχωριστή μετάδοση δεδομένων προς έναν προορισμό. Μαζί με τον αριθμό ακολουθίας του κόμβου και του μοναδικού αριθμού μετάδοσης για τον συγκεκριμένο προορισμό, το RREQ περιλαμβάνει τον πιο πρόσφατο αριθμό ακολουθίας για τον προορισμό. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορούν να απαντήσουν στο RREQ μόνο εάν έχουν μια διαδρομή προς τον προορισμό της οποίας ο αντίστοιχος αριθμός ακολουθίας είναι μεγαλύτερος ή ίσος με αυτόν που υπάρχει στο μήνυμα αιτήματος. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της εύρεσης μιας διαδρομής, οι ενδιάμεσοι κόμβοι στη διαδρομή καταγράφουν στους πίνακες δρομολόγησης τους τις διευθύνσεις του γείτονα από τον οποίο το πρώτο μήνυμα παραλήφθηκε. Με τον τρόπο αυτόν καθιερώνουν μια αντίστροφη διαδρομή προς τον κόμβο προορισμού του μηνύματος. Τα αντίγραφα του ίδιου RREQ, που πιθανώς να παραληφθούν αργότερα, απορρίπτονται. Μόλις το RREQ φθάσει στον προορισμό ή σε έναν ενδιάμεσο κόμβο με μια ισχύουσα διαδρομή, ο κόμβος αυτός δημιουργεί ένα πακέτο απάντησης (RREP), το οποίο μεταδίδει πίσω στον κόμβο από τον οποίο έλαβε αρχικά το RREQ. Δεδομένου ότι το RREP καθοδηγείται πίσω κατά μήκος της αντίστροφης διαδρομής που έχει δημιουργηθεί από τους ενδιάμεσους κόμβους, οι κόμβοι κατά μήκος της

πορείας αυτής, καθώς προωθούν, το πακέτο οργανώνουν τις προς τα εμπρός καταχωρήσεις μονοπατιών στους πίνακες δρομολόγησης τους, που δείχνουν τον κόμβο από τον οποίο το RREP προήλθε. Αυτές οι καταχωρήσεις διαδρομών περιγράφουν την ενεργό διαδρομή δρομολόγησης του συγκεκριμένου RREP. Σε κάθε καταχώρηση μιας διαδρομής στους πίνακες δρομολόγησης αντιστοιχεί ένας χρόνος ζωής διαδρομών, που προκαλεί τη διαγραφή τους από τους πίνακες, εάν αυτές δεν χρησιμοποιηθούν μέσα στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο λόγος για τον οποίο ο AODV υποστηρίζει μόνο συμμετρικές συνδέσεις είναι ότι το RREP διαβιβάζεται κατά μήκος της πορείας που δημιουργείται από το RREQ.

Οι διαδρομές στον AODV διατηρούνται ως εξής, στις περιπτώσεις που κάποιος κόμβος κατά μήκος της διαδρομής κινείται με αποτέλεσμα η διαδρομή αυτή να μην ισχύει πλέον. Όταν ένας κόμβος προέλευσης μιας διαδρομής κινείται, είναι σε θέση να ενεργοποιήσει ξανά τον μηχανισμό εύρεσης διαδρομών για να ανακαλύψει μια νέα διαδρομή προς τον προορισμό. Εάν ένας κόμβος κατά μήκος της διαδρομής κινείται, ο προς τα πάνω (upstream) γείτονάς του παρατηρεί την κίνηση του και διαδίδει ένα μήνυμα ανακοίνωσης αποτυχίας της σύνδεσης (RREP with infinite metric) σε κάθε έναν από τους ενεργούς προς τα πάνω (upstream) γείτονές του, για να τους ενημερώσει για τη κατάρρευση του συγκεκριμένου μέρους της διαδρομής. Οι κόμβοι αυτοί διαδίδουν στη συνέχεια το μήνυμα κατάρρευσης των συνδέσεων στους προς τα πάνω γείτονές τους και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου το μήνυμα το λάβει ο κόμβος πηγή της συγκεκριμένης διαδρομής. Ο κόμβος αυτός έπειτα ενεργοποιεί, αν το κρίνει απαραίτητο και αναγκαίο να διατηρήσει μια διαδρομή για τον συγκεκριμένο προορισμό, τον μηχανισμό εύρεσης διαδρομών του πρωτοκόλλου. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου είναι η χρήση μηνυμάτων (HELLO), με περιοδικές τοπικές μεταδόσεις από έναν κόμβο για να ενημερώσει κάθε άλλο κινούμενο κόμβο για την παρουσία άλλων κόμβων στην περιοχή εμβέλειάς του. Τα μηνύματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διατηρήσουν την τοπική συνδεσιμότητα ενός κόμβου με τους γείτονες του. Εντούτοις, η χρήση αυτών των μηνυμάτων δεν είναι απαραίτητη σε όλες τις περιπτώσεις, αφού οι κόμβοι «ακούγοντας» τις αναμεταδώσεις των πακέτων δεδομένων μπορούν να εξασφαλίσουν την διασύνδεση τους με τους γειτονικούς τους κόμβους. Γενικά τόσο από τα πακέτα δεδομένων που προωθούνται από έναν κόμβο ή μπορούν να ληφθούν χωρίς να προορίζονται γι' αυτόν, όσο και ειδικά μηνύματα, όπως τα (HELLO) μηνύματα,



χρησιμοποιούνται για να μπορούν οι κόμβοι ενός ad-hoc δικτύου να αποκτούν μια όσο το δυνατόν καλύτερη εικόνα για το ίδιο το δίκτυο, τους γείτονες τους και τις ενεργές συνδέσεις τους.

### 3.8.3.3. Δρομολόγηση αναστροφής συνδέσεων

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε το σημαντικότερο πρωτόκολλο αυτής της οικογένειας το οποίο ονομάζεται TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm).

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης (TORA) [ Park 1997 ] είναι ένας ιδιαίτερα προσαρμοστικός, κατανεμημένος αλγόριθμος βασισμένος στην έννοια της αντιστροφής συνδέσεων, ο οποίος διαθέτει ειδικό μηχανισμό εξάλειψης βρόγχων μέσα στις διαδρομές, έχοντας ως σκοπό την ελαχιστοποίηση των αντιδράσεων στις τοπολογικές αλλαγές του δικτύου.

Μια βασική σχεδιαστική αρχή του αλγορίθμου είναι ότι προσπαθεί να αντιμετωπίσει την κινητικότητα και την αλλαγή της τοπολογίας των κόμβων, απομονώνοντας τους κόμβους του δικτύου που δεν αφορά ούτε και επηρεάζει αυτή η αλλαγή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι τυχόν αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου που συμβαίνουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή να επηρεάζουν μια μικρή ομάδα κοντινών κόμβων και όχι τους απομακρυσμένους. Η ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου δρομολόγησης λοιπόν σε μια περιορισμένη ομάδα κόμβων, που βρίσκονται κοντά στην αλλαγή, έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση του πρωτοκόλλου και την αποφυγή χρήσης ιεραρχικών αλγορίθμων δρομολόγησης που θα προσέθεταν έξτρα πολυπλοκότητα. Η εύρεση των καλύτερων διαδρομών θεωρείται δευτερεύουσας σημασίας και πολύ συχνά δεν χρησιμοποιούνται οι βέλτιστες διαδρομές, εάν η διαδικασία εύρεσης νέων διαδρομών είναι δυνατόν να αποφευχθεί. Τέλος το πρωτόκολλο αυτό χαρακτηρίζεται και από την ικανότητα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών.

Το TORA είναι ικανό να λειτουργήσει σε ένα ιδιαίτερα δυναμικό περιβάλλον όπως συνήθως είναι ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο με κινούμενους κόμβους. Η διαδικασία δρομολόγησης ξεκινά σε όλες τις περιπτώσεις από έναν κόμβο (source node). Οι κόμβοι πρέπει να διατηρούν τις πληροφορίες δρομολόγησης για τους παρακείμενους κόμβους (γειτονικούς κόμβους). Το πρωτόκολλο εκτελεί τρεις βασικές λειτουργίες:

- Δημιουργία διαδρομών,

- Συντήρηση διαδρομών, και
- Εξάλειψη διαδρομών.

Για κάθε κόμβο στο δίκτυο, ένας ξεχωριστός κατευθυνόμενος μη-κυκλικός γράφος (Directed Acyclic Graph DAG) διατηρείται για κάθε προορισμό. Όταν ένας κόμβος αποφασίσει ότι χρειάζεται μια διαδρομή για κάποιον προορισμό, διαδίδει προς όλους τους κόμβους του δικτύου ένα μήνυμα αναζήτησης (Query), που περιέχει τη διεύθυνση του προορισμού για τον οποίο απαιτεί μια διαδρομή. Αυτό το πακέτο προωθείται από κόμβο σε κόμβο, έως ότου φθάσει είτε στον κόμβο προορισμού, είτε σε έναν ενδιάμεσο κόμβο που έχει αποθηκευμένη μια διαδρομή προς τον προορισμό. Ο παραλήπτης του μηνύματος αυτού μεταδίδει ένα μήνυμα ενημέρωσης (Update), που απαριθμεί το ύψος που γνωρίζει σε σχέση με τον κόμβο προορισμού. Καθώς το μήνυμα αυτό προωθείται στο δίκτυο, κάθε κόμβος που το λαμβάνει ρυθμίζει το δικό του ύψος προς το συγκεκριμένο προορισμό κατά μία μονάδα μεγαλύτερο από το ύψος του γειτονικού του κόμβου από τον οποίο το έλαβε. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μιας σειράς κατευθυνόμενων συνδέσεων από τον αρχικό αποστολέα της αναζήτησης της διαδρομής, προς τον κόμβο που παρήγαγε το μήνυμα ενημέρωσης (Update). Όταν ένας κόμβος αντιληφθεί ότι μια διαδρομή προς ένα συγκεκριμένο προορισμό δεν ισχύει πλέον, αναπροσαρμόζει το ύψος που έχει αποθηκεύσει γι' αυτή την διαδρομή στο μέγιστο που μπορεί να υπολογίσει από τις πληροφορίες που έχει συλλέξει από τους γείτονες του και διαδίδει στη συνέχεια ένα μήνυμα (Update). Εάν ο κόμβος δεν έχει κάποιον γείτονα που μπορεί να τον πληροφορήσει για το ύψος προς τον συγκεκριμένο προορισμό, ενεργοποιεί την διαδικασία εύρεσης μιας νέας διαδρομής, όπως περιγράφεται ανωτέρω. Όταν ένας κόμβος ανιχνεύσει την κατάτμηση του δικτύου, δημιουργεί ένα μήνυμα καθαρίσματος (Clear) που ρυθμίζει εκ νέου την κατάσταση των διαδρομών και διαγράφει διαδρομές που πλέον δεν είναι ενεργές.

Το TORA είναι υλοποιημένο πάνω από το επίπεδο του IMEP το πρωτόκολλο ενθυλάκωσης των MANET [ Corson1997 ], το οποίο εγγυάται τη με σειρά αξιόπιστη παράδοση όλων των μηνυμάτων ελέγχου της διαδικασίας της δρομολόγησης από έναν κόμβο σε κάθε ένα από τους γείτονές του και την ειδοποίηση για την δημιουργία μιας νέας ή την κατάργηση μιας παλιάς σύνδεσης με ένα γειτονικό κόμβο, στο επίπεδο του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Για να μειώσει την καθυστέρηση, το IMEP προσπαθεί να

ομαδοποιήσει πολλά μηνύματα ελέγχου του TORA και του ίδιου του IMEP (τα οποία αναφέρονται ως αντικείμενα) σε ένα ενιαίο πακέτο πριν από κάθε μετάδοση. Κάθε τέτοιο πακέτο φέρνει έναν αριθμό ακολουθίας και έναν κατάλογο άλλων κόμβων από τους οποίους απαιτείται μία λήψη επιβεβαίωσης. Το IMEP μεταδίδει κάθε ίδιο τέτοιο πακέτο περιοδικά και συνεχίζει να το μεταδίδει, εάν είναι απαραίτητο, για κάποια περίοδο, μετά το πέρας της οποίας το TORA ενημερώνεται για όλες τις συνδέσεις που δεν ισχύουν πλέον, λόγω του ότι δεν έχει ληφθεί κάποια επιβεβαίωση.

Όπως αναφέραμε νωρίτερα, κατά τη διάρκεια της δημιουργίας και συντήρησης διαδρομών, οι κόμβοι χρησιμοποιούν το «ύψος» σαν μέτρο εγκαθίδρυσης ενός κατευθυντικού μη κυκλικού γραφου διαδρομών, (DAG) προς τον προορισμό. Στις συνδέσεις, μετά από αυτή τη διαδικασία, ορίζεται μια κατεύθυνση (προς τα πάνω ή προς τα κάτω) βασισμένη με το σχετικό ύψος των γειτονικών κόμβων. Σε περιόδους κινήτικότητας των κόμβων ο γραφος διαδρομών DAG περιέχει μη συνεπείς πληροφορίες και η διαδικασία συντήρησης διαδρομών είναι απαραίτητη για να εγκαθιδρύσει ξανά ένα γραφο διαδρομών, ο οποίος περιέχει τις νέες πληροφορίες δρομολόγησης.

Ο συγχρονισμός είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο πρωτόκολλο TORA, επειδή το «ύψος» εξαρτάται από το χρόνο αποτυχίας των συνδέσεων. Το TORA υποθέτει ότι όλοι οι κόμβοι έχουν συγχρονίσει τα ρολόγια τους, χρησιμοποιώντας μια αρκετά αξιόπιστη υπηρεσία συγχρονισμού, όπως είναι το GPS (Global Positioning System). Οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται από το TORA σαν μέτρο για τις διαδικασίες δρομολόγησης και διατήρησης των διαδρομών είναι οι εξής πέντε:

1. Λογικός χρόνος αποτυχίας μιας σύνδεσης,
2. Η μοναδική ταυτότητα του κόμβου που καθόρισε το νέο επίπεδο αναφοράς,
3. Ένα bit που περιγράφει ένα δείκτη αντανάκλασης,
4. Μια παράμετρος διάδοσης,
5. Η μοναδική ταυτότητα του κόμβου.

Το TORA είναι ένα πρωτόκολλο μερικώς reactive και μερικώς proactive. Είναι reactive υπό την έννοια ότι η διαδικασία εύρεσης διαδρομών αρχίζει μετά από σχετική αίτηση κάποιου κόμβου. Εντούτοις, η συντήρηση των διαδρομών γίνεται proactive έτσι ώστε οι πολλαπλάσιες επιλογές δρομολόγησης να είναι διαθέσιμες και έγκυρες σε περίπτωση ύπαρξης αποτυχημένων συνδέσεων.

#### **3.8.4. Δρομολόγηση με την χρήση πληροφοριών θέσεως**

Σε αυτή την παράγραφο περιγράφουμε πρωτόκολλα δρομολόγησης ad-hoc δικτύων, που βασίζονται στις πληροφορίες θέσεως των κόμβων.

##### *3.8.4.1. Location Aided Routing (LAR)*

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης LAR [ Κο 1998 ] εκμεταλλεύεται τις πληροφορίες θέσεως των κόμβων στο δίκτυο, τις οποίες χρησιμοποιεί για να περιορίσει το πεδίο της πλημμύρας του μηνύματος αναζήτησης μιας νέας διαδρομής, το οποίο υλοποιείται όπως και στα πρωτόκολλα AODV και DSR. Οι πληροφορίες θέσης των κόμβων ενός ad-hoc ασύρματου δικτύου μπορούν να ληφθούν μέσω του GPS (Global Positioning System). Το πρωτόκολλο LAR περιορίζει την αναζήτηση μιας διαδρομής στην αποκαλούμενη ζώνη αιτήματος, που καθορίζεται βασιζόμενη στην αναμενόμενη θέση του κόμβου προορισμού κατά την διάρκεια της διαδικασίας εύρεσης διαδρομών. Δύο είναι οι σημαντικές σχεδιαστικές αρχές της λειτουργίας του LAR, η αναμενόμενη ζώνη (Expected Zone) και η ζώνη αιτήματος (Request Zone).

Αρχικά θα περιγράψουμε την Αναμενόμενη ζώνη (Expected Zone). Θεωρήστε ότι ένας κόμβος S πρέπει να ανακαλύψει μια διαδρομή προς τον κόμβο D, γνωρίζοντας ότι ο κόμβος D βρισκόταν στη θέση L στο χρόνο  $t_0$ , και ότι ο τρέχων χρόνος είναι  $t_1$ . Η αναμενόμενη ζώνη (Expected Zone) του κόμβου D, από την αντίληψη του κόμβου S στο χρονικό  $t_1$  είναι η περιοχή που αναμένεται να βρίσκεται ο κόμβος D, την οποία ο κόμβος S μπορεί να καθορίσει γνωρίζοντας την αρχική θέση του κόμβου D, την χρονική στιγμή  $t_0$ . Παραδείγματος χάριν, εάν ο κόμβος S γνωρίζει ότι ο κόμβος D ταξιδεύει με μέση ταχύτητα  $v$ , μπορεί να υποθέσει ότι η αναμενόμενη ζώνη είναι η κυκλική περιοχή ακτίνας  $v(t_1 - t_0)$ , με κέντρο τη θέση L. Εάν η πραγματική ταχύτητα του κόμβου D συμβαίνει να είναι μεγαλύτερη από την μέση, ο κόμβος προορισμού τότε μπορεί να βρίσκεται εκτός από την αναμενόμενη ζώνη την χρονικής στιγμή  $t_1$ . Κατά

συνέπεια, η αναμενόμενη ζώνη είναι μόνο μια εκτίμηση που γίνεται από τον κόμβο S για να καθορίσει μια περιοχή που ενδεχομένως θα βρίσκεται ο D το χρονικό διάστημα  $t_1$ .

Εάν ο κόμβος S δεν γνωρίζει μια προηγούμενη θέση του κόμβου D, δεν μπορεί εύλογα να καθορίσει την αναμενόμενη ζώνη και σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος είναι υποχρεωμένος να υποθέσει ότι η ολόκληρη περιοχή που καλύπτεται από το ασύρματο ad-hoc δίκτυο είναι η αναμενόμενη ζώνη). Σε αυτήν την περίπτωση, ο LAR λειτουργεί σαν ένας κλασικός αλγόριθμος πλημμύρας για την διάδοση των μηνυμάτων αναζήτησης διαδρομών. Γενικά, η γνώση περισσότερων πληροφοριών σχετικά με την κινητικότητα ενός κόμβου οδηγεί στην εύρεση μιας μικρότερης αναμενόμενης ζώνης. Η ζώνη αιτήματος καθορίζεται βάση της αναμενόμενης ζώνης. Θεωρούμε τον κόμβο S που πρέπει να καθορίσει μια διαδρομή προς τον κόμβο D. Ο κόμβος S καθορίζει δυναμικά ή στατικά (*implicitly or explicitly*) μια ζώνη αιτήματος για την συγκεκριμένη διαδικασία εύρεσης μιας διαδρομής. Ένας κόμβος, που παραλαμβάνει το μήνυμα αυτό, το προωθεί μόνο εάν ανήκει στη ζώνη αιτήματος (σε αντίθεση από τον αλγόριθμο πλημμύρας των AODV και DSR). Για να αυξηθεί η πιθανότητα να φθάσει το αίτημα διαδρομών στον κόμβο D, η ζώνη αιτήματος πρέπει να περιλαμβάνει την αναμενόμενη ζώνη (που περιγράφεται ανωτέρω). Επιπλέον, η ζώνη αιτήματος μπορεί επίσης να περιλάβει και άλλες περιοχές γύρω από τη ζώνη αιτήματος.

Με βάση αυτές τις πληροφορίες ο κόμβος πηγή μπορεί να καθορίσει τις τέσσερις γωνίες της αναμενόμενης ζώνης, τις οποίες συμπεριλαμβάνει στο μήνυμα αιτήματος διαδρομών που μεταδίδει όταν ενεργοποιείται η διαδικασία εύρεσης διαδρομών. Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα τέτοιο μήνυμα, το απορρίπτει εάν η τωρινή θέση του δεν είναι μέσα στο τμήμα που περιγράφεται από τις συντεταγμένες που περιέχονται στο αίτημα δρομολόγησης.

#### *3.8.4.2. Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)*

Ο DREAM [ Basagni 1998 ] είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για τα ad-hoc ασύρματα δίκτυα και βασίζεται σε δύο πρωτότυπες παρατηρήσεις. Η πρώτη, αποκαλούμενη επίδραση στην απόσταση (*distance effect*), εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη η απόσταση που χωρίζει δύο κόμβους, τόσο πιο αργά εμφανίζονται να κινούνται ο ένας σε σχέση με τον άλλο. Συνεπώς οι πληροφορίες θέσης στους πίνακες

δρομολόγησης μπορούν να ενημερωθούν συναρτήσει της απόστασης που χωρίζει τους κόμβους χωρίς να γίνεται συμβιβασμός στην ακρίβεια της διαδικασίας της δρομολόγησης. Η δεύτερη ιδέα είναι αυτή που προκαλεί την αυτόνομη αποστολή πληροφοριών αναπροσαρμογών θέσεως, κινούμενων κόμβων, βασισμένη μόνο στο ποσοστό κινητικότητας κάθε κόμβου. Διαισθητικά είναι σαφές ότι σε έναν κατευθυνόμενο αλγόριθμο δρομολόγησης, για τους πιο αργά κινούμενους κόμβους, πρέπει να ενημερώνουμε λιγότερο συχνά τους πίνακες δρομολόγησης σε σχέση με τους γρηγορότερα κινούμενους κόμβους. Κατ' αυτό τον τρόπο, κάθε κόμβος μπορεί να βελτιστοποιήσει τη συχνότητα με την οποία στέλνει μηνύματα αλλαγών του δικτύου και να μειώνει αντίστοιχα το εύρος ζώνης και την ενέργεια που χρησιμοποιεί, οδηγώντας σε ένα πλήρως κατανεμημένο, αυτόνομο και αποδοτικό σύστημα δρομολόγησης. Με βάση αυτούς τους πίνακες δρομολόγησης, ο προτεινόμενος κατευθυνόμενος αλγόριθμος στέλνει μηνύματα στη "καταγεγραμμένη κατεύθυνση" του κόμβου προορισμού και εγγυάται την παράδοση των δεδομένων προς της κατεύθυνση αυτή με μια δεδομένη πιθανότητα.

#### *3.8.4.3. Relative Distance Micro Discovery Ad-Hoc Routing*

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης RDMAR [ Aggelou 1999 ] είναι ένα ιδιαίτερα προσαρμοστικό και αποδοτικό πρωτόκολλο. Μπορεί να λειτουργήσει αρκετά ικανοποιητικά σε μεγάλα ασύρματα ad-hoc δίκτυα στα οποία παρατηρείται μέτρια κινητικότητα. Βασική σχεδιαστική αρχή του πρωτοκόλλου είναι η αντίδραση του στην διακοπή της ενεργής λειτουργίας αποτυχημένων συνδέσεων, σε μια πολύ μικρή περιοχή του δικτύου κοντά στο σημείο της αλλαγής των συνδέσεων του δικτύου. Η συμπεριφορά αυτή επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός νέου μηχανισμού για την ανακάλυψη διαδρομών, αποκαλούμενου Relative Distance Micro-Discovery (RDM), ο οποίος έχει σαν βασικής έννοια την δημιουργία μηνυμάτων, ως αντίδρασης του πρωτοκόλλου σε ένα γεγονός και την διάδοση τους με την μορφή πλημμύρας, η οποία μπορεί να περιοριστεί χρησιμοποιώντας την σχετικής απόσταση (RD) μεταξύ δύο τερματικών. Κάθε φορά που προκαλείται μια αναζήτηση διαδρομών μεταξύ των δύο τερματικών, ένας επαναληπτικός αλγόριθμος υπολογίζει μια εκτίμηση της σχετικής τους απόστασης, λαμβάνοντας υπόψη ένα μέσο ρυθμό κινητικότητας, πληροφορίες για την περίοδο που έχει παρέλθει από την πιο πρόσφατη επικοινωνίας τους και τις προηγούμενες τιμές της. Το μήνυμα ερώτησης (query) το οποίο δημιουργείται βασισμένο στο υπολογισμένο

αυτό RD, προωθείται με την τεχνική της πλημμύρας σε όλους του κόμβους του δικτύου σε μια περιοχή η οποία κεντροθετείται στον κόμβο πηγής του αιτήματος ευρέσεως διαδρομών και με μέγιστη ακτίνα διάδοσης ίση με την κατ' εκτίμηση σχετική απόσταση RD. Η παραπάνω διαδικασία χρησιμεύει για να ελαχιστοποιηθεί η συμφόρηση του δικτύου και η συνολική καθυστέρηση που προκαλείται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Στο RDMAR, τα δεδομένα δρομολογούνται μεταξύ των κόμβων του δικτύου με τη χρησιμοποίηση πινάκων δρομολόγησης αποθηκευμένων σε κάθε κόμβο. Κάθε κόμβος έχει το ρόλο τόσο του τερματικού όσο και του δρομολογητή. Κάθε πίνακας δρομολόγησης περιέχει πληροφορίες για όλους ξεχωριστά τους πιθανούς προορισμούς στο δίκτυο. Κάθε καταχώρηση στον πίνακα αυτόν περιέχει τον επόμενο κόμβο, στον οποίο πρέπει να μεταδοθούν τα δεδομένα για να μπορέσουν να προωθηθούν στον τελικό προορισμό τους. Η σχετική απόσταση (Relative Distance RD) περιέχει μια προσέγγιση της απόστασης, εκφρασμένη σε πλήθος συνδέσεων (hops), ανάμεσα στον κόμβο αυτό και τον κόμβο προορισμού και τον χρόνο (Time Last Update TLU) από την τελευταία φορά που ο κόμβος είχε λάβει πληροφορίες δρομολόγησης για τον συγκεκριμένο προορισμό. Μία μεταβλητή που ονομάζεται (RT\_Timeout) περιέχει το χρονικό διάστημα που απομένει προτού θεωρηθεί η συγκεκριμένη διαδρομή άκυρη και τέλος έναν αναγνωριστικό αριθμό που (Route Flag), που δηλώνει εάν η διαδρομή είναι ενεργή. Ο RDMAR περιλαμβάνει δύο κύριους μηχανισμούς:

- Εύρεση διαδρομών – Όταν φθάνει μια αίτηση σε έναν κόμβο για μια διαδρομή προς ένα άλλο κόμβο και δεν υπάρχει διαθέσιμη κάποια διαδρομή, ενεργοποιείται ο μηχανισμός εύρεσης διαδρομών του πρωτοκόλλου. Το μήνυμα αίτησης για την νέα διαδρομή μπορεί, είτε να διαδοθεί με την τεχνική της πλημμύρας σε όλους του κόμβους του δικτύου, είτε να περιοριστεί η μετάδοση του μηνύματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή, βάση μιας πρόβλεψης της θέσης του κόμβου προορισμού, που γίνεται με τον υπολογισμό μιας πρόβλεψης, για την απόσταση του κόμβου προορισμού από τις πληροφορίες που υπάρχουν στους πίνακες δρομολόγησης.
- Συντήρηση διαδρομών – Ένας ενδιάμεσος κόμβος, κατά την υποδοχή ενός πακέτου δεδομένων, επεξεργάζεται αρχικά τις πληροφορίες δρομολόγησης και

τις διαβιβάζει έπειτα στον επόμενο κόμβο. Στη συνέχεια μεταδίδει ένα μήνυμα με σκοπό να εξετάζει εάν μια αμφίδρομη σύνδεση, με ένα προηγούμενο κόμβο, είναι εφικτή. Ο RDMAR, επομένως, δεν υποθέτει την ύπαρξη αμφίδρομων συνδέσεων αλλά παρόλα αυτά εξετάζει τη δυνατότητα αυτή. Κατά τον τρόπο αυτό, οι κόμβοι που προωθούν ένα πακέτο δεδομένων έχουν πάντα αρκετές πληροφορίες δρομολόγησης για να στείλουν ένα μελλοντικό πακέτο επιβεβαίωσης πίσω στην πηγή. Εάν η προώθηση του πακέτου δεδομένων, είτε λόγω κάποιου λάθους που υπάρχει στις συνδέσεις της διαδρομής, είτε λόγω του ότι δεν υπάρχει καμία διαθέσιμη διαδρομή, αποτύχει, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι έναν μέγιστο αριθμό και στη συνέχεια εάν η αποτυχία εμμένει, ενεργοποιείται η διαδικασία εύρεσης διαδρομών.

### **3.8.5. Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης**

#### *3.8.5.1. Πρωτόκολλο δρομολόγησης ζώνης (Zone Routing Protocol) ZRP*

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης ζώνης (ZRP) [ Haas 1998 ] είναι ένα υβριδικό παράδειγμα reactive και proactive δρομολόγησης. Περιορίζει το πεδίο της proactive διαδικασίας μόνο στην περιοχή όπου βρίσκονται οι γείτονες ενός κόμβου, ενώ η αναζήτηση σε όλο το δίκτυο μπορεί να εκτελεσθεί αποτελεσματικά με τη αναζήτηση συγκεκριμένων κόμβων μετά από σχετικό αίτημα, όπως σε ένα reactive πρωτόκολλο.

Στο ZRP, ένας κόμβος διατηρεί proactively διαδρομές προς τους κόμβους προορισμούς μέσα σε μια περιοχή, η οποία αναφέρεται ως ζώνη δρομολόγησης και ορίζεται ως μια συλλογή των κόμβων, των οποίων η ελάχιστη απόσταση συνδέσεων από τον εν λόγω κόμβο δεν είναι μεγαλύτερη από μια παράμετρο, καλούμενη ακτίνα ζώνης. Κάθε κόμβος διατηρεί την ακτίνα ζώνης του. Από το πρωτόκολλο επιτρέπεται και επιβάλλεται να υπάρχει μια επικάλυψη γειτονικών ζωνών.

Η κατασκευή μιας ζώνης δρομολόγησης απαιτεί ένας κόμβος να γνωρίζει ποιοι είναι οι γείτονές του. Ένας γείτονας ορίζεται ως ένας κόμβος που μπορεί να επικοινωνήσει άμεσα με τον εν λόγω κόμβο και ανακαλύπτεται μέσω ενός πρωτοκόλλου ανακάλυψης γειτόνων του επιπέδου MAC (Neighbor Discovery Protocol NDP). Το ZRP διατηρεί τις ζώνες δρομολόγησης μέσω ενός proactive πρωτοκόλλου καλούμενου (Intrazone Routing Protocol IARP), που υλοποιείται ως ένα τροποποιημένο διανυσματικό σχήμα



απόστασης. Το πρωτόκολλο αυτό είναι αρμόδιο για την εύρεση των διαδρομών για τους προορισμούς που βρίσκονται έξω από τη ζώνη δρομολόγησης. Το IERP χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό ερώτησης και απάντησης (query-response) για να ανακαλύψει τις διαδρομές μετά από σχετική αίτηση κάποιου κόμβου. Το IERP διακρίνεται από τον κλασικό αλγόριθμο πλημμύρας λόγω της χρησιμοποίησης διαδικασίας προώθησης μηνυμάτων γνωστής ως border casting. Το ZRP παρέχει αυτήν την υπηρεσία μέσω μιας διεργασίας αποκαλούμενης, (Border Resolution Protocol BRP).

Το στρώμα δικτύου προκαλεί μία IERP ανακάλυψη διαδρομών όταν ένα πακέτο στοιχείων πρόκειται να σταλεί σε έναν προορισμό που δεν βρίσκεται μέσα στη ζώνη δρομολόγησής του. Η πηγή παράγει ένα μήνυμα αναζήτησης διαδρομών, το οποίο προσδιορίζεται μεμονωμένα από έναν αριθμό ταυτότητας και έναν αριθμό αιτήματος του κόμβου πηγής. Η ερώτηση έπειτα μεταδίδεται στους απομακρυσμένους κόμβους από την ζώνη δρομολόγησης. Κατά την παραλαβή ενός τέτοιου πακέτου, ένας κόμβος προσθέτει τον δικό του αριθμό ταυτότητας. Η ακολουθία των καταγεγραμμένων αριθμών αυτών διευκρινίζει μια διαδρομή από την πηγή στην τρέχουσα ζώνη δρομολόγησης. Εάν ο προορισμός δεν εμφανίζεται στη τρέχουσα ζώνη δρομολόγησης, το μήνυμα αυτό προωθείται στους απομακρυσμένους κόμβους της ζώνης δρομολόγησης. Εάν ο κόμβος προορισμού είναι μέλος της τρέχουσας ζώνης δρομολόγησης, αποστέλλεται πίσω στην πηγή μια απάντηση που περιέχει την συγκεκριμένη διαδρομή, ακολουθώντας απλά την αντίστροφη διαδρομή από αυτή που περιέχει. Ένας κόμβος θα απορρίψει οποιοδήποτε μήνυμα αναζήτησης διαδρομών, το οποίο έχει επεξεργαστεί ξανά. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι ότι μια μοναδική αναζήτηση διαδρομών μπορεί να επιστρέψει πολλαπλές απαντήσεις με διαδρομές για τον προορισμό, δίνοντας την δυνατότητα επιλογής της καλύτερης από αυτές στους κόμβους, βάση κάποιων χαρακτηριστικών της ποιότητας τους.

#### 3.8.5.2. *Fisheye State Routing (FSR)*

Το πρωτόκολλο (FSR) [ Iwata 1999 ] εισάγει την έννοια ενός πολύ-επίπεδου fisheye σχήματος για να μειώσει την συνολική καθυστέρηση της διαδικασίας της δρομολόγησης σε μεγάλα ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Οι κόμβοι ανταλλάσσουν τις καταχωρήσεις κατάστασης συνδέσεων με τους γείτονές τους με μια συχνότητα που εξαρτάται από την απόσταση στον προορισμό. Από τις καταχωρήσεις της κατάστασης των συνδέσεων, οι κόμβοι κατασκευάζουν το χάρτη τοπολογίας ολόκληρου του δικτύου και υπολογίζουν

τις βέλτιστες διαδρομές. Ο FSR προσπαθεί να βελτιώσει την κλιμάκωση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης με την προσπάθεια συγκέντρωσης των πληροφοριών της τοπολογίας των κόμβων του δικτύου, που είναι οι πλέον πιθανές να απαιτηθούν για την δρομολόγηση δεδομένων προς αυτούς. Υποθέτει ότι αλλαγές, που στην τοπολογία του τμήματος του δικτύου βρίσκονται κοντύτερα σε έναν κόμβο, είναι πιθανότερο να πρέπει να επεξεργαστούν για την ανανέωση των πληροφοριών δρομολόγησης που κατέχει ο κόμβος αυτός, από ότι οι αλλαγές που συμβαίνουν μακριά από αυτόν. Το πρωτόκολλο φροντίζει να ενημερώνονται συχνότερα, για τις αλλαγές του δικτύου, οι κόμβοι που βρίσκονται κοντύτερα σε αυτές.

### 3.8.5.3. *Landmark Routing (LANMAR) for MANET with Group Mobility*

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης (LANMAR) [ Pei 2000 ] συνδυάζει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του FSR και της διαδικασίας δρομολόγησης Landmark. Η βασική καινοτομία είναι η χρήση ορόσημων για κάθε σύνολο κόμβων που κινούνται ως ομάδα (όπως, μια ομάδα στρατιωτών στο πεδίο της μάχης) προκειμένου να μειωθεί η συνολική καθυστέρηση δρομολόγησης. Όπως και στον FSR, οι κόμβοι ανταλλάσσουν πληροφορίες μόνο με τους γειτονικούς τους κόμβους. Οι διαδρομές στο πλαίσιο του Fisheye είναι ακριβείς, ενώ οι διαδρομές στις μακρινές ομάδες κόμβων «συνοψίζονται» (summarized) από τα αντίστοιχα ορόσημα. Ένα πακέτο που κατευθύνεται σε έναν μακρινό προορισμό στοχεύει αρχικά προς το αντίστοιχο ορόσημο της απομακρυσμένης ομάδας κόμβων και καθώς πλησιάζει πιο κοντά στον προορισμό χρησιμοποιεί τελικά μια πιο συγκεκριμένη διαδρομή που παρέχεται από το Fisheye. Στο αρχικό σχήμα ενσύρματων δικτύων με ορόσημα [ Tsuchiya 1988 ], η προκαθορισμένη διεύθυνση κάθε κόμβου απεικονίζει τη θέση του μέσα στην ιεραρχία και βοηθά την εύρεση μιας διαδρομής σε αυτόν. Κάθε κόμβος γνωρίζει τις διαδρομές προς όλους τους άλλους κόμβους μέσα στο ιεραρχικό σχήμα. Επιπλέον, κάθε κόμβος γνωρίζει τις διαδρομές προς τα διάφορα "ορόσημα" σε διαφορετικά ιεραρχικά επίπεδα. Η αποστολή πακέτων είναι σύμφωνη με την ιεραρχία ορόσημων και η πορεία καθορίζεται από την ιεραρχία υψηλότερου επιπέδου στα χαμηλότερα επίπεδα καθώς ένα πακέτο πλησιάζει προς τον προορισμό.

Το LANMAR δανείζεται από το [ Tsuchiya 1988 ] την έννοια των ορόσημων για να παρακολουθήσει τα λογικά υποδίκτυα. Ένα υποδίκτυο αποτελείται από μέλη που έχουν κοινά ενδιαφέροντα και είναι πιθανόν να κινηθούν ως "ομάδα" (όπως, στρατιώτες στο

πεδίο μάχη, ή μια ομάδα σπουδαστών). Ένας κόμβος "ορόσημων" εκλέγεται σε κάθε υποδίκτυο. Το ίδιο το σχέδιο δρομολόγησης είναι τροποποιημένη έκδοση του FSR. Η κύρια διαφορά όμως είναι ότι ο πίνακας δρομολόγησης του FSR περιέχει όλους τους κόμβους στο δίκτυο, ενώ ο πίνακας δρομολόγησης στο LANMAR περιλαμβάνει μόνο τους κόμβους άμεσου ενδιαφέροντος και τους κόμβους ορόσημων (landmark nodes). Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα βελτιώνει πολύ την κλιμάκωση του πρωτοκόλλου με τη μείωση του μεγέθους των πινάκων δρομολόγησης και την συνολικής κυκλοφορίας των δεδομένων στο δίκτυο. Όταν ένας κόμβος πρέπει να αναμεταδώσει ένα πακέτο, εάν ο προορισμός είναι ένας από τους γείτονες του, η διεύθυνση βρίσκεται στον πίνακα δρομολόγησης και το πακέτο διαβιβάζεται άμεσα. Διαφορετικά, το υποδίκτυο που πιθανά βρίσκεται ο προορισμός αναζητάει και το πακέτο καθοδηγείται προς το αντίστοιχο ορόσημο εκείνου του υποδικτύου. Το πακέτο εντούτοις δεν είναι αναγκαίο να περάσει μέσω του κόμβου ορόσημου αλλά μπορεί να προωθηθεί άμεσα στον προορισμό, μόλις φτάσει κοντά στο συγκεκριμένο υποδίκτυο.

Η ανταλλαγή ανανεωμένων πληροφοριών δρομολόγησης στο LANMAR είναι παρόμοια με του FSR. Κάθε κόμβος ανταλλάσσει περιοδικά πληροφορίες τοπολογίας με τους γείτονές του. Σε κάθε αναπροσαρμογή, ο κόμβος στέλνει τις νέες καταχωρήσεις στο πεδίο Fisheye του, συμπεριλαμβάνοντας επίσης στο μήνυμα αυτό ένα διάγραμμα απόστασης με μέγεθος ίσο με τον αριθμό των λογικών υποδικτύων (δηλ, των κόμβων ορόσημων). Μέσω αυτής της διαδικασίας ανταλλαγής, οι καταχωρήσεις στους πίνακες δρομολόγησης με τους μεγαλύτερους αριθμούς ακολουθίας αντικαθιστούν αυτούς με τους μικρότερους.

### ***3.8.6. Άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης***

Υπάρχει αφθονία προτάσεων πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Έως τώρα έχουμε αναφερθεί αναλυτικά στα σημαντικότερα από αυτά και παρακάτω θα προσπαθήσουμε για λόγους πληρότητας να περιγράψουμε μερικά άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης που υιοθετούν διαφορετικά κριτήρια βελτιστοποίησης της απόδοσης από αυτά που έχουμε περιγράψει έως τώρα.

#### ***3.8.6.1. Signal Stability Routing (SSR)***

Είναι ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης [ Dube 1997 ]. Αντίθετα από τους αλγορίθμους που περιγράφηκαν μέχρι τώρα, το SSR επιλέγει διαδρομές βασισμένες

στην ισχύ των σημάτων των ασύρματων πομποδεκτών μεταξύ των κόμβων και στην σταθερότητα διατήρησης της θέσης από τους κόμβους του δικτύου. Οι εντάσεις των σημάτων των γειτονικών κόμβων λαμβάνονται από περιοδικά αναγνωριστικά μηνύματα από το επίπεδο συνδέσεων κάθε κόμβου. Αυτό το κριτήριο επιλογής διαδρομών SSR έχει την επίδραση της επιλογής διαδρομών που αποτελούνται από συνδέσεις που έχουν «stronger connectivity» [ Chlamtac 1986 ].

#### 3.8.6.2. *Power Aware Routing*

Σε αυτό το πρωτόκολλο [ Singh 1998, Jin 2000 ] χρησιμοποιούνται μετρήσεις βασισμένες στην ισχύ κατανάλωσης κάθε κόμβου, για την επιλογή των διαδρομών στο ασύρματο ad-hoc δίκτυο. Έχει αποδειχθεί ότι η χρησιμοποίηση τέτοιων χαρακτηριστικών σε έναν αλγόριθμο δρομολόγησης, που βασίζεται στην εύρεση της συντομότερης διαδρομής, μειώνει το κόστος ανά πακέτο στην διαδικασία δρομολόγησης κατά 5 - 30 τοις εκατό σε σχέση με τη δρομολόγηση της συντομότερης διαδρομής. Η χρησιμοποίηση τέτοιων μεθόδων εξασφαλίζει ότι ο μέσος χρόνος ζωής των κόμβων αυξάνεται σημαντικά και κατά συνέπεια ο χρόνος που μπορεί το δίκτυο να διατηρηθεί ενεργό αυξάνεται, χωρίς τελικά η καθυστέρηση παράδοσης των δεδομένων να αυξάνεται. Τέτοια πρωτόκολλα έχουν μεγάλη χρήση στην περίπτωση που το ασύρματο ad-hoc δίκτυο αποτελείται από σένσορες, οι οποίοι είναι συσκευές που έχουν περιορισμένη ενέργεια και είναι κρίσιμο να διατηρηθεί το δίκτυο ενεργό όσο το δυνατό περισσότερο.

#### 3.8.6.3. *Associativity Based Routing*

Το πρωτόκολλο ABR (ABR) [ Toh 1997 ], είναι μια διαφορετική προσέγγιση στην δρομολόγηση ad-hoc ασύρματων δικτύων. Στις διαδρομές που ανακαλύπτει είναι απαλλαγμένο από βρόχους, αδιέξοδα (deadlocks), παραλαβή διπλών πακέτων και καθορίζει μια νέα τεχνική δρομολόγησης για τα ad-hoc ασύρματα δίκτυα. Στο ABR, μια διαδρομή επιλέγεται βασιζόμενη σε ένα παράγοντα που είναι γνωστός ως βαθμός συσχέτισης της ευστάθειας (degree of associativity stability). Κάθε κόμβος παράγει περιοδικά ένα αναγνωριστικό μήνυμα για να δηλώσει την ύπαρξή του στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Όταν το μήνυμα αυτό παραλαμβάνεται από τους γειτονικούς κόμβους, αναγκάζει τους πίνακες συσχέτισης να ενημερωθούν. Για κάθε αναγνωριστικό μήνυμα καταγραφής της συσχέτισης του τρέχοντος κόμβου, σε σχέση με τον κόμβο προέλευσης του μηνύματος, αυξάνεται. Η συσχέτιση της ευστάθειας καθορίζεται από τη

σταθερότητα σύνδεσης ενός κόμβου όσον αφορά έναν άλλο κόμβο στο χρόνο και στο χώρο. Ένας υψηλός (χαμηλός) βαθμός συσχέτισης της ευστάθειας μπορεί να δείξει μια χαμηλή (υψηλή) κατάσταση κινητικότητας των κόμβων. Οι δείκτες καταγραφής ρυθμίζονται ξανά όταν κινούνται οι γείτονες ενός κόμβου ή ο ίδιος ο κόμβος απομακρύνεται. Ένας θεμελιώδης στόχος ABR είναι να παραχθούν διαδρομές που έχουν μεγάλο χρόνο ζωής για τα ειδικά δίκτυα. Οι τρεις φάσεις του ABR είναι: Ανακάλυψη διαδρομών, Αναδημιουργία διαδρομών (RRC) και Διαγραφή διαδρομών.

Η φάση ανακάλυψης διαδρομών υλοποιείται από μια συνεχή διαδικασία μετάδοσης μιας ερώτησης και αναμονή μιας απάντησης (Broadcast Query Reply, BQ-REPLY). Ένας κόμβος που επιθυμεί μια διαδρομή μεταδίδει ένα μήνυμα BQ σε αναζήτηση των κόμβων που έχουν μια διαδρομή προς τον προορισμό. Όλοι οι κόμβοι που λαμβάνουν την ερώτηση (χωρίς να είναι ο τελικός προορισμός του μηνύματος) επισυνάπτουν τις διευθύνσεις τους και τους δείκτες συσχέτισης τους, σε σχέση με τους γείτονές τους, μαζί με πληροφορίες ποιότητας των συνδέσεων QoS στο πακέτο ερώτησης. Ο κόμβος στον οποίο προωθείται το μήνυμα σβήνει τις καταχωρήσεις των δεικτών συσχέτισης των προς τα πάνω γειτόνων κόμβων του και διατηρεί μόνο αυτές τις καταχωρήσεις που συσχετίζονται με αυτόν και τους κόμβους που είναι αντίθετα με την κατεύθυνση προώθησης του μηνύματος. Κατ' αυτό τον τρόπο, κάθε πακέτο που φθάνει στον προορισμό περιέχει τους δείκτες συσχέτισης των κόμβων κατά μήκος της διαδρομής. Ο κόμβος προορισμού έπειτα είναι ικανός να επιλέξει την καλύτερη διαδρομή με την εξέταση των δεικτών συσχέτισης κατά μήκος κάθε μίας από τις διαδρομές. Όταν οι πολλαπλές διαδρομές έχουν τον ίδιο γενικό βαθμό συσχέτισης ευστάθειας, η διαδρομή με τον ελάχιστο αριθμό συνδέσεων επιλέγεται. Ο προορισμός στέλνει έπειτα ένα πακέτο απάντησης πίσω στον κόμβο προέλευσης. Οι κόμβοι που προωθούν το μήνυμα αυτό χαρακτηρίζουν τις διαδρομές τους ως έγκυρες. Όλες οι άλλες διαδρομές παραμένουν ανενεργές, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η αποστολή διπλών πακέτων να φθάνουν στον προορισμό.

### ***3.8.7. Πολλαπλής διανομής, πρωτόκολλα δρομολόγησης***

Το Multicasting είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πακέτα δεδομένων από μια συσκευή αποστέλλονται ταυτόχρονα μέσω πολλαπλών μονοπατιών στον προορισμό τους. Όπως και με τα κλασσικά ενσύρματα δίκτυα το multicasting σε ένα MANET είναι επίσης δύσκολο να επιτευχθεί και είναι ακόμα δυσκολότερο στην περίπτωση της κίνησης

των κόμβων που δημιουργούν αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου αρκετά συχνά. Επομένως, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αυτά πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και τις αλλαγές θέσεως των κόμβων. Αν και δεν είναι τμήμα της συγκεκριμένης εργασίας, θεωρούμε σκόπιμο για λόγους πληρότητας να αναφερθούμε απλά στα δύο σημαντικότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης με χρήση πολλαπλών μονοπατιών, το AODV και το ODMRP, που προτείνονται από ομάδα εργασίας MANET της IETF [ MANET, IETF ].

#### 3.8.7.1. *Multicasting AODV (MAODV)*

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης AODV με την χρήση πολλαπλών μονοπατιών χρησιμοποιεί παρόμοια μηνύματα ελέγχου της διαδικασίας δρομολόγησης RREQ και RREP με τον αλγόριθμο δρομολόγησης που περιγράψαμε παραπάνω (παραγράφος) για τον unicast AODV [ Royer 1999 ]. Οι κόμβοι προσχωρούν σε μια ομάδα πολλαπλής προώθησης δεδομένων κατόπιν σχετικής αιτήσεως (on-demand), δημιουργώντας ένα δέντρο πολλαπλής διανομής (multicast-tree) μεταξύ τους. Το δέντρο αυτό αποτελείται από τα μέλη της ομάδας και κόμβους συνδεδεμένους με τα μέλη της ομάδας, επιτρέπει σε έναν άλλο κόμβο να μπορεί να προσχωρήσει σε μια πολλαπλής διανομής ομάδα ακόμα κι αν απαιτούνται περισσότεροι από ένα σύνδεσμοι για να προσεγγίσει ένα άλλο μέλος της ομάδας.

#### 3.8.7.2. *On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP)*

Το πρωτόκολλο ODMRP [ Bae 2000 ] βασίζεται στην δημιουργία ενός πλέγματος μεταξύ των κόμβων (mesh-based) αντί δέντρου που χρησιμοποιεί το προηγούμενο, που επιτρέπει την δρομολόγηση δεδομένων μέσω πολλαπλών διαδρομών, παρέχοντας καλύτερη συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων. Με την δημιουργία ενός πλέγματος παρέχονται πολλαπλές διαδρομές και τα πακέτα μπορούν να παραδοθούν στους προορισμούς τους καθώς οι κόμβοι μετακινούνται και αλλάζουν θέσεις στο δίκτυο. Επιπλέον, τα μειονεκτήματα των multicast δέντρων στα ασύρματα κινητά ad-hoc δίκτυα (π.χ., διαλείπουσα συνδεσιμότητα, συχνός επανα-σχηματισμός του δέντρου, συγκέντρωση κυκλοφορίας, και άλλων) αποφεύγεται. Για να δημιουργηθεί ένα πλέγμα για κάθε ομάδα πολλαπλής διανομής δεδομένων, ο ODMRP χρησιμοποιεί την έννοια της προώθησης ανά ομάδας [ Chiang 1998 ]. Η έννοια αυτή περιγράφει ότι η ομάδα προώθησης (forwarding group) είναι ένα σύνολο αρμόδιων κόμβων για την μετάδοση των multicast δεδομένων όσο αφορά τις κοντινότερες διαδρομές μεταξύ οποιωνδήποτε

δυο κόμβων. Ο ODMRP ενεργοποιεί τις διαδικασίες δρομολόγησης κατόπιν παραγγελία (on-demand), για να αποφευχθεί η συνολική καθυστέρηση, με στόχο τη βέλτιστη απόδοση του πρωτοκόλλου σε μεγαλύτερα δίκτυα. Κανένα μήνυμα ελέγχου δεν απαιτείται για να αφήσει ένας κόμβος μια ομάδα.

## Κεφάλαιο 4

### Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ DYNAMIC SOURCE ROUTING (DSR)

#### 4. Dynamic Source Routing for Multihop Wireless Ad-hoc Networks

Ο δυναμικός αλγόριθμος δρομολόγησης για ασύρματα ad-hoc δίκτυα είναι ένα απλό και αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης σχεδιασμένο ειδικά για χρήση πάνω από ασύρματα δίκτυα πολλαπλών συνδέσεων (hops) στα οποία οι κόμβοι δεν παραμένουν στάσιμοι αλλά κινούνται. Ο DSR επιτρέπει στο δίκτυο στο οποίο χρησιμοποιείται να είναι πλήρως αυτόνομο, τόσο στην διαδικασία οργάνωσης όσο και στη διαδικασία προσδιορισμού των διαφόρων παραμέτρων του δικτύου, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία κάποιας προϋπάρχουσας δικτυακής υποδομής ή διαχείρισης του δικτύου. Το πρωτόκολλο αποτελείται από δύο ξεχωριστούς και αυτόνομους μηχανισμούς, την «Εύρεσης των Διαδρομών» (Route Discovery) και τη «Διατήρησης Διαδρομών» (Route Maintenance), οι οποίες συνεργάζονται και λειτουργούν παράλληλα επιτρέποντας στους κόμβους του δικτύου να ανακαλύπτουν διαδρομές πηγής (source routes) προς κάθε δυνατό προορισμό που επιθυμούν και να τις διατηρούν στην πάροδο του χρόνου λειτουργίας. Η επιλογή της χρήσης διαδρομών πηγής, επιτρέπει την μεταγωγή πακέτων δεδομένων με την χρήση μονοπατιών που δεν περιέχουν βρόγχους. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι χωρίς να χρειάζονται επιπλέον πληροφορίες για την κατάσταση των συνδέσεων στο δίκτυο, προωθούν τα πακέτα, σύμφωνα με την διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσουν στον επόμενο κόμβο, έως ότου αυτά φτάσουν στον προορισμό του. Παράλληλα οι ενδιάμεσοι κόμβοι αποθηκεύουν σε ειδικούς πίνακες τις πληροφορίες δρομολόγησης, που μεταφέρουν τα πακέτα, για μελλοντική χρήση. Όλες οι λειτουργίες του πρωτοκόλλου λειτουργούν κατόπιν σχετικού αιτήματος από τους ενδιαφερόμενους κόμβους, επιτρέποντας την κλιμάκωση αυτού ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις συνθήκες στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό η καθυστέρηση, που οφείλεται στη διαδικασία εύρεσης μιας διαδρομής με τον DSR, κλιμακώνεται ανάλογα της αντίδρασης του πρωτοκόλλου στις διαδρομές που χρησιμοποιούνται.



#### **4.1. Εισαγωγή**

Το δυναμικό πρωτόκολλο δρομολόγησης πηγής (DSR) [ Johnson 1994, Johnson 1996a, Το Broch 1999a ] είναι ένα απλό και αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης που σχεδιάστηκε ειδικά για χρήση σε ασύρματα ad-hoc δίκτυα πολλαπλών συνδέσεων (hop) κινητών κόμβων. Χρησιμοποιώντας τον DSR, το δίκτυο είναι εντελώς αυτόνομο και δεν απαιτείται η ύπαρξη κάποιας υποδομής ή κεντρικής διαχείρισης αυτού. Οι κόμβοι του δικτύου μπορούν και πρέπει να συνεργάζονται για την μεταφορά των πακέτων από τον ένα στον άλλον, ούτως ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των κόμβων αυτών, που η απευθείας επικοινωνία δεν είναι δυνατή. Καθώς οι κόμβοι στο δίκτυο κινούνται, συνδέονται ή αποσυνδέονται από αυτό, οι συνθήκες του δικτύου, όπως παρεμβολές στο ασύρματο μέσο, εμπόδια στην ασύρματη μετάδοση των δεδομένων και τα δεδομένα δρομολόγησης, καθορίζονται αυτόματα από το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSR. Δεδομένου ότι ο αριθμός ή η ακολουθία ενδιάμεσων συνδέσεων (hop), που πρέπει να διανύσουν τα πακέτα για να φθάσουν σε οποιοδήποτε πιθανό προορισμό, μπορεί να αλλάξει οποιαδήποτε στιγμή και η προκύπτουσα τοπολογία του δικτύου κάθε στιγμή μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική. Το πρωτόκολλο DSR επιτρέπει στους κόμβους να ανακαλύπτουν δυναμικά νέες διαδρομές προς οποιοδήποτε προορισμό του δικτύου. Κάθε πακέτο δεδομένων που αποστέλλεται, μεταφέρει στην επικεφαλίδα (header) του την πλήρη διαδρομή που πρέπει να διανύσει για να φτάσει στον προορισμό του, επιτρέποντας στο πρωτόκολλο δρομολόγησης να είναι λειτουργικό και απλό για τους ενδιάμεσους κόμβους, αποφεύγοντας παράλληλα την ενδεχόμενη ύπαρξη κυκλικών βρόχων μέσα στη διαδρομή. Ταυτόχρονα με την μεταγωγή των πακέτων οι ενδιάμεσοι κόμβοι αποκτούν νέες πληροφορίες δρομολόγησης, τις οποίες τις συλλέγουν και τις αποθηκεύουν σε ειδικούς πίνακες για μελλοντική χρήση.

#### **4.2. Υποθέσεις στην λειτουργία του πρωτοκόλλου**

Παρακάτω παραθέτουμε μερικές από τις βασικές λειτουργικές υποθέσεις πάνω στις οποίες βασίστηκε η σχεδίαση και η υλοποίηση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης DSR.

#### ***4.2.1. Διαθεσιμότητα των κόμβων και συμμετοχή στις λειτουργίες του πρωτοκόλλου.***

Υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου, που επιθυμούν να επικοινωνήσουν με άλλους κόμβους μέσα σε ένα ad-hoc δίκτυο, είναι πρόθυμοι να συμμετέχουν πλήρως στην διαδικασία δρομολόγησης των πακέτων του δικτύου. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος που συμμετέχει στο δίκτυο, πρέπει να είναι πρόθυμος να μεταγάγει πακέτα για τους άλλους κόμβους του δικτύου.

#### ***4.2.2. Διάμετρος του δικτύου***

Αναφερόμαστε στον ελάχιστο αριθμό μονοπατιών που απαιτούνται, για να μεταδοθεί ένα πακέτο, από οποιοδήποτε κόμβο που βρίσκεται σε μία ακριανή θέση του ad-hoc δικτύου, σε έναν άλλο κόμβο που βρίσκεται στο αντίθετο άκρο, σαν «διάμετρο» του δικτύου. Υποθέτουμε ότι η διάμετρος ενός τέτοιου δικτύου θα είναι συχνά μικρή (π.χ. με τιμές από 5 έως 10 μονοπάτια), αλλά συχνά μπορεί να είναι μεγαλύτερη από ένα.

#### ***4.2.3. Αλλοιωμένα πακέτα***

Τα πακέτα που μεταδίδονται σε ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να χαθούν ή να αλλοιωθούν. Ένας κόμβος που λαμβάνει ένα αλλοιωμένο πακέτο έχει την ικανότητα να το ανιχνεύσει και να το απορρίψει.

#### ***4.2.4. Μοντέλο κίνησης των κόμβων***

Οι κόμβοι μέσα στο ειδικό δίκτυο μπορούν να κινηθούν οποιαδήποτε στιγμή χωρίς προειδοποίηση και να συνεχίσουν να κινούνται συνεχώς και προς τυχαία κατεύθυνση. Υποθέτουμε ότι η ταχύτητα με την οποία οι κόμβοι κινούνται είναι συγκρίσιμη (moderate) σε σχέση με την καθυστέρηση στην ασύρματη μετάδοση των πακέτων από τα χαμηλότερα επίπεδα του δικτύου. Συγκεκριμένα ο DSR μπορεί να υποστηρίξει δίκτυα στα οποία οι κόμβοι τους κινούνται με οποιαδήποτε ταχύτητα, αργά ή γρήγορα, και προς οποιαδήποτε τυχαία κατεύθυνση. Υποθέτουμε όμως ότι οι κόμβοι δεν κινούνται συνεχώς τόσο γρήγορα ώστε να αναγκάζουν το πρωτόκολλο να ενεργοποιεί για κάθε πακέτο την διαδικασία εύρεσης μίας νέας διαδρομής, με αποτέλεσμα η καθυστέρηση στη μετάδοση να είναι πολύ μεγαλύτερη από την περίπτωση χρήσης της τεχνικής της πλημμύρα κάθε μεμονωμένου πακέτου στο δίκτυο, ελπίζοντας κάποιο από αυτά να φτάσει στον προορισμό του.

#### **4.2.5. Λειτουργία *promiscuous mode***

Υποθέτουμε ότι οι κόμβοι μπορούν να ενεργοποιήσουν την λειτουργία *promiscuous mode* στο υλικό της ασύρματης διεπαφής του δικτύου τους, αναγκάζοντας το να παραδίδει κάθε λαμβανόμενο πακέτο στα ανώτερα στρώματα του δικτύου, χωρίς να φιλτράρει τη διεύθυνση προορισμού των πακέτων, απορρίπτοντας όλα αυτά που δεν προορίζονται για τον συγκεκριμένο κόμβο. Με αυτόν τον τρόπο οι κόμβοι λαμβάνουν όλα τα πακέτα που μπορούν να «ακούσουν» στο ασύρματο κανάλι. Αν και δεν απαιτείται, η δυνατότητα αυτή είναι κοινή στο υλικό που χρησιμοποιείται στις δικτυακές ασύρματες κάρτες σήμερα και μερικές από τις βελτιστοποιήσεις του πρωτοκόλλου DSR μπορούν να εκμεταλλευθούν τη δυνατότητα αυτή. Η χρήση του *promiscuous* τρόπου μπορεί επίσης να αυξάνει την κατανάλωση ισχύος του υλικού του δικτύου, αφού πρέπει ο ασύρματος πομποδέκτης να μένει ενεργός πολύ περισσότερο χρόνο. Αν και έχει παρατηρηθεί ότι οι βελτιστοποιήσεις που έχουν γίνει κάνουν τον DSR περισσότερο αποδοτικό, το πρωτόκολλο μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί και χωρίς αυτές ή να προγραμματιστεί, ώστε να τις ενεργοποιεί περιοδικά.

#### **4.2.6. Αμφίδρομη και μη-αμφίδρομη επικοινωνία**

Η δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ οποιωνδήποτε κόμβων μπορεί κατά περιόδους να μην λειτουργεί εξίσου καλά και προς στις δύο κατευθύνσεις, οφειλόμενη παραδείγματος χάριν, στην χρήση διαφορετικών κεραιών σε κάθε κόμβο, πανκατευθυντικών ή κατευθυντικών, διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή των πηγών παρεμβολών γύρω από τους κόμβους [ Bantz 1994, Lauer 1995 ]. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η επικοινωνία μεταξύ δυο κόμβων σε πολλές περιπτώσεις να λειτουργεί και προς τις δύο κατευθύνσεις, αλλά σε άλλες να λειτουργεί μόνο προς τη μία κατεύθυνση, κάθε χρονική στιγμή, επιτρέποντας την επικοινωνία προς την μία φορά. Αν και πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης λειτουργούν σωστά μόνο στην πρώτη περίπτωση ο DSR μπορεί επιτυχώς να ανακαλύψει τις διαδρομές σε ένα δίκτυο και να δρομολογήσει τα πακέτα τόσο στην πρώτη όσο και στην δεύτερη περίπτωση. Αν και μερικά πρωτόκολλα περιορίζονται να χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο ένας ή ο άλλος τύπος από συνδέσεις, ο DSR μπορεί να λειτουργήσει εξίσου καλά και αποδοτικά και με τα δύο, εκμεταλλευόμενος πρόσθετες βελτιστοποιήσεις.

#### **4.2.7. Ανάθεση διευθύνσεων IP στους κόμβους του δικτύου.**

Κάθε κόμβος επιλέγει μια μοναδική διεύθυνση IP από την οποία αναγνωρίζεται στο δίκτυο. Αν και ένας κόμβος μπορεί να έχει πολλές διαφορετικές διεπαφές δικτύων και όπως σε ένα κλασικό δίκτυο IP, σε κάθε μια από αυτές θα αντιστοιχούσε μια διαφορετική διεύθυνση IP, απαιτούμε από τους κόμβους, κατά την συμμετοχή στο πρωτόκολλο DSR, να επιλέξουν και να χρησιμοποιούν μόνο μία από τις διευθύνσεις αυτές. Με τον τρόπο αυτό κάθε κόμβος μπορεί να αναγνωριστεί από όλους τους υπόλοιπους στο δίκτυο, ανεξάρτητα από το ποια συγκεκριμένη διεπαφή χρησιμοποιείται για να επικοινωνήσουν με αυτούς. Σύμφωνα με την ορολογία που χρησιμοποιείται από το Mobile IP, αναφερόμαστε στη διεύθυνση την οποία χρησιμοποιεί κάθε κινητός κόμβος σε ένα ad-hoc δίκτυο ως «home address». Η διεύθυνση αυτή μπορεί να οριστεί από οποιοδήποτε μηχανισμό (ε.g., στατική ή δυναμική ανάθεση, με χρήση DHCP [ Droms 1997 ]). Η επιλογή της μεθόδου ανάθεσης διευθύνσεων IP είναι έξω από το πεδίο και το σκοπό του πρωτοκόλλου δρομολόγησης DSR και δεν επηρεάζει την απόδοση του.

### **4.3. Περιγραφή του πρωτοκόλλου DSR**

#### **4.3.1. Επισκόπηση και Σημαντικές Ιδιότητες του πρωτοκόλλου**

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSR αποτελείται από δύο μηχανισμούς που λειτουργούν (συνεργάζονται) ταυτόχρονα για την ανακάλυψη διαδρομών και τη διατήρησή τους σε ένα ασύρματο ad-hoc τηλεπικοινωνιακό δίκτυο.

Η εύρεση διαδρομών είναι ο μηχανισμός κατά τον οποίο ένας κόμβος S που επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο σε έναν κόμβο προορισμού D ζητάει και λαμβάνει μια διαδρομή για τον κόμβο αυτό. Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιείται μόνο όταν επιχειρεί ο κόμβος S να στείλει ένα πακέτο στον D και δεν γνωρίζει ήδη μια διαδρομή προς αυτόν.

Η συντήρηση διαδρομών είναι ο μηχανισμός κατά τον οποίο ένας κόμβος S ανιχνεύει, αν μια ήδη υπάρχουσα και χρησιμοποιούμενη διαδρομή για έναν κόμβο προορισμού D είναι σωστή ή όχι επιτρέποντας την επικοινωνία ανάμεσα τους, στην περίπτωση που η τοπολογία του δικτύου έχει αλλάξει και δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η διαδρομή αυτή, επειδή κατά μήκος της διαδρομής ένα μονοπάτι δεν λειτουργεί. Όταν η διαδικασία αυτή υποδείξει μια διαδρομή η οποία σε κάποιο σημείο είναι «διακομμένη», δηλαδή μία συγκεκριμένη σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων της διαδρομής έχει διακοπεί, ο

κόμβος S μπορεί να προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε άλλη διαδρομή συμβαίνει να γνωρίζει για τον D ή να ενεργοποιήσει την διαδικασία εύρεσης διαδρομών για τον D. Η συντήρηση διαδρομών χρησιμοποιείται μόνο κατά την διάρκεια αποστολής δεδομένων από τον S στον D.

Η εύρεση και η συντήρηση διαδρομών λειτουργούν εξ ολοκλήρου αυτόνομα και μόνο μετά από αντίστοιχη αίτηση ενός κόμβου. Ειδικότερα και αντίθετα από άλλα πρωτόκολλα, ο DSR δεν απαιτεί την ύπαρξη περιοδικά λαμβανόμενων μηνυμάτων ελέγχου, με πληροφορίες για τις αλλαγές στις διαδρομές του δικτύου, λόγω της αλλαγής της φυσικής θέσης των κόμβων, για την συντήρηση των διαδρομών που έχουν ήδη ανακαλυφθεί. Και οι δυο βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας του πρωτοκόλλου ενεργοποιούνται μόνο μετά από σχετική απαίτηση των κόμβων του δικτύου, επιτρέποντας έτσι την κλιμάκωση της κίνησης που δημιουργούν τα πακέτα ελέγχου του DSR, για την εύρεση και συντήρηση των διαδρομών προς το μηδέν, όταν όλοι οι κόμβοι είναι περίπου στάσιμοι και όλες οι διαδρομές που απαιτούνται για την τρέχουσα επικοινωνία έχουν ήδη ανακαλυφθεί. Αυτό σημαίνει ότι η κίνηση που δημιουργείται λόγω των πακέτων των διαδικασιών εύρεσης και συντήρησης διαδρομών κλιμακώνεται ανάλογα και προσαρμόζεται σύμφωνα με τις ανάγκες του πρωτοκόλλου για την επιτυχή δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων, ανάλογα με την κινητικότητα και σχετική θέση των κόμβων στο δίκτυο, (δηλ. αυξάνεται όταν παρατηρείται μεγάλη κινητικότητα και μειώνεται όταν η κινητικότητα είναι μικρή).

Οι κόμβοι συνήθως αποθηκεύουν μόνο μία διαδρομή για κάθε προορισμό μέσα σε ένα ad-hoc δίκτυο, είτε αυτή προκύπτει από την διαδικασία εύρεσης διαδρομών, είτε από τις πληροφορίες δρομολόγησης, που συλλέγουν κατά την μεταγωγή πακέτων δεδομένων. Ένας κόμβος όμως μπορεί να αποθηκεύσει πολλαπλές διαδρομές για οποιοδήποτε προορισμό. Αυτό επιτρέπει την γρήγορη αντίδραση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, εξαιτίας των αλλαγών των τοπολογικών χαρακτηριστικών του δικτύου, οι οποίες έχουν σαν άμεσο αποτέλεσμα την ανάγκη εύρεσης νέων διαδρομών προς τους προορισμούς. Σε μία τέτοια περίπτωση ο κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει μία από τις αποθηκευμένες διαδρομές προς τον προορισμό, όταν αυτή που ήδη χρησιμοποιεί αποτύχει στην αποστολή των δεδομένων. Ο μηχανισμός αυτός δημιουργεί μικρότερη καθυστέρηση στην εύρεση μιας νέας διαδρομής, μετά από την ανακάλυψη μιας

«διακομμένης» διαδρομής, από την καθυστέρηση που θα παρατηρούσαμε από την ενεργοποίηση ξανά της διαδικασίας εύρεσης διαδρομών.

Η λειτουργία της εύρεσης και της συντήρησης διαδρομών υποστηρίζονται, τόσο από ασύρματα κανάλια που λειτουργούν είτε προς την μία ή την άλλη κατεύθυνση, όσο και από κανάλια που υποστηρίζουν την μετάδοση δεδομένων ταυτόχρονα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ο DSR επιτρέπει σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο την ύπαρξη και των δύο τύπων ασύρματων καναλιών αφού μπορεί να λειτουργήσει εξίσου αποδοτικά και στις δύο περιπτώσεις.

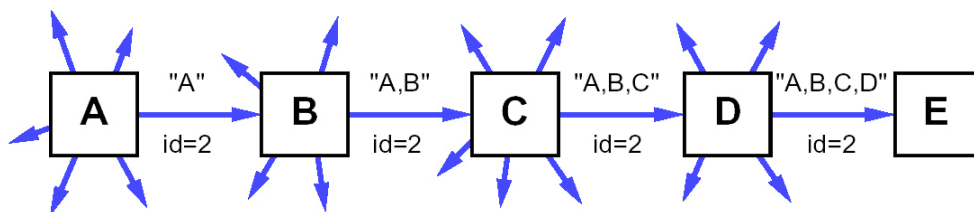
Τελειώνοντας την επισκόπηση των σημαντικότερων χαρακτηριστικών του DSR αναφέρουμε ότι υποστηρίζει επίσης και τη δια-σύνδεση ενός ασύρματου ad-hoc δικτύου με ένα οποιοδήποτε άλλο δίκτυο, διαφορετικού τύπου, επιτρέποντας σε μια διαδρομή από την πηγή προς τον κόμβο προορισμού, να μπορεί να αποτελείται από μονοπάτια κόμβων που ανήκουν είτε στο ένα είτε στο άλλο δίκτυο [ Broch 1999b ]. Υποστηρίζει την εύρεση διαδρομών για κόμβους που βρίσκονται έξω από ένα ad-hoc δίκτυο και ανήκουν στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό, αρκεί ο κόμβος του ad-hoc δικτύου που χρησιμοποιείται ως «πύλη» (gateway) να μπορεί να συμπληρώσει την αίτηση για το εν λόγω μονοπάτι και να επιστρέψει την πλήρη διαδρομή στην πηγή, με το κομμάτι που ανήκει στο άλλο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή ο κόμβος που ανήκει και στα δύο δίκτυα ονομάζεται «κόμβος πύλη» (gateway) και μπορεί να χρησιμοποιεί αλγόριθμους δρομολόγησης διαφορετικούς από τον DSR.

#### **4.4. Μηχανισμός εύρεσης διαδρομών**

Όταν κάποιος κόμβος S δημιουργεί ένα νέο πακέτο που προορίζεται για κάποιον άλλο κόμβο D, τοποθετεί στην επικεφαλίδα του πακέτου αυτού μια διαδρομή πηγής που δίνει την ακολουθία των κόμβων και συνδέσεων (hops), που το πακέτο πρέπει να ακολουθήσει για να φτάσει στον προορισμό του. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο DSR, ο κόμβος S θα αποκτήσει μια κατάλληλη διαδρομή δρομολόγησης από την cache, μια ειδική μνήμη που έχει αποθηκευμένες τις διαδρομές προς τους διάφορους κόμβους του ad-hoc δικτύου, που έχει ανακαλύψει μέχρι την παρούσα χρονική στιγμή. Εάν όμως κάποια διαδρομή δεν βρίσκεται στην cache, το πρωτόκολλο θα ενεργοποιήσει τον μηχανισμό εύρεσης διαδρομών για να βρει μια νέα διαδρομή προς τον S. Σε αυτήν την

περίπτωση καλούμε τον S κόμβο προέλευσης και τον D κόμβο προορισμού του μηχανισμού εύρεσης διαδρομών.

Στην παρακάτω εικόνα περιγράφεται ένα παράδειγμα εύρεσης μιας διαδρομής, στο οποίο ένας κόμβος A προσπαθεί να ανακαλύψει μια διαδρομή προς τον κόμβο E. Για να ξεκινήσει η διαδικασία, ο κόμβος A μεταδίδει ένα μήνυμα «Route Request» προς όλους τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται στην εμβέλεια του. Κάθε τέτοιο μήνυμα προσδιορίζει τους κόμβους προέλευσης και προορισμού και περιέχει ένα αριθμό μοναδικό και καθορισμένο από τον κόμβο προέλευσης του κάθε αιτήματος εύρεσης μιας διαδρομής. Κάθε τέτοιο μήνυμα επίσης περιέχει ένα πεδίο στο οποίο υπάρχουν οι διευθύνσεις κάθε ενδιαμέσου κόμβου μέσω του οποίου τα αντίγραφο του αρχικού αιτήματος έχουν διαβιβαστεί και καταλήξει στον κόμβο αυτό. Αυτό το πεδίο αρχικοποιείται με έναν κενό κατάλογο όταν ενεργοποιείται η διαδικασία εύρεσης διαδρομών.



Εικόνα 1: Μηχανισμός Εύρεσης Διαδρομών (παράδειγμα)

Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα «Route Request», εάν είναι ο κόμβος προορισμού της συγκεκριμένης διαδικασία εύρεσης διαδρομής, επιστρέφει ένα μήνυμα «Route Reply» στον κόμβο προέλευσης του αιτήματος, δίνοντας και ένα αντίγραφο του πεδίου των διαδρομών από το πακέτο του «Route Request». Όταν ο κόμβος προέλευσης λάβει το «Route Reply», αποθηκεύει στην «Route Cache» του την διαδρομή, για τη χρήση της στην μετέπειτα αποστολή των δεδομένων. Εάν ο κόμβος που λαμβάνει το «Route Request» έχει δει πρόσφατα και άλλο μήνυμα «Route Request» από τον ίδιο προορισμό με τον ίδιο αριθμό ταυτότητας στο αίτημα ή εάν διαπιστώνει ότι η διεύθυνσή του κόμβου αυτού παρατίθεται ήδη στο πεδίο διαδρομών του μηνύματος, αγνοεί το συγκεκριμένο μήνυμα και καταστρέφει το σχετικό πακέτο. Διαφορετικά, αυτός ο κόμβος επισυνάπτει τη διεύθυνσή του στο πεδίο διαδρομών στο μήνυμα «Route

Request» και το προωθεί σε όλους τους κόμβους που βρίσκονται στην εμβέλεια του, με τον ίδιο αριθμό ταυτότητας του συγκεκριμένου αιτήματος, για να συνεχιστεί η διαδικασία.

Στην επιστροφή του μηνύματος «Route Reply» από τον κόμβος E, στον κόμβο A που ενεργοποίησε την διαδικασία, βλέπε στο παραπάνω σχήμα, θα προσπαθήσει να εντοπίσει και ο E μία διαδρομή προς τον A, χρησιμοποιώντας αρχικά την «Route Cache» για να εντοπίσει την διαδρομή αυτή. Εάν βρίσκεται εκεί μια διαδρομή θα τη χρησιμοποιήσει, ενώ σε διαφορετική περίπτωση θα ενεργοποιήσει τον μηχανισμό εύρεσης διαδρομών. Για να αποφύγουν πιθανές άπειρες επαναλήψεις της διαδικασίας αυτής, δηλαδή των επαναλαμβανόμενων διαδικασιών εύρεσης διαδρομών, ο κόμβος E πρέπει να μεταφέρει στο μήνυμα της αίτησης για την διαδρομή προς τον A «Route Request» και την απάντησή του, «Route Reply», στην πρότερη αίτηση από τον A. Ο κόμβος E θα μπορούσε απλά να αντιστρέψει την ακολουθία των μονοπατιών, που υπάρχει στο πεδίο διαδρομών, της αίτησης για εύρεση της διαδρομής που έλαβε και να χρησιμοποιήσει αυτή την διαδρομή για να αποστείλει την απάντησή του στον κόμβο προέλευσης του αιτήματος, μόνο αν το πρωτόκολλο MAC, όπως αυτό του IEEE 802.11, υποστηρίζει κανάλια που επιτρέπουν την ταυτόχρονη αποστολή δεδομένων και προς τις δύο κατευθύνσεις, (δηλ μία ενεργή σύνδεση από ένα κόμβο A στον B, προϋποθέτει, εξαιτίας του πρωτοκόλλου MAC, ότι και η σύνδεση από τον B στον A είναι ενεργή). Εντούτοις στον DSR υποστηρίζονται συνδέσεις που επιτρέπουν την μεταφορά δεδομένων είτε προς την μία είτε προς την άλλη κατεύθυνση είτε και προς τις δύο, οπότε ο μηχανισμός εύρεσης των διαδρομών είναι σχεδιασμένος για να υποστηρίζει και τους δύο τύπους καναλιών επικοινωνίας.

Κατά την έναρξη του μηχανισμού ανακάλυψης διαδρομών, ο κόμβος προέλευσης του αιτήματος αποθηκεύει ένα αντίγραφο του αρχικού μηνύματος σε έναν τοπικό προσωρινό πίνακα που ονομάζεται «Send Buffer». Ο πίνακας αυτός περιέχει ένα αντίγραφο κάθε πακέτου, που δεν μπορεί να διαβιβαστεί από τον συγκεκριμένο κόμβο, επειδή δεν υπάρχει διαθέσιμη ακόμα μια διαδρομή πηγής προς τον προορισμό του πακέτου. Κάθε τέτοιο πακέτο είναι μαρκαρισμένο με την χρονική στιγμή που τοποθετήθηκε στον «Send Buffer». Κάθε πακέτο είναι προβλεπόμενο να διαγραφεί από τον πίνακα αυτό μετά από κάποια προϋπολογισμένη περίοδο. Εάν είναι απαραίτητο να αντικαταστήσουμε κάποια εγγραφή λόγω υπέρ-πληρότητας, χρησιμοποιούμε κάποιο



αλγόριθμο αντικατάστασης δεδομένων, όπως ο (First In First Out, FIFO) ή οποιοδήποτε άλλο.

Όσο ένα πακέτο παραμένει στον «Send Buffer», ο κόμβος πρέπει περιστασιακά να φροντίσει να ενεργοποιεί ξανά τον μηχανισμό εύρεσης διαδρομών για τον προορισμό του πακέτου και ανάλογα με την πάροδο του χρόνου πρέπει να φροντίζει να μειώνει την συχνότητα ενεργοποίησης αυτής της διαδικασίας. Όταν για ένα προορισμό δεν καταφέρνουμε, για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, να βρούμε μία διαδρομή είναι πιθανό ο κόμβος αυτός να είναι εκτός του δικτύου και να μην είναι δυνατό να βρούμε τελικά μια τέτοια διαδρομή. Συγκεκριμένα, λόγω της περιορισμένης ασύρματης εμβέλειας των κόμβων και της κίνησης τους μέσα στο δίκτυο, κατά περιόδους το δίκτυο μπορεί να καταταμηθεί σε δύο ή περισσότερα τμήματα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει την δεδομένη χρονική περίοδο καμία ακολουθία μονοπατιών μεταξύ των κόμβων, μέσω των οποίων ένα πακέτο θα μπορούσε να διαβιβαστεί για να φθάσει στον προορισμό του. Ανάλογα με το μοντέλο μετακίνησης των κόμβων και την πυκνότητα των κόμβων στο δίκτυο, τέτοιες καταταμήσεις στα ad-hoc δικτύων μπορούν να είναι σπάνιες ή μπορεί να συμβαίνουν συχνά.

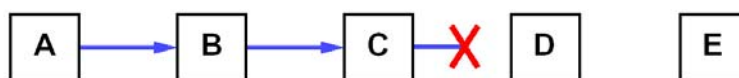
Εάν για κάθε μια τέτοια κατάσταση ενεργοποιείται ο μηχανισμός εύρεσης διαδρομών για κάθε πακέτο, ένας πολύ μεγάλος αριθμός από μη παραγωγικά «Route requests» θα προωθούνταν σε άλλους κόμβους του δικτύου. Για την μείωση του φαινομένου αυτού χρησιμοποιούμε μια τεχνική που ονομάζεται «exponential back-off», για να περιοριστεί ο ρυθμός με τον οποίο ενεργοποιούνται οι νέες ανακαλύψεις διαδρομών από οποιοδήποτε κόμβο του δικτύου, πάντα προς τον ίδιο κόμβο προορισμού. Εάν ένας κόμβος προσπαθεί να αποστείλει πακέτα δεδομένων προς τον ίδιο κόμβο συχνότερα από ότι το σχετικό όριο επιτρέπει, τα πακέτα που δεν μπορούν να μεταδοθούν πρέπει να αποθηκευτούν στον «Send Buffer», έως ότου παραλάβει ο κόμβος αυτός ένα «Route Reply», αλλά και πάλι ο κόμβος πρέπει να μην ενεργοποιεί την αναζήτηση διαδρομών μέχρι το ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο για τον συγκεκριμένο προορισμό επιτευχθεί [ Braden 1989 ].

#### **4.5. Μηχανισμός συντήρησης διαδρομών στον DSR**

Ο κόμβος που δημιουργεί ή προωθεί ένα πακέτο χρησιμοποιώντας μια διαδρομή πηγής, είναι αρμόδιος για την λήψη της επιβεβαίωσης, ότι το πακέτο έχει παραληφθεί

επιτυχώς από τον επόμενο στη διαδρομή δρομολόγησης κόμβο. Το πακέτο αυτό μπορεί να μεταδοθεί ξανά μέχρι έναν μέγιστο αριθμό προσπαθειών έως ότου η επιβεβαίωση για την επιτυχή μετάδοση του παραληφθεί.

Στο παράδειγμα που περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα, ο κόμβος A έχει δημιουργήσει ένα πακέτο για να το μεταδώσει στον κόμβο E, χρησιμοποιώντας μια διαδρομή πηγής, μέσω των ενδιάμεσων κόμβων B, C, και D. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κόμβος A είναι αρμόδιος για την λήψη του πακέτου από τον B, ο κόμβος B είναι αρμόδιος για την λήψη από τον C, ο κόμβος C είναι αρμόδιος για την λήψη από τον D, και ο κόμβος D είναι αρμόδιος για την παραλαβή του πακέτου τελικά από τον προορισμό E. Οι επιβεβαιώσεις παραλαβής των πακέτων από τον ένα κόμβο στον άλλο πάνω στο μονοπάτι της διαδρομής, σε πολλές περιπτώσεις, προσφέρονται στο πρωτόκολλο DSR χωρίς κόστος, είτε λόγω του υπάρχοντος πρωτοκόλλου MAC που χρησιμοποιείται (όπως οι επιβεβαιώσεις που υποστηρίζονται, στο επίπεδο συνδέσεων του δικτύου, από το πρότυπο της IEEE 802.11 [ IEEE 1997 ]), είτε από τις λεγόμενες παθητικές επιβεβαιώσεις (passive acknowledgements) [ Jubin 1987 ], στις οποίες ένας κόμβος επιβεβαιώνει μια επιτυχημένη παραλαβή από έναν άλλο κόμβο, προσπαθώντας να ακούσει τον άλλο κόμβο να μεταδίδει το πακέτο που έλαβε επιτυχώς, με τη σειρά του, στον επόμενο κόμβο. Εάν κανένας από αυτούς τους μηχανισμούς επιβεβαίωσης δεν είναι διαθέσιμος, ο κόμβος που διαβιβάζει το πακέτο μπορεί να θέσει ένα ειδικό πεδίο, στην επικεφαλίδα του πακέτου (header), για να ζητήσει την αποστολή μιας επιβεβαίωσης από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Το πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι εφόσον θα αναλάβει ο DSR να στείλει το μήνυμα επιβεβαίωσης, θα το κάνει χρησιμοποιώντας τις μεθόδους του μετάδοσης πακέτων δεδομένων, δηλαδή είτε θα χρησιμοποιήσει την σύνδεση ανάμεσα στους δύο κόμβους, εάν αυτή υποστηρίζει την μετάδοση δεδομένων και προς τις δύο κατευθύνσεις, ή στην περίπτωση που αυτό δεν συμβαίνει θα προσπαθήσει να εντοπίσει μια διαδρομή προς τον κόμβο αυτό, το οποίο μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα το μήνυμα επιβεβαίωσης να ταξιδέψει από διαφορετικό μονοπάτι.



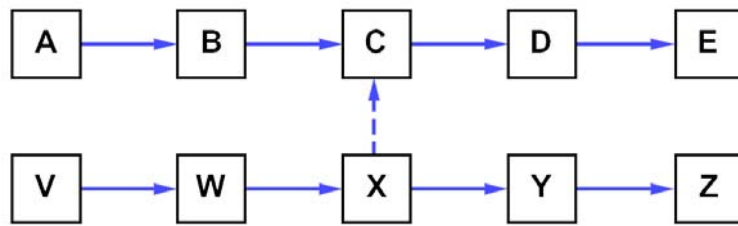
Εικόνα 2: Περίπτωση ενεργοποίησης μηχανισμού συντήρησης διαδρομών

Εάν ένας κόμβος έχει να προωθήσει ένα πακέτο το οποίο έχει ξεπεράσει το μέγιστο αριθμό αναμεταδόσεων, χωρίς να έχει λάβει επιβεβαίωση για την παραλαβή του, αυτός ο κόμβος δημιουργεί ένα μήνυμα «Route Error» και το στέλνει στον κόμβο που είχε αρχικά δημιουργήσει το πακέτο αυτό. Μέσα σε αυτό το μήνυμα περιέχονται όλες οι πληροφορίες για την σύνδεση πέρα από την οποία το πακέτο δεν μπορούσε να μεταδοθεί. Στην παραπάνω εικόνα, εάν ο κόμβος C δεν καταφέρει να παραδώσει το πακέτο που θέλει να προωθήσει στον επόμενο κόμβο D, επιστρέφει ένα μήνυμα «Route Error» στον κόμβο A, δηλώνοντας ότι η σύνδεση από τον C στον D είναι «διακομμένη». Ο κόμβος A αφαιρεί στη συνέχεια αυτήν την διαδρομή από την «Route Cache», θεωρώντας την άκυρη και οποιαδήποτε αναμετάδοση του αρχικού πακέτου στον προορισμό του είναι μια λειτουργία που θα εκτελέσουν τα ανώτερα στρώματα του δικτύου όπως το TCP, όταν το αντιληφθούν. Ο κόμβος A στην συνέχεια μπορεί να χρειαστεί μία νέα διαδρομή προς τον κόμβο E και για το λόγο αυτό πρέπει να μπορέσει να αντικαταστήσει την συγκεκριμένη διαδρομή με μία καινούρια ενεργή. Οι επιλογές που έχει είναι να χρησιμοποιήσει μία διαδρομή που βρίσκεται στην «Route Cache» του ή να ενεργοποιήσει τον μηχανισμό εύρεσης διαδρομών για τον συγκεκριμένο κόμβο, για να ανακαλύψει μια νέα διαδρομή, για να στείλει τελικά τα πακέτα δεδομένων.

#### **4.6. Επιπρόσθετες λειτουργίες εύρεσης διαδρομών**

##### ***4.6.1. Παρακολούθηση και αποθήκευση επιπρόσθετων πληροφοριών δρομολόγησης***

Ένας κόμβος που προωθεί ή που παρακολουθεί οποιοδήποτε πακέτο φτάνει στον ασύρματο δέκτη του, μπορεί να προσθέσει τις πληροφορίες δρομολόγησης που περιέχονται σε εκείνο το πακέτο στην «Route Cache» του. Συγκεκριμένα, η διαδρομή πηγής που χρησιμοποιείται σε ένα πακέτο δεδομένων, η ήδη υπολογισμένη διαδρομή που υπάρχει στο πεδίο ενός μηνύματος «Route Request» και η διαδρομή που υπάρχει σε ένα μήνυμα «Route Reply», είναι οι πληροφορίες που μπορεί ένας κόμβος να αποθηκεύει στην «Route Cache». Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να αποθηκεύονται από οποιαδήποτε κόμβο που, είτε το πακέτο απευθύνεται σε αυτόν είτε όχι.



Εικόνα 3: Περιορισμοί στην εναποθήκευση των πληροφοριών δρομολόγησης

Ένας περιορισμός, εντούτοις, στην αποθήκευση τέτοιων πληροφοριών δρομολόγησης είναι η ύπαρξη κατευθυνόμενων συνδέσεων στο ad-hoc δίκτυο. Παραδείγματος χάριν, το σχήμα 3 επεξηγεί μια κατάσταση στην οποία ο κόμβος A χρησιμοποιεί μια διαδρομή πηγής για να επικοινωνήσει με τον κόμβο E. Καθώς ο κόμβος C διαβιβάζει ένα πακέτο δεδομένων, κατά μήκος της διαδρομής από τον A στον E, μπορεί να προσθέσει στην «Route Cache» του τις «προς τα εμπρός» διαδρομές που μαθαίνει προς τους κόμβους D και E. Παρόλα' αυτά, οι προς τα πίσω διαδρομές που θα μπορούσε κάποιος να εξάγει από το μονοπάτι που ακολουθεί το πακέτο, από τον C προς τον B και από τον B στον A, μπορούν να μην λειτουργήσουν, επειδή οι συνδέσεις αυτές μπορεί να είναι κατευθυνόμενες προς την αντίθετη κατεύθυνση. Εάν ο κόμβος C γνωρίζει ότι οι συνδέσεις είναι αμφίδρομες, παραδείγματος χάριν λόγω του πρωτόκολλο MAC που χρησιμοποιείται από τα χαμηλότερα στρώματα του δικτύου, θα μπορούσε να τις αποθηκεύσει, ενώ αν γνώριζε το αντίθετο δεν θα έπρεπε να τις κρατήσει στην «Route Cache».

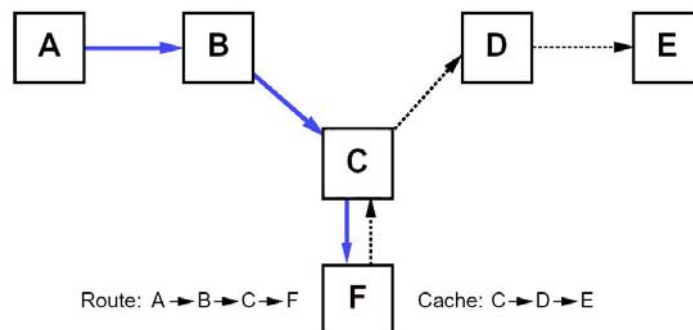
Επιπλέον, ο κόμβος V στην παραπάνω εικόνα χρησιμοποιεί μια διαφορετική διαδρομή πηγής για να επικοινωνήσει με τον κόμβο Z. Εάν ο κόμβος C παρακολουθεί τα πακέτα που προέρχονται από τον κόμβο X, για να τα διαβιβάσει στον Y (από τον V), ο κόμβος C πρέπει να εξετάσει εάν οι σχετικές συνδέσεις είναι αμφίδρομες ή όχι πριν τις αποθηκεύσει. Εάν η σύνδεση από τον X στον C (σύνδεση από την οποία το πακέτο παραλήφθηκε) είναι αμφίδρομη, ο C μπορεί να αποθηκεύσει τη σύνδεση από τον ίδιο στο X, τη σύνδεση από τον X στον Y, καθώς και τη σύνδεση από τον Y στον Z. Εάν μπορούμε να υποθέσουμε ότι όλες οι συνδέσεις είναι αμφίδρομες, ο C θα μπορούσε επίσης να αποθηκεύσει τις συνδέσεις από τον X στον W και από τον W στον B. Οι παρόμοιες εκτιμήσεις για τις συγκεκριμένες έγκυρες πληροφορίες, που πρέπει να

αποθηκεύουν οι κόμβοι, ισχύουν και για τις πληροφορίες δρομολόγησης που συλλέγονται από τα πακέτα των μηνυμάτων «Route Request» και «Route Cache».

#### 4.6.2. Απαντώντας στο μήνυμα «Route Request» χρησιμοποιώντας πληροφορίες από την «Route Cache».

Ένας κόμβος που λαμβάνει ένα «Route Request» για το οποίο δεν είναι ο προορισμός, ψάχνει στην «Route Cache» του για μια διαδρομή προς τον κόμβο προορισμού. Εάν μία κατάλληλη διαδρομή εντοπιστεί, ο κόμβος επιστρέφει στον κόμβο προέλευσης ένα μήνυμα «Route Reply» αντί να προωθήσει το αίτημα που έλαβε στους γειτονικούς του κόμβους. Στο «Route Reply», θέτει το πεδίο που περιγράφει το μονοπάτι δρομολόγησης το οποίο είχε ακολουθήσει το μήνυμα «Route Request» για να φτάσει σε αυτόν τον κόμβο μαζί με το υπόλοιπο μονοπάτι που γνωρίζει και έχει αποθηκευμένο στην «Route Cache».

Εντούτοις, πριν διαβιβάξει ένα πακέτο «Route Reply», που παρήχθη χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που περιέχονται στην «Route Cache», πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η προκύπτουσα διαδρομή που έχει επιλεγεί, δεν περιέχει κανέναν κόμβο παραπάνω από μία φορά, δηλαδή δεν περιέχονται κυκλικοί κλειστοί βρόγχοι στην διαδρομή. Παραδειγματος χάριν, στο παρακάτω σχήμα επεξηγείται μια περίπτωση στην οποία ένα «Route Request» για τον κόμβο E έχει παραληφθεί από τον κόμβο F, ο οποίος ήδη έχει αποθηκευμένη στην «Route Cache» του μια διαδρομή προς τον E. Εάν ο κόμβος F απαντήσει στο αίτημα, η προκύπτουσα διαδρομή σίγουρα θα περιέχει ένα βρόγχο αφού θα πρέπει τα πακέτα να περάσουν δύο φορές από τον ίδιο κόμβο.

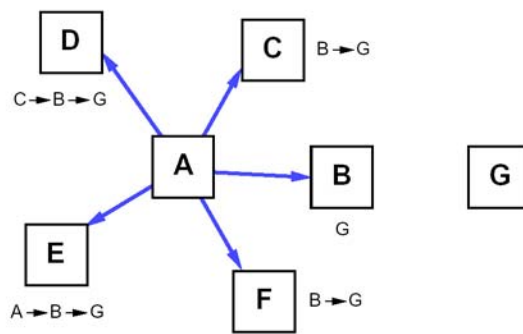


Εικόνα 4: Αποφυγή απάντησης σε αίτημα δρομολόγησης λόγω ύπαρξης διπλότυπων συνδέσεων στη διαδρομή

Ο κόμβος F θα μπορούσε, σε αυτήν την περίπτωση, να προσπαθήσει να επεξεργαστεί τη διαδρομή και να αποβάλει τυχών βρόγχους, με συνέπεια να προκύψει μια διαδρομή από τον A στον B στον C στο D και προς το E, αλλά σε αυτήν την περίπτωση ο κόμβος F δεν θα ήταν μέρος αυτής της διαδρομής. Ο μηχανισμός εύρεσης διαδρομών στο πρωτόκολλο DSR απαγορεύει στον κόμβο F την επιστροφή μιας τέτοιας διαδρομής από την «Route Cache» του για δύο λόγους. Κατ' αρχάς, ο περιορισμός αυτός αυξάνει την πιθανότητα η προκύπτουσα διαδρομή να ισχύει, αφού ο F σε αυτήν την περίπτωση θα είχε λάβει ένα «Route Error», εάν η διαδρομή είχε σταματήσει να ισχύει. Δεύτερον, αυτός ο περιορισμός σημαίνει ότι ένα «Route Error», που διατρέχει τη διαδρομή, είναι πολύ πιθανό να περάσει μέσω οποιουδήποτε κόμβου που έστειλε το «Route Reply» για τη διαδρομή (συμπεριλαμβανομένου και του F), κάτι το οποίο βοηθάει να εξασφαλιστεί ότι, όλα τα δεδομένα δρομολόγησης, τα οποία πλέον δεν ισχύουν στις «Route Caches» των κόμβων απ' όπου περνά το μήνυμα λάθους, αφαιρούνται από αυτές (όπως στον F) κατά τρόπο έγκυρο και σωστό. Σε διαφορετική περίπτωση, η επόμενη ανακάλυψη διαδρομών που θα αρχίσει από τον A μπορεί επίσης να μολυνθεί από ένα «Route Reply» από τον F που περιέχει μία διαδρομή που δεν ισχύει. Εάν το «Route Request» δεν ικανοποιεί αυτούς τους περιορισμούς ο κόμβος το απορρίπτει και δεν το εξυπηρετεί ούτε το προωθεί σε επόμενο κόμβο (ο κόμβος F σε αυτό το παράδειγμα πρέπει να απορρίψει το «Route Request»).

#### ***4.6.3. Παρεμπόδιση των πολλαπλών «Route Reply» (Route Reply Storms).***

Η δυνατότητα για τους κόμβους να απαντήσουν σε ένα «Route Request» βασιζόμενοι στις πληροφορίες που υπάρχουν στις «Route Caches» τους, θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολλές περιπτώσεις σε ένα πιθανό καταιγισμό από απαντήσεις σε αιτήματα εύρεσης μιας διαδρομής «Route Reply Storms». Ειδικότερα, εάν ένας κόμβος εκπέμψει προς όλους τους κόμβους του δικτύου ένα «Route Request», για έναν κόμβο προορισμού, για τον οποίο οι γείτονες του έχουν μια διαδρομή αποθηκευμένη στην «Route Cache» τους, κάθε ένας θα προσπαθήσει να στείλει ένα «Route Reply» και με αυτόν τον τρόπο να καταναλώσει μέρος του εύρους ζώνης του ασύρματου καναλιού και έτσι να αυξήσει τον αριθμό των πιθανών συγκρούσεων στο κανάλι.



Εικόνα 5: Πολλαπλά μηνύματα απάντησης διαδρομών (Route Reply Storm)

Παραδειγματος χάριν, στην κατάσταση που παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα, οι κόμβοι B, C, D, E, και F λαμβάνουν το «Route Request» από τον A, για την εύρεση μιας διαδρομής προς τον G, και κάθε ένας από αυτούς έχει μια τέτοια διαδρομή προς τον G για να επιστρέψει πίσω στον A. Κάτω από κανονικές συνθήκες όλοι θα προσπαθούσαν να απαντήσουν στον A με τις διαδρομές που έχουν στις «Route Caches» τους και θα έστελναν τα «Route Reply» την ίδια περίπου χρονική στιγμή, αφού όλοι έλαβαν τα «Route Request» περίπου την ίδια στιγμή. Οι ταυτόχρονες αυτές απαντήσεις από διαφορετικούς κόμβους μπορούν να δημιουργήσουν συγκρούσεις μεταξύ μερικών ή όλων των πακέτων με τις απαντήσεις και επίσης μπορούν να προκαλέσουν συμφόρηση στο ασύρματο κανάλι. Επιπλέον, είναι πολύ πιθανό οι διαφορετικές απαντήσεις να περιγράφουν διαδρομές με διαφορετικά μήκη, όπως φαίνεται και σε αυτό το παράδειγμα.

Εάν ένας κόμβος μπορεί να ενεργοποιηθεί, στο υλικό της διεπαφής του δικτύου του, το promiscuous mode, λαμβάνοντας όλα τα πακέτα που μπορεί να φτάσουν σε αυτόν είτε προορίζονται για αυτόν είτε όχι, πρέπει να καθυστερήσει την μετάδοση του δικού του μηνύματος «Route Reply» για μια μικρή χρονική περίοδο, προσπαθώντας να εντοπίσει εάν ο κόμβος προέλευσης του αιτήματος έχει αρχίζει να στέλνει ήδη δεδομένα στον προορισμό χρησιμοποιώντας μια συντομότερη διαδρομή από αυτήν που έχει αυτός.

Η αποστολή του «Route Reply» πρέπει να καθυστερήσει για μια τυχαία περίοδο  $d = H \times (h - 1 + r)$ , όπου  $h$  είναι το μήκος σε αριθμό των συνδέσεων του δικτύων που αποτελούν αυτή τη διαδρομή που υπάρχει στο «Route Reply», το  $r$  είναι ένας τυχαίος

αριθμός μεταξύ 0 και 1, και το  $H$  είναι μια σταθερή καθυστέρηση, τουλάχιστον δύο φορές το μέγιστο χρόνο καθυστέρησης διάδοσης ανά hop. Με αυτό τον τρόπο η καθυστέρηση μετάδοσης της απάντησης κάθε κόμβου είναι τυχαία και όλοι οι κόμβοι των οποίων οι απαντήσεις περιέχουν διαδρομές μικρότερες από  $h$  θα στείλουν γρηγορότερα από τον κόμβο αυτό τις απαντήσεις τους, ενώ αυτοί που έχουν διαδρομές με μεγαλύτερο  $h$  θα τις στείλουν αργότερα από αυτό τον κόμβο.

Κατά την διάρκεια της καθυστέρησης ο κόμβος λαμβάνει όλα τα πακέτα τα οποία είναι στην εμβέλεια του, προσπαθώντας να εντοπίσει αυτά που έχουν κόμβους προέλευσης και προορισμού αυτού που έχει και η διαδρομή για την οποία πρέπει να σταλεί η σχετική απάντηση. Εάν ένα τέτοιο πακέτο δεδομένων εμφανιστεί και χρησιμοποιεί διαδρομή συντομότερη από αυτή που έχει διαθέσιμη, ο κόμβος υποθέτει ότι έχει ήδη βρεθεί μια διαδρομή καλύτερη ή εξίσου καλή με αυτή που έχει επιλέξει. Σε αυτήν την περίπτωση ακυρώνεται η συγκεκριμένη διαδικασία.

#### **4.6.4. Όριο προώθησης ενός «Route Request»**

Κάθε μήνυμα «Route Request» περιέχει ένα αριθμό, ο οποίος αυξάνεται κάθε φορά που προωθείται αυτό από ένα κόμβο σε ένα άλλο. Ο αριθμός αυτός αυξάνεται και στην περίπτωση που ξεπεράσει ή εξισωθεί με ένα πάνω όριο οι κόμβοι σταματούν να το προωθούν και το καταστρέφουν πριν φτάσει το αίτημα στον προορισμό του. Εκμεταλλευόμενοι αυτή την ιδιότητα του πρωτοκόλλου μπορούμε να στείλουμε «Route Request» με όριο ίσο με το μηδέν. Τα αιτήματα αυτά έχουν σαν σκοπό να ανακαλύψουν εάν ο κόμβος προορισμού είναι γειτονικός με τον κόμβο προέλευσης ή αν υπάρχει στις «Route Cache» των γειτονικών κόμβων μια διαθέσιμη διαδρομή. Εάν ο κόμβος που δημιούργησε αυτή την ειδική αίτηση δεν πάρει απάντηση μέσα σε κάποιο χρονικό διάστημα ένα κανονικό μήνυμα «Route Request» στέλνεται.

### **4.7. Πρόσθετα χαρακτηριστικά γνωρίσματα συντήρησης διαδρομών**

#### **4.7.1. Διάσωση πακέτων**

Μετά από την αποστολή ενός μηνύματος «Route Error» του μηχανισμού συντήρησης διαδρομών του πρωτοκόλλου DSR, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.3, ένας κόμβος έχει την δυνατότητα να προσπαθήσει να διασώσει το πακέτο δεδομένων, που προκάλεσε το «Route Error», αντί να το απορρίψει. Για να το κάνει αυτό, ο κόμβος που στέλνει ένα «Route Error» ψάχνει στην «Route Cache» του για μια διαδρομή προς τον



προορισμό του πακέτου, που προκάλεσε το λάθος. Εάν μια τέτοια διαδρομή υπάρχει διαθέσιμη, ο κόμβος μπορεί να διασώσει το πακέτο αφού μεταδώσει στον κόμβο προελεύσεως του πακέτου ένα «Route Error» με την αντικατάσταση της αρχικής διαδρομής πηγής που είχε το πακέτο με τη διαδρομή από την «Route Cache» του. Ο κόμβος στη συνέχεια διαβιβάζει το πακέτο στον επόμενο κόμβο σύμφωνα με την νέα διαδρομή.

Κατά την παραπάνω διαδικασία, όπου ένα πακέτο συνεχίζει να ταξιδεύει προς τον προορισμό του, αυτό μαρκάρεται κατάλληλα, για να αποτρέψει το ίδιο πακέτο να διασωθεί (salvaged) παραπάνω από μια φορά. Σε διαφορετική περίπτωση θα μπορούσε να υπάρχει ένα σενάριο όπου το πακέτο θα εκτελούσε μια κυκλική επαναλαμβανόμενη διαδρομή ανάμεσα σε δύο κόμβους, όπου ο κάθε ένας προσπαθώντας να το σώσει θα αντικαθιστούσε τη διαδρομή δρομολόγησης πάνω σε αυτό, από τον ένα στον άλλο.

Ένας εναλλακτικός μηχανισμός διάσωσης πακέτων είναι να αντικαθιστάται μόνο το αχρησιμοποίητο κομμάτι της διαδρομής του πακέτου πριν από τον κόμβο που έχει αντιληφθεί ότι έχει συμβεί ένα «Route Error» με τη νέα διαδρομή από την «Route Cache» αυτού, με τη νέα διαδρομή να αποτελείται από δυο μέρη. Σε αυτήν την περίπτωση οι ήδη υπάρχοντες κανόνες του πρωτοκόλλου για την αποφυγή βρόχων πρέπει να εφαρμοστούν, για να εξασφαλίσουν ότι αυτή η διαδρομή συμφωνεί με τους περιορισμούς, που είδαμε πιο πάνω.

#### ***4.7.2. Αυτόματος περιορισμός του μήκους των διαδρομών***

Οι διαδρομές που χρησιμοποιούνται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSR μπορούν να γίνονται συντομότερες αυτόματα, εάν μία ή περισσότερες ενδιάμεσες συνδέσεις πάνω στη διαδρομή κριθεί ότι δεν είναι απαραίτητες. Αυτός ο μηχανισμός αυτόματης μείωσης του μήκους των διαδρομών, με την αφαίρεση μη απαραίτητων συνδέσεων που είναι σε χρήση, είναι παρόμοιος με τη χρήση των παθητικών επιβεβαιώσεων. Συγκεκριμένα, εάν ένας κόμβος παραλάβει ένα πακέτο και επεξεργαστεί την διαδρομή που περιέχει, ανακαλύπτοντας ότι ο κόμβος αυτός, στο τμήμα της διαδρομής που ακόμα δεν έχει χρησιμοποιηθεί, είναι ένας από τους προορισμούς του πακέτου, μπορεί να διαγράψει όλους τους ενδιάμεσους κόμβους και συνδέσεις, θεωρώντας ότι αυτές δεν χρειάζονται, αφού αυτός έχει ήδη λάβει το πακέτο και μπορεί

να το προωθήσει στον επόμενο προορισμό του, βάση της διαδρομής πηγής που περιέχει.

#### **4.7.3. Αυξανόμενη διάδοση των μηνυμάτων «Route Error» (Increased Spreading of Route Error Messages)**

Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα «Route Error» για ένα πακέτο στοιχείων που αυτός δημιουργήθηκε, ο κόμβος αυτός διαδίδει αυτό το μήνυμα λάθους στους γείτονές του μεταφέροντας το στο επόμενο μήνυμα «Route Request». Κατ' αυτό τον τρόπο, οι πληροφορίες δρομολόγησης που είναι αποθηκευμένες στις «Route Caches» των γύρω κόμβων, θα ανανεωθούν και δεν θα παραγάγουν ένα «Route Reply» που θα περιέχουν μία άκυρη διαδρομή, για την οποία ο κόμβος προέλευσης της έχει λάβει ήδη μήνυμα λάθους.

#### **4.7.4. Αποθηκεύοντας αρνητικές πληροφορίες**

Σε μερικές περιπτώσεις, ο DSR θα μπορούσε ενδεχομένως να επωφεληθεί από τους κόμβους που αποθηκεύουν αρνητικές πληροφορίες στις «Route Caches». Παραδείγματος χάριν, εάν ένας κόμβος αποθηκεύει το γεγονός ότι μια σύνδεση είναι διακομμένη (παρά απλά να αφαιρέσει αυτή τη σύνδεση από την «Route Cache» του), μπορεί να εγγυηθεί ότι κανένα «Route Reply», που λαμβάνεται σε απάντηση για ένα αίτημα μιας διαδρομής, δεν θα γίνει αποδεκτό εάν περιέχει αυτήν την διακομμένη σύνδεση. Μια μικρή περίοδος λήξης πρέπει να εισαχθεί στις πληροφορίες αυτές, για να δώσουμε την ευκαιρία στον κόμβο Α να εισάγει στην «Route Cache» του ξανά μια διαδρομή που περιέχει τον εν λόγω σύνδεσμο όταν αυτός ξαναγίνει ενεργός. Επίσης είναι χρήσιμο να αποθηκεύονται αρνητικές πληροφορίες δρομολόγησης όταν μια σύνδεση, λόγω ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, κάποιες φορές λειτουργεί σωστά και κάποιες όχι. Σε μια τέτοια περίπτωση οι κόμβοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη σύνδεση όταν περιέχεται σε μία διαδρομή, μόνο στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αρνητικές πληροφορίες.

### **4.8. Υποστήριξη για ετερογενή δίκτυα και το mobile IP**

Στο σχηματισμό και την ανάπτυξη ενός ad-hoc δικτύου, σε πολλές περιπτώσεις, οι κόμβοι έχουν τον ίδιο τύπο ασύρματων διεπαφών δικτύου, που επιτρέπει την απλή δρομολόγηση μεταξύ των κόμβων του δικτύου, μέσω οποιοδήποτε ακολουθιών συνδέσεων μεταξύ των κόμβων.

Εντούτοις, υπάρχει και η περίπτωση το δίκτυο να αποτελείται από κόμβους που έχουν διαφορετικού τύπου διεπαφών δικτύου, με διαφορετικά χαρακτηριστικά για την κάθε μία, όπως παραδείγματος χάριν την εμβέλεια του ασύρματου πομπού, (η μια μπορεί να έχει μεγαλύτερη εμβέλεια από την άλλη). Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα έχουμε στην περίπτωση ενός ad-hoc στρατιωτικού δικτύου στο οποίο οι στρατιώτες χρησιμοποιούν περιορισμένης εμβέλειας πομπούς για να επικοινωνούν μεταξύ τους, ενώ χρησιμοποιούν πομπούς μεγαλύτερης εμβέλειας για την επικοινωνία με άλλες ομάδες.

Αυτός ο γενικός τύπος δικτύων είναι αντίστοιχος με τα δίκτυα ασύρματης επικάλυψης (wireless overlay networks) [ Katz 1996 ]. Λόγω του υψηλού βαθμού τοπικότητας που παρατηρείται μεταξύ των κόμβων που επικοινωνούν άμεσα ο ένας με τον άλλον, μια τέτοια δικτυακή σύνθεση επιτρέπει την γρήγορη επικοινωνία μεταξύ τέτοιων κόμβων, επιτρέποντας συγχρόνως την επικοινωνία και με άλλους μακρινούς κόμβους του δικτύου, χωρίς την απαίτηση για εύρεση πολύ μεγάλων διαδρομών από τον ένα κόμβο στον άλλο. Οι κόμβοι που διαθέτουν ραδιοπομπούς μεγαλύτερης εμβέλειας, επιτρέπουν την διασπορά των διαφόρων διάκενων μεταξύ των κόμβων του δικτύου μειώνοντας την πιθανότητα κατάτμηση του δικτύου εξαιτίας τους.

#### **4.8.1. Χρήση δεικτών διεπαφών στον DSR**

Ο DSR υποστηρίζει την αυτόματη δρομολόγηση σε ετερογενείς συνθέσεις δικτύων, μέσω του λογικού πρότυπου μοντέλου ανάθεσης διευθύνσεων του [ Broch 1999b ]. Χρησιμοποιώντας συμβατική ανάθεση IP διευθύνσεων, κάθε κόμβος επιλέγει μια διαφορετική διεύθυνση IP για κάθε μια από τις ενδεχομένως πολλές διεπαφές δικτύων του, αλλά και κάθε κόμβος πρέπει να επιλέξει να χρησιμοποιεί σαν διεύθυνση του για την λειτουργία του πρωτοκόλλου μια από αυτές για όλη την επικοινωνία και την ανταλλαγή των μηνυμάτων του στο δίκτυο. Η χρήση μιας διεύθυνσης IP ανά κόμβο δίνει στον DSR τη δυνατότητα να μεταχειρίζεται το δίκτυο ως μια ενιαία περιοχή δρομολόγησης. Για να είναι δυνατή η διάκριση των διεπαφών δικτύων, ο κάθε κόμβος ορίζει ανεξάρτητα έναν μοναδικό δείκτη διεπαφών σε κάθε μια από αυτές. Ο δείκτης αυτός των διεπαφών είναι μια τιμή που καθορίζεται από τον ίδιο τον κόμβο και πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι μοναδική μόνο μεταξύ των διεπαφών του. Σε πολλά λειτουργικά συστήματα υποστηρίζεται ούτως η άλλως η λειτουργία αυτή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει, για να εξυπηρετήσουμε το σκοπό μας.

#### **4.8.2. Διασύνδεση με το Διαδίκτυο (Ιντερνετ) και mobile IP**

Ο DSR υποστηρίζει την δια-επικοινωνία μεταξύ ενός ad-hoc δικτύου και του διαδικτύου (Ιντερνετ), επιτρέποντας στα πακέτα να δρομολογούνται με διαφανή τρόπο από το ad-hoc δίκτυο σε κόμβους του διαδικτύου και το ανάποδο [ Broch 1999b ]. Για να είναι δυνατή αυτή η λειτουργικότητα, ένας ή περισσότεροι κόμβοι του ad-hoc δικτύου πρέπει να συνδέονται με το διαδίκτυο, έτσι ώστε να μπορούν να συμμετέχουν στο ad-hoc δίκτυο μέσω του DSR και επίσης να συμμετέχουν στο διαδίκτυο μέσω κλασικής δρομολόγησης IP. Έναν τέτοιο κόμβο τον ονομάζουμε «πύλη» μεταξύ του ad-hoc δικτύου και του διαδικτύου. Κατ' αυτό τον τρόπο ο DSR επιτρέπει, παραδείγματος χάριν, την εξάπλωση της κάλυψης γύρω από έναν ασύρματο σταθμό βάσεων, που παίζει το ρόλο της πύλης για το διαδίκτυο, μέσω πολλαπλών συνδέσεων μεταξύ των κόμβων ενός ad-hoc δικτύου. Είναι επίσης δυνατό ένας τέτοιος κόμβος να λειτουργήσει ως «Mobile IP home agent» [ Johnson 1995, Perkins 1996 ], επιτρέποντας στους κόμβους να επισκέπτονται το ad-hoc δίκτυο, που παίζει το ρόλο ενός «Mobile IP foreign network», καθώς και στους κόμβους που αποτελούν το ad-hoc δίκτυο να επισκέπτονται άλλα δίκτυα, επίσης χρησιμοποιώντας το «Mobile IP».

#### **4.8.3. Multicast Routing with DSR**

Ο DSR δεν υποστηρίζει την δυνατότητα πολλαπλής δρομολόγησης των δεδομένων προς τον ίδιον προορισμό, αλλά υλοποιεί μία προσέγγιση που είναι αρκετά κοντά στην δρομολόγηση μέσω πολλαπλών συνδέσεων και είναι αρκετά ικανοποιητική σε πολλά πλαίσια δικτύων. Μέσω της επέκτασης του μηχανισμού εύρεσης διαδρομών, ο DSR υποστηρίζει την ελεγχόμενη πλημμύρα των πακέτων δεδομένων προς όλους τους κόμβους του ad-hoc δικτύου που βρίσκονται σε κάποια απόσταση μακριά από το δημιουργό των δεδομένων. Οι κόμβοι αυτοί μπορούν έπειτα να εφαρμόσουν κάποιου είδους φιλτραρίσματος της διεύθυνσης προορισμού, για να περιορίσουν την αποστολή του πακέτου σε εκείνους τους κόμβους των οποίων οι διευθύνσεις περιέχονται στην λίστα με τις διευθύνσεις των κόμβων προορισμού του πακέτου. Αυτός ο μηχανισμός είναι χρήσιμος και για την αποστολή πακέτων σε επίπεδο εφαρμογής σε όλους τους κόμβους σε μια περιορισμένη απόσταση γύρω από τον αποστολέα.

## Κεφάλαιο 5

### ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ CACHING

#### 5. Δρομολόγηση και Caching

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ad-hoc ασύρματων δικτύων έχουν συζητηθεί σε προηγούμενες παραγράφους. Οι κόμβοι ενός τέτοιου δικτύου συνήθως κινούνται και έχουν το ρόλο τόσο του δρομολογητή όσο και του τερματικού κόμβου, έχουν ασύρματους πομποδέκτες περιορισμένης εμβέλειας, περιορισμένο εύρος καναλιού και παρόμοια χαρακτηριστικά όσο αφορά την επεξεργαστική ισχύ, την διαθέσιμη μνήμη και άλλα. Η άμεση επικοινωνία μεταξύ δυο οποιωνδήποτε κόμβων σε ένα ad-hoc δίκτυο επιτρέπονται μόνο όταν υπάρχει η δυνατότητα της απευθείας διασύνδεση τους. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις για να είναι δυνατή η επικοινωνία των κόμβων απαιτείται η προώθηση των πακέτων δεδομένων μέσω ενδιάμεσων κόμβων του δικτύου. Η έλλειψη σταθερής και προϋπάρχουσας υποδομής στα δίκτυα αυτά επιτάσσει την διατήρηση λειτουργιών, που σε άλλη περίπτωση, όπως στα κλασσικά δίκτυα, εκτελεί το backbone κομμάτι του δικτύου και συγκεκριμένα το κομμάτι αυτό που αποτελείται από συσκευές ειδικού τύπου, όπως δρομολογητές, hubs, switches, από τους ίδιους του κόμβους του δικτύου, για να είναι δυνατή η λειτουργία ενός τέτοιου δικτύου και η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των κόμβων αυτού.

Τα πρωτόκολλα τα οποία έχουν αναπτυχθεί για τα ενσύρματα δίκτυα, δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, όπως αναφέραμε και παραπάνω. Οι λόγοι είναι πολλοί και οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι, η περιορισμένη εμβέλεια των ασύρματων πομποδεκτών, η κινητικότητα των κόμβων, η περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ και ενέργεια των κόμβων του δικτύου και άλλοι.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ad-hoc δικτύων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: reactive, proactive, και υβριδικά. Ένα δυναμικό πρωτόκολλο δρομολόγησης proactive, που ονομάζεται επίσης table-driven πρωτόκολλο, απαιτεί από κάθε κόμβο να διατηρεί έναν ενημερωμένο πίνακα δρομολόγησης, έτσι ώστε μια διαδρομή είναι εύκολα διαθέσιμος όταν ζητηθεί για την αποστολή πακέτων δρομολόγησης.

Στα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης, που ονομάζονται επίσης on-demand πρωτόκολλα, οι κόμβοι δεν απαιτείται να διατηρούν πίνακες δρομολόγησης, αποθηκεύουν τις διαδρομές σε ειδικούς πίνακες που ονομάζονται Caches και αντί αυτού ενεργοποιούν μια διαδικασία εύρεσης διαδρομών, όποτε απαιτείται ένα συγκεκριμένο μονοπάτι ανάμεσα σε δύο κόμβους. Ένα reactive πρωτόκολλο προκαλεί μικρότερη συμφόρηση στο δίκτυο όσο αφορά τα μηνύματα ελέγχου που απαιτούνται για την δημιουργία των πινάκων δρομολόγησης, στους οποίους δεν είναι απαραίτητο να διατηρούνται πληροφορίες για όλους τους πιθανούς προορισμούς του δικτύου. Οι διαδρομές που βρίσκονται αποθηκευμένες στις Caches, μπορεί όταν ζητηθούν για να χρησιμοποιηθούν να είναι άκυρες, εξαιτίας της αλλαγής της τοπολογίας των κόμβων στο δίκτυο λόγω της κινητικότητας τους. Τα πρωτόκολλα αυτά εισάγουν μία σημαντική καθυστέρηση κατά την αναμονή εύρεσης μιας διαδρομής μετά την ενεργοποίηση του μηχανισμού αναζήτησης διαδρομών, όπου οι κόμβοι πρέπει να στείλουν σχετικά μηνύματα εύρεσης της διαδρομής σε ένα μεγάλο μέρος του δικτύου. Τόσο για τα reactive, όσο και για τα proactive πρωτόκολλα έχουμε αναφερθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Για την χρησιμοποίηση μόνο των θετικών στοιχείων και των δύο παραπάνω κατηγοριών πρωτοκόλλων δρομολόγησης έχουν προταθεί υβριδικά πρωτόκολλα, τα οποία συνδυάζουν στοιχεία και των δύο προσεγγίσεων. Στα πρωτόκολλα αυτά, ένας κόμβος διατηρεί μόνο πληροφορίες συνδέσεων για τους κόμβους, που βρίσκονται μέσα σε μια ζώνη, εντός της οποίας χρησιμοποιείται μια proactive προσέγγιση για την δρομολόγηση, ενώ εκτός αυτής χρησιμοποιεί ένα reactive πρωτόκολλο εύρεσης και διατήρησης διαδρομών προς τους μακρινούς προορισμούς.

### **5.1. Τρόποι βελτίωσης της απόδοσης των πρωτοκόλλων δρομολόγησης**

Υπάρχουν πάρα πολλοί και διαφορετικοί τρόποι βελτίωσης της απόδοσης συγκεκριμένων πρωτοκόλλων. Σε όλα τα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί, υπάρχουν στοιχεία στη διεθνή βιβλιογραφία που περιγράφουν τρόπους βελτίωσης της απόδοσης τους, διαφορετικοί για κάθε ένα πρωτόκολλο. Σε αυτή την εργασία, πέρα από την αναλυτική περιγραφή του μεγαλύτερου συνόλου, αλλά και των κατά την γνώμη μας σημαντικότερων πρωτοκόλλων, ασχοληθήκαμε ιδιαίτερα με την περιγραφή του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης πηγής (Dynamic Source Routing - DSR). Η

μελέτη του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου ανέγειρε πολλά ερωτήματα σχετικά με τους τρόπους βελτίωσης της απόδοσης του, τους οποίους αναφέραμε σε προηγούμενη παράγραφο. Το πρωτόκολλο αυτό είναι το χαρακτηριστικότερο πρωτόκολλο δρομολόγησης πηγής, το οποίο μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί και να λειτουργήσει κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες του δικτύου. Παρακάτω θα αναλύσουμε την έρευνα που έγινε στην βελτίωση της απόδοσης του πρωτοκόλλου DSR, με την χρησιμοποίηση τεχνικών αποθήκευσης διαδρομών, σε ειδικούς πίνακες δρομολόγησης στους κόμβους προέλευσης των διαδρομών.

## **5.2. Το πρόβλημα του Caching στους αλγόριθμους δρομολόγησης πηγής.**

Στα on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης μια διαδρομή που έχει πρόσφατα ανακαλυφθεί αποθηκεύεται σε ειδικούς πίνακες, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά την επόμενη φορά που θα ζητηθεί. Δύο περιπτώσεις μπορούμε να ξεχωρίσουμε στην διαδικασία αποθήκευσης διαδρομών (route caching). Στη πρώτη περίπτωση, ένας κόμβος αποθηκεύει διαδρομές πηγής σε ειδικούς πίνακες, ώστε να είναι διαθέσιμες στο μέλλον όταν αυτό ζητηθεί και ονομάζεται αποθήκευση διαδρομών πηγής (source route caching). Οι αποθηκευμένες διαδρομές μπορούν να ζητηθούν από τον ίδιο τον κόμβο που τις έχει αποθηκεύσει ή από κάποιον άλλο με ένα μήνυμα αναζήτησης διαδρομών το οποίο έστειλε στο κόμβο που έχει αποθηκευμένη την διαδρομή και μπορεί να εξυπηρετήσει το αίτημα αυτό. Σαν επέκταση των ανωτέρω, πολλά on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως ο AODV και ο DSR, επιτρέπουν και σε ενδιάμεσους κόμβους (κόμβους μη-προορισμού που έχουν λάβει αντίγραφο του μηνύματος αναζήτησης διαδρομών από τον κόμβο προέλευσης) που έχουν μια αποθηκευμένη διαδρομή, να απαντήσουν στο αίτημα του κόμβου προορισμού αποστέλλοντας την διαδρομή πηγής που έχουν διαθέσιμη σε αυτόν. Η δεύτερη αυτή περίπτωση ονομάζεται ενδιάμεση εναποθήκευση διαδρομών (intermediate route caching).

### **5.2.1. Λόγοι και οφέλη της αποθήκευσης διαδρομών σε ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης**

Δυο είναι οι βασικοί λόγοι και τα οφέλη αποθήκευσης των διαδρομών σε ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης ενός ad-hoc δικτύου.

Ο πρώτος και ποιο σημαντικός αναφέρεται στην μείωση της καθυστέρησης εύρεσης μιας νέας διαδρομής. Όπως έχουμε αναφέρει ήδη, κατά την διαδικασίας αναζήτησης διαδρομών, ένας κόμβος, όταν λάβει ένα μήνυμα αναζήτησης μιας διαδρομής, ελέγχει εάν μπορεί να εξυπηρετήσει το αίτημα αυτό με μία διαδρομή από αυτές που έχει αποθηκευμένες στους πίνακες δρομολόγηση. Στην περίπτωση αυτή επιστρέφει αμέσως μια απάντηση στον κόμβο προέλευσης του αιτήματος, με αποτέλεσμα να είναι σημαντικά μικρότερη η καθυστέρηση εύρεσης μιας διαδρομής. Ο λόγος είναι προφανής, αφού το μήνυμα αναζήτησης δεν είναι αναγκαίο να ταξιδέψει έως τον κόμβο προορισμού, αλλά πολύ γρηγορότερα μια έγκυρη αποθηκευμένη διαδρομή μεταδίδεται ως απάντηση στον κόμβο προέλευσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου, όπως ήχου και εικόνας, όπου η επιτυχής αναπαραγωγή των δεδομένων στον παραλήπτη είναι ευαίσθητη στην καθυστέρηση μετάδοσης των δεδομένων.

Ο δεύτερος λόγος αφορά την μείωση της κυκλοφορίας των μηνυμάτων ελέγχου που απαιτούνται στην αναζήτηση μίας νέας διαδρομής. Κάθε φορά που ενεργοποιείται ο μηχανισμός αναζήτησης διαδρομών, οι κόμβοι ελέγχουν εάν μια διαδρομή προς τον συγκεκριμένο προορισμό είναι διαθέσιμη και έγκυρη στην Cache και στην περίπτωση που δεν υπάρχει μεταδίδουν ένα μήνυμα αναζήτησης στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου.

### ***5.2.2. Μειονεκτήματα της αποθήκευσης διαδρομών σε ένα on-demand πρωτόκολλο δρομολόγησης***

Η αποθήκευση μιας διαδρομής σε μια Cache όμως μπορεί να έχει και αρνητικά αποτελέσματα. Η περίπτωση στην οποία αναφερόμαστε έχει να κάνει με την χρησιμοποίηση αποθηκευμένων διαδρομών οι οποίες δεν είναι έγκυρες. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε λόγω της κινητικότητας, είτε λόγω της απενεργοποίησης κάποιων κόμβων, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η μετάδοση των δεδομένων πάνω από το συγκεκριμένο μονοπάτι προς τον προορισμό. Όταν χρησιμοποιείται μια διαδρομή από την Cache ενός κόμβου η οποία δεν είναι έγκυρη, προσθέτει παραπάνω κυκλοφορία και καθυστέρηση στη δρομολόγηση των δεδομένων, αφού θα απαιτηθεί χρόνος για να ανακαλυφθούν οι σπασμένες συνδέσεις και να σταλεί μήνυμα λάθους στον κόμβο προορισμού των δεδομένων, ο οποίος στη συνέχεια θα ενεργοποιήσει την διαδικασία εύρεσης μιας νέας διαδρομής. Ανάλογα με την υλοποίηση του κάθε πρωτοκόλλου



δρομολόγησης, καθ' όλη αυτή την διαδικασία, δεδομένα αλλά και μηνύματα ελέγχου θα έχουν ήδη μεταδοθεί κατά μήκος της διαδρομής, που είναι έγκυρη, έως της σύνδεση που είναι σπασμένη, αναγκάζοντας τον κόμβο πηγής των δεδομένων να πρέπει να στείλει ξανά τα δεδομένα προς τον προορισμό μέσω της νέας διαδρομής.

### **5.3. Έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία για την αποθήκευση διαδρομών**

Στη σχετική βιβλιογραφία περιγράφονται διάφορες μέθοδοι αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος, με σκοπό την αποδοτική χρήση των τεχνικών αποθήκευσης διαδρομών στους κόμβους ενός ad-hoc ασύρματου τηλεπικοινωνιακού δικτύου, σε ένα reactive πρωτόκολλο δρομολόγησης. Οι μέθοδοι αυτοί, μερικές από τις οποίες θα αναφέρουμε παρακάτω, προσπαθούν να εντοπίσουν τρόπους ακύρωσης διαδρομών που δεν είναι έγκυρες και περιγράφουν μονοπάτια πάνω από τα οποία υπάρχουν διακομμένες συνδέσεις για να εμποδίσουν τους κόμβους από την χρήση αυτών των διαδρομών.

#### ***5.3.1. Βελτιστοποίηση της απόδοσης με τη χρήση της παραμέτρου Time-To-Live (TTL)***

Η on-demand δρομολόγηση μειώνει την συνολική κίνηση του δικτύου και την καθυστέρηση των δεδομένων που διακινούνται στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα των οποίων οι κόμβοι κινούνται αλλά έχει και το σημαντικό μειονέκτημα της αρχικής καθυστέρηση ανάμεσα σε ένα αίτημα μιας διαδρομής και την λήψης μιας απάντησης με μια έγκυρη διαδρομή. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται μία μέθοδος ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης, σε on-demand πρωτόκολλα δρομολόγησης πηγής, μέσω της βελτιστοποίησης της παραμέτρου Time-To-Live (TTL), στις διαδρομές των πινακίων αποθήκευσης διαδρομών (Route Cache Tables).

Στην εργασία [Liang 2003] παρουσιάζεται ένα αναλυτικό πλαίσιο για τον προσδιορισμό της αναμενόμενης καθυστέρησης δρομολόγησης, όταν ένας κόμβος πηγής ή ένας ενδιάμεσος κόμβος έχει μια αποθηκευμένη διαδρομή προς οποιοσδήποτε προορισμό, λαμβάνοντας υπόψη την μεταβλητή TTL. Επιπλέον, προτείνονται οι αριθμητικές μέθοδοι που καθορίζουν την βέλτιστη τιμή του TTL, για μία πρόσφατα αποθηκευμένη διαδρομή. Χρησιμοποιώντας ένα αναλυτικό πλαίσιο οι συγγραφείς μελετάνε τον τρόπο με τον οποίο η καθυστέρηση δρομολόγησης επηρεάζεται από το μήκος των διαδρομών, τη συχνότητα έκδοσης νέων αιτημάτων διαδρομών και τη συχνότητα

αλλαγής της τοπολογίας των κόμβων του δικτύου. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη τεχνική μπορεί να μειώσει σημαντικά την καθυστέρηση δρομολόγησης σε συστήματα, που είτε δεν χρησιμοποιούν Route Cache, είτε χρησιμοποιούν υποθέτοντας ότι ο χρόνος ζωής των διαδρομών είναι άπειρος. Τέλος παρουσιάζουν αποτελέσματα προσομοίωσης για να υποστηρίξουν τα θεωρητικά συμπεράσματα τους.

Η προσέγγιση αυτή περιγράφει ότι για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου ύπαρξης άκυρων διαδρομών σε μια Cache, ορίζουμε μια παράμετρο που αντιστοιχεί σε κάθε ξεχωριστή διαδρομή και συνεπώς καταχώρηση στον πίνακα δρομολόγησης προς ένα προορισμό, που περιγράφει το χρόνο ζωής μιας διαδρομής. Μετά την πάροδο της χρονικής αυτής διάρκειας η εν λόγω διαδρομή θεωρούμε ότι θεωρείται άκυρη και επιτρέπεται η διαγραφή της από τους πίνακες δρομολόγησης, αφού έχει «λήξει» ο χρόνος ζωής της και δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί πλέον από τους κόμβους του δικτύου.

Ως χρόνο ζωής μιας διαδρομής ορίζουμε τον χρόνο στον οποίο η διαδρομή είναι έγκυρη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία από έναν κόμβο για την αποστολή δεδομένων. Τον ορίζουμε χρησιμοποιώντας μια μεταβλητή που ονομάζουμε «Time-To-Live (TTL)» και εννοούμε τον χρόνο ζωής και παραμονής μιας διαδρομής στην Route Cache ενός κόμβου. Από εδώ και πέρα θα χρησιμοποιούμε το ακρωνύμιο TTL και θα αναφερόμαστε στον χρόνο αυτό. Όταν ο χρόνος αυτός παρέλθει μια διαδρομή πρέπει να μην χρησιμοποιείται, να ακυρώνεται και να διαγράφεται από την Cache των κόμβων. Η μεταβλητή αυτή είναι δύσκολο να οριστεί στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα, λόγω των δυναμικών χαρακτηριστικών του δικτύου, που αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Η συγκεκριμένη εργασία προσπαθεί να δώσει ένα γενικό αναλυτικό πλαίσιο για τον προσδιορισμό της με όσο το δυνατό μικρότερο σφάλμα.

Μια παρόμοια προσέγγιση, έξω από του σκοπούς αυτής της εργασίας, είναι να χρησιμοποιηθεί μια διαδικασία ακύρωσης διαδρομών. Ο μηχανισμός αυτός στηρίζεται στην μετάδοση μηνυμάτων που περιγράφουν μια σπασμένη σύνδεση και αναγκάζουν τους κόμβους που έχουν διαδρομές με την συγκεκριμένη σύνδεση να ακυρώσουν τις συγκεκριμένες εγγραφές στους πίνακες αποθήκευσης τους. Αυτή είναι μια proactive διαδικασία, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία μεγάλου όγκου μηνυμάτων ελέγχου, που ταξιδεύουν στο ad-hoc δίκτυο. Τα μηνύματα αυτά, τα οποία πρέπει να

μεταδοθούν στους κόμβους του δικτύου, χρησιμοποιούν τεχνικές πλημμύρας για την μετάδοση τους και υπάρχει περίπτωση να μην καταφέρουν να προσεγγίσουν όλους του κόμβους του δικτύου, λόγω της κινητικότητας των κόμβων και της συνεχής αλλαγής των γεωγραφικών θέσεων τους.

#### *5.3.1.1. Χαρακτηριστικά της παραμέτρου TTL*

Η μεταβλητή TTL περιγράφει τον χρόνο στον οποίο μια αποθηκευμένη διαδρομή θεωρούμε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί έχοντας μεγάλη πιθανότητα να είναι έγκυρη διαδρομή. Στην πραγματικότητα είναι πολύ δύσκολο να περιγράψουμε, με μαθηματικές εκφράσεις, την τιμή της TTL με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό που μπορούμε να κάνουμε είναι να προσπαθήσουμε να προβλέψουμε μια τιμή, για το TTL κάθε διαδρομής, με όσο το δυνατό μικρότερο σφάλμα. Εάν στο TTL τεθεί μία πάρα πολύ μικρή τιμή, είναι πολύ πιθανό να απορρίπτονται έγκυρες διαδρομές από τους πίνακες δρομολόγησης και να παρατηρείται μεγάλη καθυστέρηση λόγω της ενεργοποίησης της διαδικασίας εύρεσης διαδρομών. Από την άλλη, εάν στο TTL τίθενται μεγάλες τιμές, είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιούνται άκυρες διαδρομές, με αποτέλεσμα και πάλι να έχουμε επιπλέον καθυστέρηση στη δρομολόγηση των δεδομένων πριν ανακαλυφθεί ο σπασμένος σύνδεσμος για να ενεργοποιηθεί η διαδικασία εύρεσης μιας νέας διαδρομής.

Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητος ένας αλγόριθμος που να μπορεί να προβλέπει με ακρίβεια τις βέλτιστες τιμές που πρέπει να έχει η μεταβλητή αυτή για τη βέλτιστη απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο ανάλυσης, που μπορεί με μερικές υποθέσεις να μας βοηθήσει, με μικρό σφάλμα, να κάνουμε σωστές υποθέσεις για την τιμή της παραμέτρου αυτής.

#### *5.3.1.2. Μέθοδος υπολογισμού της βέλτιστης τιμής TTL*

Προφανώς, η βέλτιστη TTL μιας διαδρομή-κρύπτης εξαρτάται από το πόσο σταθερή είναι η τοπολογία διαδρομών στο ασύρματο ad-hoc δίκτυο. Υποθετικά, εάν η κατάσταση όλων των συνδέσεων για το μέλλον ήταν γνωστή, η TTL θα έπρεπε να πάρει τιμή ίση με την χρονική περίοδο όπου για πρώτη φορά οποιαδήποτε σύνδεση, μέρος μίας διαδρομής, θα αποτύγχανε και θα διακοπτόταν. Στην πραγματικότητα όμως μπορούμε μόνο να υπολογίσουμε τη διάρκεια ζωής των διαδρομών από στατιστικά δεδομένα και να βελτιστοποιήσουμε τη TTL με σκοπό να ελαχιστοποιήσουμε την αναμενόμενη καθυστέρηση δρομολόγησης. Στις επόμενες παραγράφους παραθέτουμε

τον τρόπο, για τον υπολογισμό της αναμενόμενης καθυστέρησης δρομολόγησης, και της TTL για την εναποθήκευση διαδρομών πηγής, υποθέτοντας ότι η ενδιάμεση εναποθήκευση διαδρομών δεν εκτελείται.

#### 5.3.1.2.1. Αναμενόμενη καθυστέρηση δρομολόγησης

Υποθέστε ότι ένα κόμβος  $n_s$  έχει αποθηκευμένη μια διαδρομή προς ένα άλλο κόμβο προορισμού  $n_d$ , που είναι έγκυρη, και έχει μια τιμή στην παράμετρο TTL ίση με  $T$  δευτερόλεπτα. Έστω  $D$  είναι ο αριθμός των συνδέσεων (hops) σε αυτή την διαδρομή και  $t_a$  είναι ο χρόνος που απαιτείται από τον κόμβο προορισμού για να παραλάβει το επόμενο αίτημα διαδρομών, μετά από την αποθήκευση της διαδρομής  $n_s-n_d$ . Η μεταβλητή  $t_a$  θα έχει κατανομή  $F_a(t)$ ,  $f_a(t)$  είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density distribution) και  $f_a^*(s)$  είναι ο μετασχηματισμός Laplace του  $f_a(t)$ .

Η καθυστέρηση δρομολόγησης τότε, σύμφωνα με το [Liang 2003] θα δίνεται από τους τύπους:

- Για  $t_a > T$ ,  $C_{t_a > T}(T) = 2LD$
- Για  $t_a < T$ ,  $C_{t_a < T}(T) = 2L \sum_{i=1}^D ip_i(T) + 2L[1 - Q_D(T)]D$

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω τύπων μας δίνει την αναμενόμενη καθυστέρηση δρομολόγησης του επόμενου αιτήματος εύρεσης μιας διαδρομής δεδομένου ότι η προς αναζήτηση διαδρομή θα αποτελείται από  $D$  hops και θα έχει χρόνο ζωής TTL ίσο με  $T$ .

$$C(T) = 2L[D + F_a(T) \sum_{i=1}^D ip_i(T) - F_a(T)Q_D(T)D]$$

Το παραπάνω αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο παρέχει ένα μέσο για τον υπολογισμό της αναμενόμενης καθυστέρησης μιας διαδρομής δεδομένου ότι η παράμετρος TTL έχει μια τιμή. Παρ' όλα αυτά είναι πολύ πιθανόν η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου TTL να είναι πολύ σημαντικότερη σε έναν σχεδιαστή δικτυακών συστημάτων από την συνολική καθυστέρηση. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό του βέλτιστου TTL.

### 5.3.1.2.2. Υπολογισμός βέλτιστου TTL για αποθηκευμένες διαδρομές στους κόμβους πηγής

Θεωρήστε ότι  $q(\tau)$  είναι η πιθανότητα για μια συγκεκριμένη σύνδεση, μέρος μιας αποθηκευμένης διαδρομής στην Cache ενός κόμβου, που είναι έγκυρη μετά από χρόνο  $\tau$ , μετά από την τελευταία αναζήτηση διαδρομής. Υποθέστε ότι ένα μήνυμα εύρεσης μιας διαδρομής, παραλαμβάνεται μετά από χρόνο  $\tau$ , από την τελευταία αναζήτηση, και  $T$  να είναι ο χρόνος ζωής (TTL) για την συγκεκριμένη διαδρομή. Στην περίπτωση αυτή η καθυστέρηση δρομολόγηση δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

- Για  $\tau > T$ ,  $C_{\tau > T}(\tau, T) = 2LD$

- Για  $\tau < T$ ,  $C_{\tau < T}(\tau, T) = 2L \left[ D + \frac{q^D(\tau) - 1}{q(\tau) - 1} - 2Dq^D(\tau) \right]$

Ο παραπάνω τύπος, της καθυστέρησης δρομολόγησης, από την προηγούμενη παράγραφο, παίρνει την παρακάτω μορφή,

$$C(T) = 2LD - 2L \int_0^T \left[ 2Dq^D(\tau) - \frac{q^D(\tau) - 1}{q(\tau) - 1} \right] f_\alpha(\tau) d\tau$$

Εφόσον το  $q(\tau)$  είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του  $\tau$ , στο διάστημα  $0 \leq q(\tau) < 1$ , μπορούμε εύκολα να δούμε ότι το  $C(T)$  είναι μια κυρτή συνάρτηση του  $T$ . Αυτό έχει

σαν αποτέλεσμα να συμπεράνουμε δεδομένου του,  $g[q(T)] = 2Dq^D(T) - \frac{q^D(T) - 1}{q(T) - 1}$

ότι το ελάχιστο  $C(T)$  θα το έχουμε όταν  $g[q(T)] = 0$ . Συνεπώς η βέλτιστη τιμή του  $q(T)$  είναι η ρίζα της παραπάνω συνάρτησης. Δεδομένης μιας τιμής  $D$ , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία μέθοδο εύρεσης ριζών, όπως η μέθοδος του Newton για την εύρεση της συγκεκριμένης ρίζας. Εφόσον ισχύει η σχέση  $q(T) = 1 - Fr(T)$ , και μπορούμε να υπολογίσουμε την βέλτιστη αριθμητική τιμή του  $q(T)$ , η βέλτιστη τιμή του TTL μπορεί να βρεθεί αντιστρέφοντας την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ζωής μιας διαδρομής. density function of the residual lifetime of a link.

### 5.3.1.2.3. Βελτιστοποίηση του TTL για αποθηκευμένες διαδρομές στους ενδιάμεσους κόμβους

Σε αυτή την παράγραφο επεκτείνουμε την ανάλυση, που ήδη έχουμε περιγράψει, για να παρέχουμε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης του χρόνου ζωής των διαδρομών που

αποθηκεύονται από τους ενδιάμεσους κόμβους. Ως ενδιάμεσους κόμβους ονομάζουμε τους κόμβους εκείνους από τους οποίους πρέπει να περάσουν τα δεδομένα, κατά μήκος μιας διαδρομής, για να φτάσουν στον προορισμό τους και οι οποίοι αποθηκεύουν το κομμάτι εκείνο της διαδρομής από αυτούς έως τον κόμβο προορισμού.

Υποθέτουμε το  $S$  να είναι ο αριθμός των συνδέσεων από τον κόμβο προέλευσης  $n_s$  στον ενδιάμεσο κόμβο  $n_i$  και  $D$  ο αριθμός των συνδέσεων από τον  $n_i$  στον  $n_d$ . Η βέλτιστη τιμή του TTL εξαρτάται τόσο από το  $S$  όσο και από το  $D$ , και είναι πάντα μικρότερο ή ίσος από το TTL που υπολογίσαμε παραπάνω για διαδρομές πηγής σε ένα κόμβο προορισμού και συνεπώς η βελτιστοποίηση της μίας παραμέτρου δεν επηρεάζει την βελτιστοποίηση της άλλης.

Υποθέστε ότι  $t_a$  είναι ο χρόνος άφιξης του επόμενου αιτήματος αναζήτησης μιας διαδρομής, ανάμεσα στους  $n_s$  και  $n_d$ , στον κόμβο  $n_i$ , μετά από την αποθήκευση της διαδρομής  $n_i$ - $n_d$ , λόγω προηγούμενης αναζήτησης για τον ίδιο κόμβο προορισμού η οποία χρησιμοποίησε τον κόμβο  $n_i$ . Σε αυτή την περίπτωση, για λεπτομέρειες παραπέμπουμε στο [Liang 2003], η συνολική καθυστέρηση,  $C'_{\min}(S, D)$ , θα δίνεται από τον τύπο,

$$C'_{\min}(S, D) = [1 - F_a(T_{opt}) Q_D(T_{opt})] C'_{\min}(S+1, D-1) + 2L F_a(T_{opt}) \left[ 2S - Q_D(T_{opt}) S + \sum_{i=1}^D i p_i(T_{opt}) \right]$$

Για να προσδιορίσουμε την βέλτιστη τιμή για την αποθήκευση διαδρομών από ενδιάμεσους κόμβους του TTL, μετατρέπουμε το αναλυτικό μαθηματικό πλαίσιο που προτείνεται από τους συγγραφείς στο [Liang 2003] και προκύπτει ο τύπος,

$$C'_T(S, D) = \int_T^{\infty} C'_{\tau > T}(S, D) f_a d\tau + \int_0^T C'_{\tau < T}(S, D) f_a d\tau$$

Δεδομένης της σχέσης:  $g'[q(T)] = -\frac{1}{2L f_a(T)} \frac{dC'_T(S, D)}{dT}$ , η ελάχιστη τιμή του  $C'(T)$

δίδεται όταν  $g'[q(T)] = 0$ . Δηλαδή η βέλτιστη τιμή του  $q(T)$  δίδεται όταν έχει ρίζα η συνάρτηση  $g'[x]$  στο  $[0, 1)$ .

Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή του TTL, στον κόμβο  $n$ , μπορεί να βρεθεί αναδρομικά συναρτήσει των  $S, D$  και  $C'_{\min}(S+1, D-1)$ , χρησιμοποιώντας ως αρχική συνθήκη την  $C'_{\min}(S+D, 0) = 2I(S+D)$ .

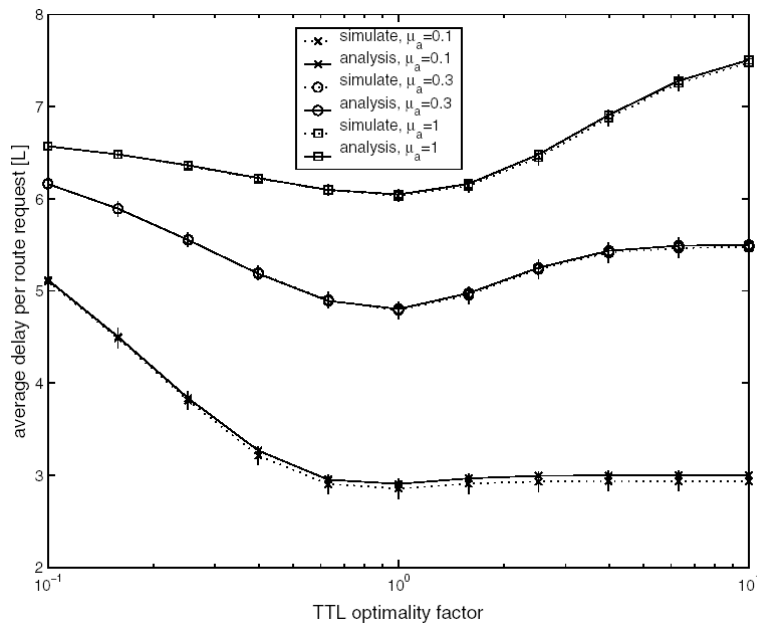
#### 5.3.1.2.4. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης για την αξιολόγηση των θεωρητικών σχέσεων και του αναλυτικού μαθηματικού μοντέλου που παρουσιάστηκε. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε επιλεκτικά μερικά από τα αποτελέσματα για το πώς επηρεάζει η χρήση του χρόνου ζωής μιας αποθηκευμένης διαδρομής την απόδοση ενός ασύρματου ad-hoc δικτύου, που αποτελείται από κινητούς κόμβους.

Το μοντέλο δικτύου που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τριακόσιους κόμβους, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης πηγής, και κάθε κόμβος είχε έξι γείτονες κάθε χρονική στιγμή.

#### 5.3.1.2.5. Αναμενόμενη καθυστέρηση δρομολόγησης

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζουμε την καθυστέρηση δρομολόγησης κανονικοποιημένη, στο  $L$  (το μέσο χρόνο καθυστέρησης για την παράδοση ενός πακέτου πάνω από μια σύνδεση ανάμεσα σε δύο κόμβους).



Εικόνα 6: Αναμενόμενη καθυστέρηση δρομολόγησης

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή διαφορά, περίπου 2%, από τα αποτελέσματα της μαθηματικής ανάλυσης και αυτά της προσομοίωσης, που οφείλεται στην αρχική υπόθεση, στο μαθηματικό μοντέλο, ότι όταν ένας σύνδεσμος αποτύχει και διακοπεί, ενώ περιέχεται σε μία αποθηκευμένη διαδρομή, δεν επανέρχεται ξανά έως την επόμενη αναζήτηση της διαδρομής, κάτι που υπάρχει πιθανότητα στην πραγματικότητα να συμβεί, και όντως συμβαίνει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα μαθηματικά μοντέλα να δίνουν λίγο καλύτερα αποτελέσματα για την αναμενόμενη καθυστέρηση.

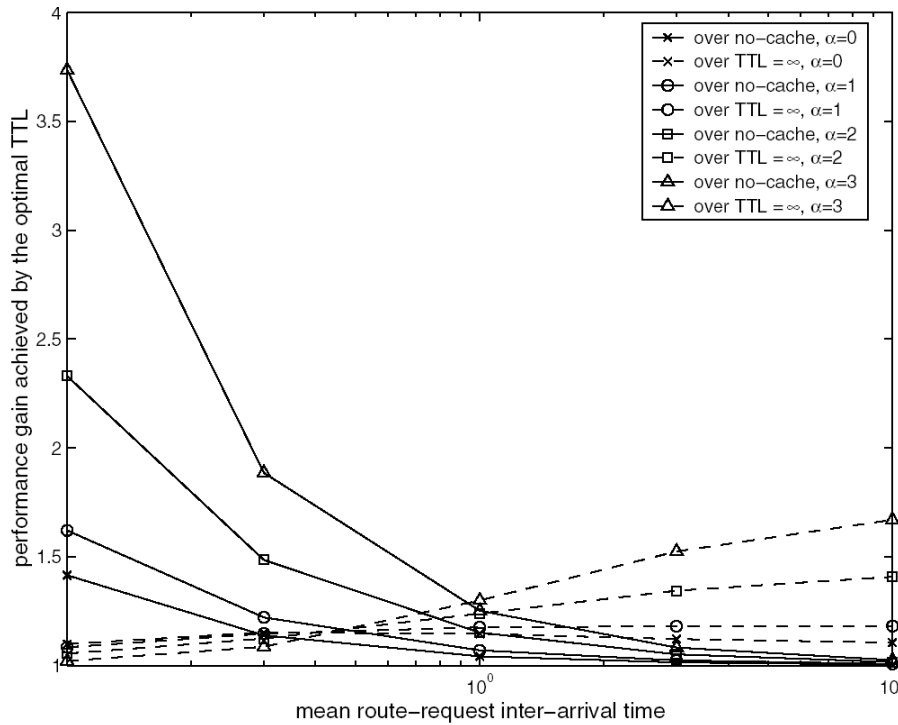
Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζει πώς επηρεάζεται η καθυστέρηση δρομολόγησης από την επιλογή του TTL, για διαφορετικές συχνότητες έκδοσης αιτημάτων αναζήτησης διαδρομών. Εάν η επιλεγμένη τιμή του TTL είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την μέση τιμή του χρόνου άφιξης του μηνύματος εύρεσης διαδρομών, ο χρόνος ζωής της συγκεκριμένης διαδρομής δεν λήγει ποτέ, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει την καθυστέρηση δρομολόγησης. Από την άλλη όταν το TTL έχει τιμή μικρότερη από αυτόν τον χρόνο άφιξης, η αποθηκευμένη διαδρομή δεν χρησιμοποιείται ποτέ, με αποτέλεσμα και πάλι δεν επηρεάζεται η καθυστέρηση δρομολόγησης των δεδομένων.

Από τα παραπάνω μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι, όταν ο χρόνος άφιξης των μηνυμάτων αναζήτησης διαδρομών είναι συγκρίσιμος με τον μέσο χρόνο αποτυχίας των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων, είναι πολύ σημαντικό να μπορούμε να θέσουμε στο TTL την βέλτιστη δυνατή τιμή.

#### *5.3.1.2.6. Βελτίωση της απόδοσης με την βελτιστοποίηση του χρόνου ζωής των διαδρομών.*

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζουμε την βελτίωση της απόδοσης, με την χρήση του βέλτιστου TTL, πάνω από συστήματα δικτύων, που χρησιμοποιούν σχήματα με πίνακες αποθήκευσης διαδρομών, των οποίων οι καταχωρήσεις είτε δεν χρησιμοποιούν την παράμετρο του χρόνου ζωής, είτε την χρησιμοποιούν αλλά υποθέτουν ότι οι αποθηκευμένες διαδρομές έχουν άπειρο χρόνο ζωής.





Εικόνα 7: Απόδοση με χρήση βέλτιστου TTL

Από το διάγραμμα αυτό το συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε είναι ότι η χρήση της τεχνικής αυτής μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου κατά 25%, και γι' αυτό το λόγο η αποθήκευση των διαδρομών σε ένα ασύρματο ad-hoc τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι κύριας σημασίας κατά την σχεδίαση ενός πρωτοκόλλου on-demand δρομολόγησης. Περισσότερα και πιο αναλυτικά αποτελέσματα μπορείτε να βρείτε στην συγκεκριμένη εργασία.

### ***5.3.2. Ensuring Cache Freshness in On-Demand Ad Hoc Network Routing Protocols***

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται ένας νέος μηχανισμός, που εγγυάται την μείωση του ποσοστού των πολυδιατηρημένων και μη έγκυρων αποθηκευμένων πληροφοριών δρομολόγησης στις Route Caches. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη προσέγγιση επιτυγχάνουμε την καλύτερη διαχείριση των πληροφοριών μιας Cache με την παρεμπόδιση ανταλλαγής μη-έγκυρων πληροφοριών ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου. Συγκεκριμένα οι κόμβους αποτρέπονται από το να συγκρατούν πληροφορίες για διαδρομές δρομολόγησης, οι οποίες περιέχουν συνδέσεις για τις οποίες έχει ήδη αναφερθεί κάποιο λάθος. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο δεν στηρίζεται σε κάποιους

μηχανισμούς δρομολόγησης των ad-hoc δικτύων όπως η αποθήκευση αρνητικών πληροφοριών δρομολόγησης. Επιτρέπει σε έναν κόμβο, που έχει λάβει ένα μήνυμα για μια σύνδεση που έχει διακοπεί, να λάβει και ένα μήνυμα εύρεσης μιας διαδρομής που περιέχει την σύνδεση αυτή, να τοποθετήσει τα δύο αυτά γεγονότα διαδοχικά και να καθορίσει ποιο από τα δύο εμφανίστηκε πρώτο, για να μπορέσει να συμπεράνει ποίο από τα δύο ισχύει, προσπαθώντας να διατηρεί πληροφορίες που είναι όσο το δυνατό εγκυρότερες.

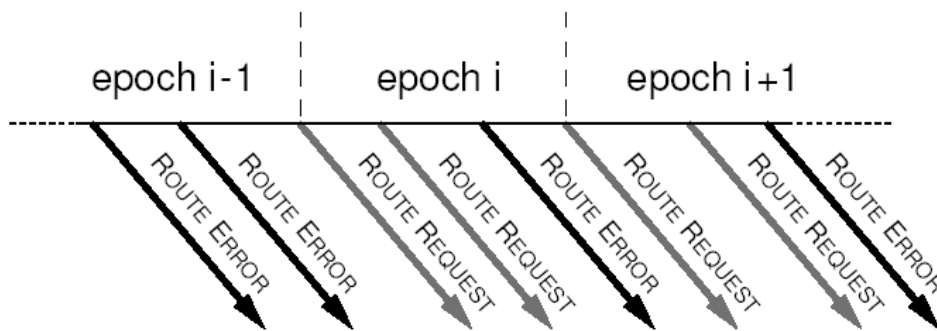
#### *5.3.2.1. Περιγραφή της μεθόδου*

Η προσέγγισή των συγγραφέων στην παρούσα εργασία αφορά τη μείωση του πλήθους των άκυρων αποθηκευμένων πληροφοριών δρομολόγησης με την συλλογή αρικιών πληροφοριών δρομολόγησης, ώστε να είναι δυνατή η αποκατάσταση διαδρομών για τις οποίες έχει αναφερθεί λάθος σε κάποιες συνδέσεις.

Όταν είναι δυνατή η διαδοχική χρονική τοποθέτηση πληροφοριών δρομολόγησης για νέες έγκυρες διαδρομές αλλά και μηνυμάτων λαθών, για διαδρομές οι οποίες περιέχουν συνδέσεις που έχουν διακοπεί, πολυδιατηρημένες άκυρες πληροφορίες δεν μπορούν να αποθηκευτούν ξανά στην «Route Cache» ενός κόμβου μετά από την διαγραφή τους. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί όταν ένας κόμβος ακυρώσει μια αποθηκευμένη διαδρομή, η οποία περιέχει μια άκυρη σύνδεση και λάβει μία απάντηση στο μέλλον, που περιέχει την εν λόγω άκυρη σύνδεση, με σκοπό να την αποθηκεύσει ξανά στην «Route Cache».

Στην παρούσα εργασία οι συγγραφείς χρησιμοποιούν μια τεχνική που ονομάζεται «epoch numbers» με σκοπό να περιγράψουν μια ακολουθία από γεγονότα. Η τεχνική αυτή επιτρέπει σε ένα κόμβο του δικτύου να γνωρίζει την αλληλουχία διαφόρων γεγονότων, ώστε να μπορέσει να πάρει όταν είναι απαραίτητο την σωστότερη απόφαση στην δρομολόγηση των δεδομένων. Στην λύση που παρουσιάζεται δεν είναι απαραίτητη η χρήση συγχρονισμένων ρολογιών ή η χρήση timestamps πληροφοριών. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια λύση wraparound των ακέραιων αριθμών, που χρησιμοποιούμε για να αναπαραστήσουμε τους «epoch numbers», που ονομάζεται «generation numbers» και εκφράζει το χρόνο παραμονής των πληροφοριών στους πίνακες αποθήκευσης.

Στην παρουσία συγκρουόμενων πληροφοριών δρομολόγησης οι κόμβοι πρέπει να δημιουργήσουν μια αλληλουχία από διακριτά γεγονότα. Για να το πετύχουν σε κάθε κόμβο διατηρείται ένας «epoch number», που ανήκει σε αυτόν, ο οποίος αντιστοιχείται με κάθε σύνδεση κάθε πρόσφατου γείτονα και με κάθε νέο μήνυμα διακοπής συνδέσεων, που ο ίδιος ο κόμβος στέλνει. Παραδείγματος χάριν, εάν κατά τη διάρκεια του «epoch number»  $i$  του κόμβου Α, εάν ο κόμβος Α ανακαλύψει ότι ο Β είναι ένα νέος γείτονας του, συνδέει τη σύνδεση από τον Α στον Β με τον «epoch number»  $i$  (ανεξάρτητος από τον «epoch number» του κόμβου Β). Κάθε «Route Cache» περιλαμβάνει τόσο θετικές όσο και αρνητικές πληροφορίες για τις συνδέσεις κάθε κόμβου, μαζί με τον αντίστοιχο «epoch number» για κάθε μία από αυτές. Κάθε πακέτο που περιέχει πληροφορίες δρομολόγησης περιλαμβάνει επίσης τον «epoch number» για κάθε ξεχωριστή σύνδεση στη διαδρομή για τον αντίστοιχο κόμβο.



Εικόνα 8: Οι «epoch numbers» σε ένα κόμβο

Η αλληλουχία των συνδέσεων γίνεται, χρησιμοποιώντας «epoch numbers», στους κόμβους αποστολής των δεδομένων. Κάθε φορά που μία αποθηκευμένη σύνδεση ενός κόμβου έρχεται σε σύγκρουση με πληροφορίες δρομολόγησης που πρόσφατα έλαβε, ο κόμβος επιλέγει τις πληροφορίες με τον μεγαλύτερο «epoch number». Όταν η ανίχνευση μίας σύνδεσης και η θραύση μίας σύνδεσης έχουν τον ίδιο «epoch number», οι πληροφορίες θραύσης της σύνδεσης παίρνουν προτεραιότητα. Οι «epoch numbers» αυξάνονται ανάλογα με τις ανάγκες για να διατηρήσουν την κατάλληλη αλληλουχία των πληροφοριών δρομολόγησης, όπως διευκρινίζεται στο παραπάνω σχήμα. Ειδικότερα, όποτε ένας κόμβος δημιουργεί ή διαβιβάζει ένα πακέτο «Route Request» αφότου έχει δημιουργηθεί ήδη ένα «Route Error», αυξάνει τον «epoch number» του.

Σαν παράδειγμα της χρήσης των «epoch numbers», υποθέστε ότι ο κόμβος A αποθηκεύει μια σύνδεση από τον κόμβο B στον κόμβο C με «epoch number» 1 και χρησιμοποιεί αυτήν τη σύνδεση ως τμήμα μιας διαδρομής. Κατόπιν ο κόμβος A θα δεχόταν ένα «Route Error» για αυτήν την σύνδεση μόνο με «epoch number» μεγαλύτερο ή ίσο 1. Σε μία τέτοια περίπτωση ο κόμβος A θα αγνοήσει οποιαδήποτε σύνδεση από το B στον C με «epoch number» μικρότερο ή ίσο με αυτόν στο μήνυμα «Route Error» και δεν θα προσθέσει τις συγκεκριμένες πληροφορίες στην «Route Cache» του. Αυτό αποτρέπει τον κόμβο A να διατηρεί πληροφορίες, οι οποίες περιέχουν λάθη και είναι πολυδιατηρημένες από αυτές που είναι νεώτερες και έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να είναι έγκυρες.

Οι «epoch numbers» υλοποιούνται, σύμφωνα με τους συγγραφείς της εργασίας, με την χρήση ακεραιών, οι οποίοι σε ένα υπολογιστικό σύστημα περιγράφονται με ένα περιορισμένο πλήθος δυαδικών ψηφίων και έχουν συγκεκριμένο μη-άπειρο πλήθος. Καθώς οι «epoch numbers» αυξάνονται συνεχώς, με την πάροδο του χρόνου υπάρχει ο φόβος υπερχείλισης του ακέραιου αριθμού που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση. Για τον λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί ένας μηχανισμός για την αποφυγή της υπερχείλισης των ακεραιών που αποθηκεύονται οι «epoch numbers». Για να το πετύχουμε αυτό αρχικά περιορίζουμε τον ρυθμό με τον οποίο οι «epoch numbers» χρησιμοποιούνται. Δεδομένου ότι ο στόχος μας είναι να περιορίσουμε τον αριθμό των «epoch numbers» που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα διάστημα, πριν ξεκινήσει πάλι η αρίθμηση τους από την αρχή. Κατά κάποιο τρόπο χωρίζουμε σε διάφορα μέρη το χώρο στο οποίο μπορούν να κυμαίνονται οι «epoch numbers» στην πάροδο του χρόνου λειτουργίας του δικτύου.

Όποτε ένα πακέτο στέλνεται, με μια διαδρομή πηγής από κάποιον κόμβο, περιέχει έναν «epoch number» και έναν «generation number» για κάθε σύνδεση που περιέχεται στην διαδρομή δρομολόγησης. Ο «epoch number» επιλέγεται να είναι αυτός που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη σύνδεση και περιέχεται στην «Route Cache» του κόμβου. Για να επιλεγεί ο «generation number», ο κόμβος υπολογίζει το χρόνος άφιξης του πακέτου αυτού στον τελευταίο κόμβο που έλαβε το πακέτο από όπου παίρνει το «generation number» και το αυξάνει κατά ένα και τον χρησιμοποιεί. Όποτε ο «generation number» αυξάνεται, ο κόμβος ελέγχει εάν ο αριθμός έχει περάσει ένα συγκεκριμένο πάνω όριο. Σε αυτή την περίπτωση, στον «epoch number» τίθεται μια ειδική τιμή (όπως το 0) και

οι κόμβοι μπορούν να αποθηκεύσουν συγκεκριμένη σύνδεση μόνο εάν δεν γνωρίζουν προηγουμένως ότι δεν είναι έγκυρη.

Προσπαθήσαμε να εξηγήσουμε μερικές από τις σημαντικότερες πτυχές της συγκεκριμένης προτεινόμενης μεθόδου. Περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν στο σχετικό άρθρο [Hu 2003].

#### *5.3.2.2. Ανάλυση του πρωτοκόλλου*

##### *5.3.2.2.1. Network Overhead*

Για να χρησιμοποιήσουν τους «epoch» και «generation number» για όλες τις καταχωρήσεις μίας «Route Cache» τους περιλαμβάνουμε σε κάθε διεύθυνση για κάθε διαδρομή πηγής, σε όλα τα μηνύματα ελέγχου του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Κατά συνέπεια, είναι δυσανάλογο, το μέγεθος των πληροφοριών για τους αριθμούς αυτούς και το μέγεθος της διεύθυνσης του κάθε κόμβου στο δίκτυο. Αυτό προσθέτει ένα σημαντικό «overheard» στο δίκτυο.

##### *5.3.2.2.2. Storage Overhead*

Το σχήμα των «epoch numbers» προσθέτει έναν σταθερό παράγοντα «overhead» στην αποθήκευση της κατάστασης των συνδέσεων, δεδομένου ότι κάθε σύνδεση πρέπει να περιέχει τις πληροφορίες αυτές. Αυτό το επιπλέον μέγεθος των πληροφοριών που πρέπει να αποθηκεύονται ανά σύνδεση, συμπεριλαμβανομένων και των πληροφοριών του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου, είναι σταθερό και αυξάνουν τις πληροφορίες που αποθηκεύονται για την κατάσταση των συνδέσεων σε μια Cache, κατά ένα σταθερό παράγοντα.

##### *5.3.2.2.3. Αποτελέσματα*

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι αρκετά ικανοποιητικά, σύμφωνα με αυτά που αναφέρονται στην συγκεκριμένη δημοσίευση. Η συγκεκριμένη λύση λειτουργεί αρκετά αποδοτικά και αποτρέπει τους κόμβους από την χρησιμοποίηση παλαιότερων άκυρων πληροφοριών δρομολόγησης από νέες πληροφορίες, για τις οποίες δεν υπάρχει αναφορά για κάποιο λάθος κάποιας σύνδεσης. Η τεχνική αυτή προσφέρει στους κόμβους την δυνατότητα να γνωρίζουν την χρονολογική σειρά γεγονότων που μπορούν να επηρεάσουν την διαδικασία δρομολόγησης, όπως η ανακάλυψη ύπαρξης νέων συνδέσεων με νέους κόμβους και η αναφορά λαθών σε συγκεκριμένες συνδέσεις,

προσφέροντας τους τις απαραίτητες γνώσεις για να μπορέσουν να χρησιμοποιούν αποδοτικά τις πληροφορίες αυτές.

#### **5.4. Πειραματικός έλεγχος της βελτίωσης της απόδοσης της Route Cache σε ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης**

Στις προηγούμενες παραγράφους περιγράψαμε δύο συγκεκριμένες εργασίες, που έχουν γίνει πάνω στην βελτίωση της απόδοσης των on-demand πρωτοκόλλων δρομολόγησης με την βέλτιστη χρήση της τεχνικής αποθήκευσης διαδρομών πηγής στους κόμβους ενός ad-hoc δικτύου. Στην επόμενη παράγραφο θα περιγράψουμε την υλοποίηση ενός μοντέλου, στο πρόγραμμα προσομοίωσης OPNET, της πρώτης από τις δύο τεχνικές, με την χρήση του πρωτοκόλλου Δυναμικής Δρομολόγησης Πηγής (DSR) και τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε σχέση με την βελτίωση της απόδοσης του πρωτοκόλλου.

## Κεφάλαιο 6

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

#### 6. Περιγραφή περιβάλλοντος προσομοίωσης και πειραμάτων

Στα προηγούμενα κεφάλαια κάναμε μια ανασκόπηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, αναφερθήκαμε εκτενέστερα στο πρωτόκολλο δυναμικής δρομολόγησης πηγής (DSR) και περιγράψαμε αναλυτικά τεχνικές αποδοτικής αποθήκευσης και χρήσης των αποθηκευμένων πληροφοριών δρομολόγησης στους κόμβους ενός ασύρματου ad-hoc δικτύου. Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε την υλοποίηση του πρωτοκόλλου DSR στο OPNET, το ίδιο το εργαλείο προσομοίωσης OPNET, θα μιλήσουμε για την τεχνική βελτίωσης της απόδοσης ενός ασύρματου ad-hoc δικτύου, μέσω της βέλτιστης χρήσης του χρόνου ζωής των αποθηκευμένων διαδρομών δρομολόγησης σε ένα κόμβο, που υλοποιήσαμε στο OPNET και θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα που έγιναν.

#### 6.1. Περιγραφή του προγράμματος προσομοίωσης δικτύων OPNET.

Στην παρούσα εργασία επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε ως εργαλείο προσομοίωσης τον OPNET Modeler. Ο λόγος, πέρα από το αναμφισβήτητο γεγονός, είναι ότι πρόκειται για ένα από τα δημοφιλέστερα και πιο αναγνωρισμένα εργαλεία προσομοίωσης που μας προσφέρει ένα ολοκληρωμένο και πλήρες περιβάλλον σχεδίασης και ανάπτυξης του μοντέλου μας, δίνοντάς μας ταυτόχρονα τη δυνατότητα για καλύτερη και εις βάθος κατανόηση των λειτουργιών ενός δικτυακού αλγορίθμου. Στην παρούσα εργασία το εργαλείο που περιγράφουμε μας επέτρεψε να κατανοήσουμε καλύτερα τις λειτουργίες του αλγορίθμου δρομολόγησης DSR και επέμβασης στα συγκεκριμένα σημεία του πρωτοκόλλου, για την υλοποίηση του σχήματος αποδοτικής αποθήκευσης διαδρομών και υπολογισμού του χρόνου ζωής τους. Ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου εργαλείου είναι ότι πρόκειται για ένα υπέρ-πλήρες εργαλείο προσομοίωσης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγάλη προσπάθεια για την κατανόηση των λειτουργιών του και των επιμέρους προγραμμάτων υποστήριξης και ανάλυσης της προσομοίωσης, πράγμα απαραίτητο για την ολοκλήρωση των πειραμάτων και την επιβεβαίωση των θεωρητικών συμπερασμάτων της εργασίας αυτής.

### ***6.1.1. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του OPNET modeler***

Ο OPNET (Optimised NETWORK Performance) είναι ένα ολοκληρωμένο εργαλείο σχεδιασμού και προσομοίωσης τηλεπικοινωνιακών δικτύων, κατανεμημένων συστημάτων, δικτυακών συσκευών και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Αναπτύχθηκε στο MIT το 1987 και σήμερα αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο εφαρμογών και εργαλείων για τη μοντελοποίηση ενός μεγάλου αριθμού δικτυακών συστημάτων και τεχνολογιών.

Μπορεί να προσομοιώσει σχεδόν οποιοδήποτε τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και οποιοδήποτε αλγόριθμο, πρωτόκολλο ή επικοινωνιακό σύνδεσμο. Είναι ένα από τα μεγαλύτερα και πληρέστερα πακέτα λογισμικού που έχουν δημιουργηθεί για το σκοπό αυτό. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του, το οποίο τον κάνει να ξεχωρίζει από τα άλλα προγράμματα προσομοίωσης, είναι η ιεραρχική δομή των εργαλείων προσομοίωσης και ο τρόπος υλοποίησης των διαφόρων μοντελοποιημένων συστημάτων, που πλησιάζει τη δομή και τη λειτουργία πραγματικών συστημάτων. Είναι ένα από τα δημοφιλέστερα εργαλεία προσομοίωσης δικτύων τόσο στον ερευνητικό και ακαδημαϊκό χώρο, όσο και στη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών και δικτύων.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η κυριότερη διαφορά του OPNET από τα υπόλοιπα αντίστοιχα πακέτα λογισμικού είναι ότι προσφέρει στους χρήστες ένα σύνολο από εργαλεία για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός μεγάλου εύρους τύπων δικτύου και μία τεράστια βιβλιοθήκη από έτοιμες διαδικασίες και μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό.

Παρακάτω αναφέρουμε μερικά από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του OPNET:

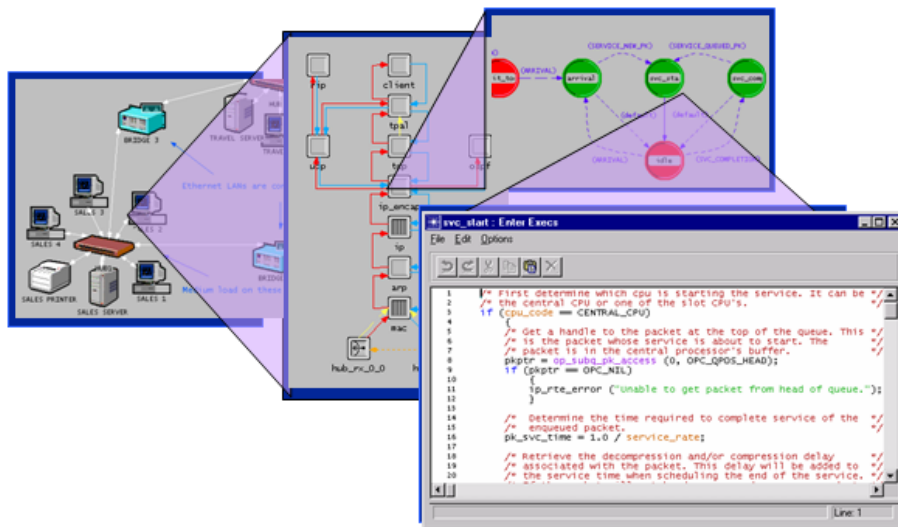
- Αντικειμενοστραφή δομή των μοντέλων.
- Γραφικός προσδιορισμός γνωστών μοντέλων, ενεργών και παθητικών στοιχείων ενός δικτύου.
- Προγράμματα και εργαλεία που επιτρέπουν την αυτόματη συλλογή στατιστικών δεδομένων κατά την διάρκεια μιας προσομοίωσης.



- Ολοκληρωμένα προγράμματα ανάλυσης και γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης, καθώς και έτοιμα μαθηματικά μοντέλα στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων.
- Μοντελοποίηση με βάση την ιεραρχία των αντικειμένων που αποτελούν ένα μοντέλο.
- Ιεραρχικά μοντέλα δικτύων
- Διαχείριση σύνθετων τοπολογιών δικτύων με απεριορίστο αριθμό υποδικτύων.
- Μοντελοποίηση των κόμβων και των πρωτοκόλλων σε ιεραρχικές δομές και κατηγορίες, οι οποίες συνδέονται με κληρονομικά χαρακτηριστικά.
- Απλό και σαφές παράδειγμα μοντελοποίησης.
- Διαμόρφωση συμπεριφοράς μεμονωμένων αντικειμένων στο "επίπεδο διαδικασίας" και διασύνδεσή τους για τη διαμόρφωση συσκευών στο "επίπεδο κόμβων". Διασύνδεση των συσκευών χρησιμοποιώντας και συνδέσεις για το σχηματισμό ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος στο "επίπεδο δικτύων." Οργάνωση πολλαπλών σεναρίων δικτύων σε ένα κοινό πρόγραμμα εκτέλεσης, με σκοπό τη σύγκριση του μοντέλου κάτω από διαφορετικές συνθήκες.
- Διαμόρφωση μηχανών πεπερασμένων καταστάσεων, από άλλα πρωτόκολλα και διαδικασίες. Μοντελοποίηση οποιασδήποτε απαραίτητης συμπεριφοράς και λογικής, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού C/C++ στις καταστάσεις της μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων και στις μεταβάσεις αυτής. Ελέγχεται το επίπεδο λεπτομέρειας στο οποίο περιγράφεται η υλοποίηση της μοντελοποίησης.
- Ύπαρξη ειδικών προγραμματιστικών βιβλιοθηκών με πάνω από 400 λειτουργίες προς χρήση, που απλοποιούν τον προγραμματισμό των πρωτοκόλλων και των μοντέλων.
- Η βασική βιβλιοθήκη μοντέλων περιλαμβάνει εκατοντάδες μοντέλα πρότυπων συσκευών, όπως δρομολογητές, switches, τερματικών σταθμών, και γεννητριών

πακέτων και άλλων, δίνοντας στους χρήστες τη δυνατότητα για γρήγορη και εύκολη δημιουργία νέων μοντέλων δικτυακών συστημάτων.

- Ασύρματες, από σημείο σε σημείο και πολύ-σημειακές επικοινωνίες.
- Η συμπεριφορά των συνδέσεων είναι ανοικτή και προγραμματιζόμενη. Ακριβής υπολογισμός της καθυστέρησης, της διαθεσιμότητας, των λαθών στη μετάδοση των δεδομένων και των χαρακτηριστικών του ρυθμού και της απόδοσης των συνδέσεων. Ενσωμάτωση των χαρακτηριστικών του φυσικού επιπέδου και των περιβαλλοντικών επιδράσεων.
- Οικονομικά χαρακτηριστικά κόστους των συσκευών, εξαγωγή των δαπανών των δικτύων σε λογιστικά φύλλα (spreadsheet) για μια οικονομική ανάλυση.
- Πληθώρα συσκευών και συστημάτων διαθέσιμων στους χρήστες για τη χρήση τους σε μοντέλα δικτύων.



Εικόνα 9: Ιεραρχικό μοντέλο στον OPNET Modeler

Για τον καθορισμό παραμέτρων, όπως είναι -για παράδειγμα- η μορφή ενός πακέτου, το είδος ενός συνδέσμου, ο τύπος μίας συνάρτησης και η συμπεριφορά ενός κόμβου, παρέχεται μία σειρά από ειδικά προγράμματα ανάλυσης και σχεδίασης. Το καθένα από αυτά είναι υπεύθυνο για την υλοποίηση ενός συγκεκριμένου τμήματος του μοντέλου προσομοίωσης, είτε αφορά το υλικό, είτε το λογισμικό του δικτύου.

Στο OPNET για να μελετηθεί η συμπεριφορά και η απόδοση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, χρησιμοποιείται μια τεχνική προσομοίωσης που βασίζεται στη δημιουργία «διακριτών γεγονότων», τα οποία αντιπροσωπεύουν τα γεγονότα με τα οποία μπορεί να έρθει αντιμέτωπο ένα πραγματικό δικτυακό σύστημα. Η δημιουργία των «διακριτών γεγονότων» προκαλεί την αντίδραση των οντοτήτων του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, όπως θα συνέβαινε σε ένα πραγματικό σύστημα, με την ανταλλαγή μηνυμάτων - δεδομένων και επεξεργασία αυτών σε κάθε κόμβο. Στο χαμηλότερο επίπεδο όλα αυτά μεταφράζονται στην εκτέλεση κατάλληλων διαδικασιών και διεργασιών ορισμένων από τον χρήστη, οι οποίες περιγράφουν το συγκεκριμένο σύστημα.

### ***6.1.2. Γιατί επιλέξαμε το συγκεκριμένο εργαλείο***

Αρκετές συγκρίσεις έχουν γίνει, ειδικά στην έρευνα μέσα σε πανεπιστημιακά ιδρύματα, με εργαλεία προσομοίωσης όπως ο NS-2 ή το GloMoSim, που δίνουν μια ιδέα για την απόδοση αυτών των πρωτοκόλλων, όταν χρησιμοποιούνται πάνω από ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Έρευνες παρόμοιες έχουν γίνει και σε ιδιωτικά ερευνητικά κέντρα χρησιμοποιώντας, όχι μόνο τα προαναφερθέντα προγράμματα προσομοίωσης, αλλά και άλλα εμπορικά πακέτα. Στη NIST και συγκεκριμένα στην ομάδα Wireless Communications Technologies Group της NIST, για την καλύτερη δυνατή υποστήριξη στη μελέτη των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για την ομάδα εργασίας MANET της IETF, αποφάσισαν να αξιολογήσουν μερικά από αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης από μια διαφορετική σκοπιά με την υλοποίηση ενός μοντέλου του πρωτοκόλλου DSR χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοίωσης OPNET.

Ένα από τα πρωτόκολλα που ανέπτυξαν είναι και το DSR. Εμείς αποφασίσαμε να το χρησιμοποιήσουμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, επειδή, με τη συγκεκριμένη υλοποίηση, αν και δεν είναι η πιο σύγχρονη, μπορούμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά αυτού καθαυτού του πρωτοκόλλου, όσον αφορά στις τεχνικές αποδοτικής αποθήκευσης διαδρομών με τη χρήση της παραμέτρου του χρόνου ζωής των διαδρομών.

Επιλέξαμε λοιπόν το συγκεκριμένο εργαλείο για τρεις βασικούς λόγους, όπως αναφέρουμε παρακάτω. Κατ'αρχήν μας επέτρεψε να κατανοήσουμε σε βάθος τη λειτουργία του αλγόριθμου δρομολόγησης DSR, τον τρόπο υλοποίησης αυτού και των επιμέρους διεργασιών και διαδικασιών του, που με κανένα άλλο εργαλείο δεν θα μπορούσαμε να κατανοήσουμε, σε ανάλογο βαθμό. Μας επέτρεψε να μάθουμε να

χρησιμοποιούμε ένα από τα δημοφιλέστερα εργαλεία στη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών και των δικτύων. Τέλος, με το συγκεκριμένο εργαλείο βοηθηθήκαμε στη λήψη των στατιστικών στοιχείων, για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.

## **6.2. Υλοποίηση του DSR στο OPNET**

Ο στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιαστεί και να περιγραφεί η υλοποίηση του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης πηγής (DSR) στο πρόγραμμα προσομοίωσης OPNET, που χρησιμοποιήσαμε για τα πειράματά μας και το οποίο έχει υλοποιηθεί από τη NIST (επεξήγηση). Στο μοντέλο αυτό βασίσαμε τα πειράματά μας, για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του πρωτοκόλλου, βελτιστοποιώντας τη λειτουργία της «Route Cache». Τη λειτουργία αυτή χρησιμοποιούν οι κόμβοι για την αποθήκευση των πληροφοριών προσομοίωσης, τις οποίες καταφέρνουν να συλλέξουν κατά τη διάρκεια χρησιμοποίησης του πρωτοκόλλου για τη δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων σε ένα ad-hoc δίκτυο.

### **6.2.1. Ο λόγος υλοποίησης του DSR στο OPNET**

Σήμερα, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τα ασύρματα ad-hoc δίκτυα (MANET). Μια από τις μεγαλύτερες ερευνητικές προκλήσεις σε αυτά τα δίκτυα είναι το πρόβλημα της δρομολόγησης δεδομένων που στέλνονται με τη μορφή πακέτων από τον ένα κόμβο του δικτύου στον άλλο.

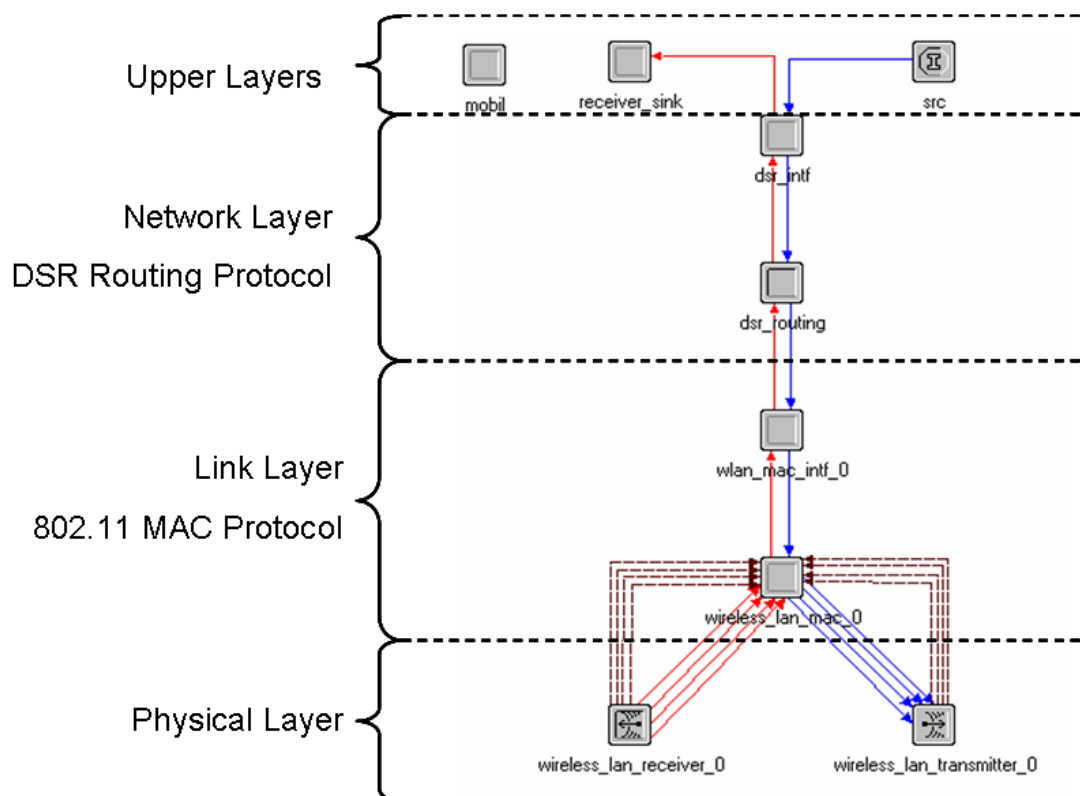
Πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης έχουν υποβληθεί για τη δημιουργία ενός προτύπου, όπως είναι ο AODV, ο ZRP και ο DSR. Βασικός στόχος είναι να υπολογιστούν και να συγκριθούν οι αποδόσεις των πρωτοκόλλων αυτών, προκειμένου να αξιολογήσουμε ποιο από αυτά είναι καταλληλότερο για τις εφαρμογές, ή –τουλάχιστον- για συγκεκριμένες εφαρμογές των ασύρματων ad-hoc δικτύων.

Σ' αυτήν την παράγραφο περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά του μοντέλου προσομοίωσης του DSR, από την προδιαγραφή (04) [αναφορά στο δρφτα 44444] στην οποία στηρίχτηκε η συγκεκριμένη υλοποίηση. Αν και σήμερα έχουμε διαθέσιμο το (09) [αναφορά στο δρφτα 44444], κρίναμε ότι στο συγκεκριμένο μοντέλο υπάρχουν διαθέσιμες όλες οι αναγκαίες διεργασίες και διαδικασίες για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

### 6.2.2. Το πρωτόκολλο DSR, υλοποίηση του μοντέλου στο OPNET

Η μοντελοποίηση του πρωτοκόλλου DSR στο OPNET χωρίζεται σε 3 επίπεδα. Το ανώτερο επίπεδο είναι το επίπεδο δικτύου και συνίσταται στη σχεδίαση και μοντελοποίηση της τοπολογίας των κόμβων που απαρτίζουν το ασύρματο ad-hoc δίκτυο. Το δεύτερο επίπεδο περιγράφει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε κόμβου που έχουν να κάνουν με το μέσο της ασύρματης μετάδοσης, του ασύρματου καναλιού και την υλοποίηση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης DSR, της διαδικασίας δημιουργίας πακέτων δεδομένων και της διαδικασίας υλοποίησης του μοντέλου κίνησης του κόμβου. Το τρίτο και τελευταίο επίπεδο είναι η περιγραφή καθεμιάς από τις παραπάνω διαδικασίες που συνθέτουν ένα κόμβο, με μία μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων, της οποίας κάθε κατάσταση αποτελείται από κομμάτια κώδικα γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού C.

Σαν πρώτη παρατήρηση μπορούμε να πούμε ότι το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSR είναι σχεδιασμένο ακολουθώντας -όσο είναι δυνατόν- το πρωτόκολλο επικοινωνίας του OSI. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα των κόμβων του :



Εικόνα 10: Μοντέλο στο επίπεδο του κόμβου

#### 6.2.2.1. Περιγραφή των στρώματων του μοντέλου των κόμβων του DSR:

Το φυσικό επίπεδο αποτελείται από έναν πομπό και ένα δέκτη, οι οποίοι είναι δυο από τα βασικά μοντέλα, που υπάρχουν στο πακέτο που προσφέρεται από το OPNET για την ανάπτυξη μοντέλων ασυρμάτων δικτύων. Περιγράφουν το φυσικό επίπεδο του ασύρματου προτύπου IEEE 802.11 που έχει υλοποιηθεί στο OPNET, το οποίο χρησιμοποιείται και στην υλοποίηση του DSR.

Το επίπεδο συνδέσεων που χρησιμοποιείται στο μοντέλο, περιγράφεται από το πρότυπο IEEE802.11 και έχει υλοποιηθεί στο OPNET και τροποποιηθεί κατάλληλα προκειμένου να συνδεθεί με το στρώμα δρομολόγησης του DSR. Οι τροποποιήσεις αφορούν την αποστολή επιβεβαιώσεων, μηνυμάτων λάθους, προσθήκης του promiscuous mode και της κινητικότητας των κόμβων. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο πρότυπο του επιπέδου συνδέσεων, αφού αποτελεί πρότυπο στα ασύρματα δίκτυα. Είναι αυτό που χρησιμοποιείται ευρέως, και φαίνεται να είναι το πρωτόκολλο που τελικά θα επικρατήσει σε αυτού του είδους τα δίκτυα. Στην υλοποίηση στο OPNET το πρωτόκολλο αυτό έχει διαιρεθεί σε δύο διαδικασίες: στην πρώτη (wireless\_lan\_mac\_0) υλοποιείται αυτό καθαυτό το πρωτόκολλο, ενώ στη δεύτερη (wlan\_mac\_intf\_0) υλοποιείται μια διεπαφή για την επικοινωνία του με τα ανώτερα στρώματα.

Το επίπεδο δικτύου είναι ο πυρήνας του μοντέλου, δεδομένου ότι περιέχει τη διαδικασία δρομολόγησης του πρωτοκόλλου DSR και διαιρείται σε δύο διαδικασίες. Η πρώτη είναι η διαδικασία που περιγράφει τους μηχανισμούς δρομολόγησης του DSR (που αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο) και η δεύτερη περιγράφει μια διεπαφή με τα ανώτερα στρώματα του μοντέλου, τα οποία είτε τροφοδοτούν με νέα πακέτα τη διαδικασία δρομολόγησης, είτε παραλαμβάνουν πακέτα που έχουν φτάσει στον προορισμό τους από το επίπεδο δρομολόγησης.

Τα ανώτερα στρώματα αποτελούνται κυρίως από δύο διαδικασίες. Η διαδικασία πηγής «source» είναι μια διαδικασία του OPNET, που παράγει πακέτα δεδομένων, βάσει μιας κατανομής, κατά την εκτέλεση του μοντέλου. Η διαδικασία δέκτης «receiver» λαμβάνει και καταστρέφει τα πακέτα τα οποία έχουν παραληφθεί και για τα οποία έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία επεξεργασίας του πρωτοκόλλου.

Στα ανώτερα στρώματα των διεργασιών ενός κόμβου, στην υλοποίηση του μοντέλου του DSR στο OPNET, υπάρχει μια ακόμη διεργασία που ονομάζεται «Mobil» και είναι υπεύθυνη για την υλοποίηση του μοντέλου κίνησης των κόμβων. Τα μοντέλα κίνησης που υποστηρίζονται από την παρούσα υλοποίηση περιγράφονται παρακάτω.

#### *6.2.2.2. Το μοντέλο δρομολόγησης DSR*

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε το μηχανισμό δρομολόγησης του DSR που υλοποιήθηκε από τη NIST και θα προσπαθήσουμε να συγκρίνουμε το υλοποιημένο μοντέλο με το πρότυπο κείμενο που έχει κατατεθεί στην ομάδα εργασίας MANET της IETF.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειώσουμε ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για τα πειράματά μας στο OPNET και το οποίο έχει αναπτύξει η NIST, βασίστηκε στο draft που κατατέθηκε στο MANET σχέδιο-ηετφ-μανετ-δσρ- 03.txt. Εντούτοις, σήμερα έχουμε διαθέσιμη την ένατη έκδοση περιγραφής του πρωτοκόλλου και η σύγκριση θα γίνει χρησιμοποιώντας την πιο πρόσφατη έκδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης DSR.

Στο τελευταίο μέρος αυτής της παραγράφου θα περιγραφεί η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων του πρωτοκόλλου δρομολόγησης του DSR.

##### *6.2.2.2.1. Βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας του DSR*

Σ' αυτή την παράγραφο περιγράφουμε τους δύο βασικούς μηχανισμούς, που χρησιμοποιεί ο DSR για την εύρεση και διατήρηση διαδρομών προς τους κόμβους ενός ασύρματου ad-hoc δικτύου, στο υλοποιημένο μοντέλο στο OPNET. Η υλοποίηση ακολούθησε πιστά τις προδιαγραφές που περιγράφονται στο κείμενο που αφορά στην περιγραφή του πρωτοκόλλου και η οποία έγινε σε παραπάνω κεφάλαιο. Στην παράγραφο αυτή δεν επαναλαμβάνουμε τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου δρομολόγησης DSR, τα οποία υλοποιήθηκαν. Επισημαίνουμε συγκεκριμένα σημεία του πρωτοκόλλου τα οποία είτε δεν έχουν υλοποιηθεί, είτε υπέστησαν μικρές αλλαγές από τους σχεδιαστές κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του μοντέλου.

###### *6.2.2.2.1.1.1. Μηχανισμός εύρεσης διαδρομών*

- Μηχανισμός έκδοσης αιτήματος για μια νέα διαδρομή.

Ο μηχανισμός αναζήτησης λειτουργεί ακριβώς όπως περιγράφουν οι προδιαγραφές. Αρχικά, για να περιοριστούν οι διαδόσεις πολλών περιττών πακέτων «Route Request» ο κόμβος προέλευσης μιας αίτησης περιορίζει τη διάδοση του σχετικού μηνύματος έως τον επόμενο κόμβο, με σκοπό να ελέγξει εάν κάποιος από τους γείτονές του έχει μια έγκυρη διαδρομή προς τον προορισμό ή εάν ο κόμβος προορισμού είναι μέσα στην εμβέλεια του. Για αυτόν το λόγο ο κόμβος στέλνει ένα αίτημα διαδρομών περιορισμένης διάδοσης.

Εάν καμία απάντηση δεν παραληφθεί μετά από κάποια χρονική περίοδο, στέλνεται ένα κλασικό αίτημα αναζήτησης διαδρομών προς όλους του κόμβους, το οποίο έχει όριο διάδοσης όσο είναι και το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο μήκους μιας διαδρομής.

Τέλος, εφ' όσον δεν παραλαμβάνεται καμία απάντηση διαδρομών, ένα νέο αίτημα αναζήτησης διαδρομών διάδοσης στέλνεται, με μία αρχική τυχαία καθυστέρηση, που αυξάνεται εκθετικά, για να μειώσουμε τη συνολική καθυστέρηση διάδοσης των πακέτων στο δίκτυο από την δημιουργία πολλαπλών αιτημάτων αναζήτησης διαδρομών. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο και αποδοτικό όταν το δίκτυο διαιρείται σε μικρότερα ανεξάρτητα τμήματα, με αποτέλεσμα δύο κόμβοι σε δύο διαφορετικά τμήματα του δικτύου να μην μπορούν να ανταλλάξουν δεδομένα και είναι άωφελο να ενεργοποιούν συνεχώς το μηχανισμό αναζήτησης διαδρομών μεταξύ τους.

- Αίτημα διαδρομών από τους μηχανισμούς λάθους

Τα αιτήματα διαδρομών που γίνονται μετά από μια παραλαβή πακέτων λάθους είναι αρκετά διαφορετικά από αυτά που ήδη περιγράψαμε ανωτέρω. Πράγματι, δεδομένου ότι ένα λάθος ανιχνεύθηκε από κάποιο κόμβο, με την παραλαβή ενός αντίστοιχου μηνύματος δημιουργείται ένα πακέτο «Route Request» προς τον προορισμό για τον οποίο δεν υπάρχει ενεργή διαδρομή λόγω του λάθους, το οποίο περιέχει το μήνυμα λάθους. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η κατάσταση στην οποία ένας κόμβος, που δεν έχει αντιληφθεί το συγκεκριμένο λάθος, απαντά στο αίτημα με τη χρησιμοποίηση μιας αποθηκευμένης διαδρομής, που περιέχει τη σύνδεση στην οποία συνέβη το λάθος, αλλά και επιτυγχάνεται η ακύρωση όλων των αποθηκευμένων διαδρομών οι οποίες περιέχουν την συγκεκριμένη αυτή σύνδεση. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός στην παρούσα υλοποίηση δεν έχει υλοποιηθεί.



- Μηχανισμός καθυστέρησης απάντησης σε αιτήματα διαδρομών

Ο κύριος στόχος αυτού του μηχανισμού είναι να αποφευχθούν οι πολλαπλές ταυτόχρονες απαντήσεις διαδρομών από πολλούς κόμβους του δικτύου, πράγμα που συμβαίνει όταν οι κόμβοι, που δεν αποτελούν το προορισμό της ζητούμενης διαδρομής, αποστέλλουν μια απάντηση σε ένα αίτημα διαδρομών χρησιμοποιώντας τις αποθηκευμένες διαδρομές τους. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό κάθε απάντηση διαδρομών καθυστερεί σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα:

$$\text{Delay} = \text{DELAY\_PER\_HOP} \times (\text{NB\_hops} - 1 + R(0,1))$$

Όπου : DELAY\_PER\_HOP είναι μια σταθερά ( $10^{-5}$  για το συγκεκριμένο μοντέλο), NB\_hops είναι ο αριθμός των συνδέσεων στην διαδρομή προς τον κόμβο προέλευσης της διαδρομής και το R(0,1) είναι μια τυχαία μεταβλητή μεταξύ του μηδέν και του ένα.

Χρησιμοποιώντας αυτήν την καθυστέρηση, οι κόμβοι αποφεύγουν να στείλουν την απάντηση τους στο αίτημα αναζήτησης διαδρομών συγχρόνως. Επιπλέον, ο κόμβος που θα στείλει πρώτος μια απάντηση θα περιέχει και τη συντομότερη διαδρομή προς τον προορισμό, πράγμα που είναι σύμφωνο με το πρωτόκολλο που επιθυμεί να ανακαλύπτει τη συντομότερη διαδρομή.

Σημειώστε ότι προκειμένου να δοθεί προτεραιότητα σε μια απάντηση που στέλνεται άμεσα από τον κόμβο προορισμού στον κόμβο προέλευσης, η παραπάνω καθυστέρηση τίθεται στο μηδέν.

- promiscuous mode

Σε αυτό το μέρος εξετάζουμε την μέθοδο promiscuous mode που έχουν οι κόμβοι και η οποία χρησιμοποιείται στο μηχανισμό ανακάλυψης διαδρομών.

Η μέθοδος αυτή δίνει σε έναν κόμβο τη δυνατότητα να αλλάξει το προγραμματισμό εκτέλεσης των διαδικασιών του, λόγω κάποιου γεγονότος που συνέβη. Παραδείγματος χάριν, δεδομένου ότι η πρώτη απάντηση σε ένα αίτημα αναζήτησης διαδρομών που στέλνεται στο δίκτυο περιέχει τη συντομότερη διαδρομή προς τον προορισμό, κάθε κόμβος που «αναγνωρίζει» ένα τέτοιο πακέτο που ταξιδεύει στο δίκτυο, μπορεί να

συμπεράνει ότι μια άλλη διαδρομή από αυτή που έχει διαθέσιμη έχει ήδη βρεθεί, και δεν είναι πλέον απαραίτητο να απαντήσει στο συγκεκριμένο αίτημα μεταδίδοντας τη διαδρομή που έχει, γεγονός το οποίο τελικά μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη συμφόρηση του δικτύου. Στην τελευταία έκδοση του προτύπου του DSR, ο promiscuous μηχανισμός πρέπει να είναι ενεργός στα πρώτα πακέτα δεδομένων που στέλνεται, μετά από την παραλαβή μιας απάντησης μετά την εύρεση μιας διαδρομής, αντί του πρώτου πακέτου απάντησης διαδρομών που στέλνεται. Αυτό δεν έχει υλοποιηθεί στο παρόν μοντέλο.

- Μη ύπαρξη βρόγχων στις διαδρομές.

Όπως εξηγείται στις προδιαγραφές του πρότυπου, όλες οι διαδρομές δεν πρέπει να περιέχουν βρόγχους. Η συγκεκριμένη διαδικασία σκοπό έχει να αφαιρεί κάθε βρόγχο που υπάρχει μετά από την δημιουργία μιας διαδρομής από τις αποθηκευμένες διαδρομές των ενδιάμεσων κόμβων και να ελέγχει εάν ο ενδιάμεσος κόμβος μετά την παραπάνω διαδικασία είναι ακόμα μέρος του μονοπατιού. Επίσης, εξασφαλίζει ότι ένα πακέτο αναζήτησης μιας διαδρομής προωθείται μόνο μια φορά από κάθε κόμβο.

#### *6.2.2.2.1.1.2. Μη-υλοποιημένοι μηχανισμοί*

Στο μοντέλο του DSR, που είχαμε στη διάθεσή μας για την εκτέλεση των πειραμάτων μας, υπήρχαν πολλά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου, τα οποία περιγράφονται στις προδιαγραφές και δεν έχουν υλοποιηθεί κι αυτό γιατί το μοντέλο υλοποιήθηκε πριν από την τελευταία έκδοση των προδιαγραφών που κατατέθηκε στην ομάδα εργασίας MANET της IETF. Παρόλα αυτά το συγκεκριμένο μοντέλο κρίθηκε ότι επιτρέπει τη μελέτη των χαρακτηριστικών του πρωτοκόλλου που είναι ο σκοπός αυτής της εργασίας.

Ο πρώτος μηχανισμός που δεν έχει υλοποιηθεί είναι η καθυστέρηση jitter για τα αιτήματα νέων διαδρομών «Route Requests» και για τα πακέτα απάντησης «Route Replies» για την εγκατάσταση μιας διαδρομής. Η ιδέα αυτή εμφανίζεται μόνο στην πιο πρόσφατη προδιαγραφή του DSR, αλλά πιστεύεται ότι το 802.11 backoff σχήμα μαζί με το μηχανισμό defer παρέχουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά με την αναμονή ενός σύντομου χρόνου διαστήματος, πριν διαβιβαστούν τα πακέτα δεδομένων στο φυσικό επίπεδο.

Ο δεύτερος μηχανισμός που δεν υλοποιήθηκε είναι ένα ανώτερο χρονικό όριο αναμονής για ένα πακέτο δεδομένων, που περιμένει για την ολοκλήρωση της εύρεσης μιας διαδρομής για την μετάδοσή του. Από τη NIST πιστεύεται ότι αυτός ο μηχανισμός, αν και αναπόσπαστο κομμάτι του πρωτοκόλλου, κρύβει την πραγματική απόδοση του DSR με αποτέλεσμα την τεχνητή μείωση της καθυστέρησης παράδοσης των πακέτων, χωρίς να βελτιώνεται η πραγματική απόδοση του πρωτοκόλλου. Η NIST είχε σα στόχο την αξιολόγηση της πραγματικής απόδοσης του DSR, με αποτέλεσμα να μη συμπεριληφθεί ο μηχανισμός αυτός στο μοντέλο.

Τέλος, μια άλλη επιλογή της υλοποίησης είναι ο αποκλεισμός της αποστολής πακέτων δεδομένων, έως ότου ο κόμβος προέλευσης του αιτήματος παραλάβει μια απάντηση για την προς αναζήτηση διαδρομή δρομολόγησης. Στις προδιαγραφές όμως περιγράφεται ότι οι κόμβοι μπορούν να στείλουν πακέτα δεδομένων αμέσως μόλις μπορέσουν να συλλέξουν τα απαραίτητα στοιχεία δρομολόγησης από τις πληροφορίες που περιέχονται σε πακέτα, τα οποία δεν προορίζονται για αυτούς, αλλά είναι στην εμβέλειά τους και τα λαμβάνουν ακόμα και στην περίπτωση που δεν γνωρίζουν πόσο έγκυρες είναι αυτές οι πληροφορίες ή έχουν ήδη αποστείλει στους κόμβους του δικτύου αίτημα για την εύρεση μιας διαδρομής. Εντούτοις, δεδομένου ότι δεν έχει υλοποιηθεί εξ ολοκλήρου ο μηχανισμός promiscuous mode, πιστεύουμε ότι η υλοποίηση αυτών των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών δεν θα είχε επιπτώσεις στην απόδοση του πρωτοκόλλου.

#### *6.2.2.1.1.3. Μηχανισμοί συντήρησης διαδρομών*

- Μηχανισμός επιβεβαιώσεων

Στο μοντέλο του DSR στο OPNET χρησιμοποιείται το πρότυπο της IEEE 802.11 MAC στο επίπεδο συνδέσεων. Οι μηχανισμοί μηνυμάτων επιβεβαίωσης και λαθών παρέχονται από αυτό το επίπεδο στο πρωτόκολλο δρομολόγησης. Στην παρούσα υλοποίηση το πρωτόκολλο δρομολόγησης έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίσει ότι η επιβεβαίωση για ένα πακέτο δεδομένων που μεταδόθηκε δεν έχει παραληφθεί, αλλά δεν μπορεί να μεταδώσει το ίδιο πακέτο επιβεβαίωσης, αν και αυτό έχει προβλεφθεί και υλοποιηθεί εν μέρει. Αυτός ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται από το μοντέλο, εξασφαλίζει ότι το στρώμα συνδέσεων του πρωτοκόλλου 802.11 λειτουργεί σωστά, δηλαδή στέλνει για κάθε πακέτο που μεταδίδεται είτε μια επιβεβαίωση, είτε ένα μήνυμα λάθους στη μετάδοση.

- Ο μηχανισμός promiscuous mode

Η πρώτη εφαρμογή του promiscuous τρόπου στο μηχανισμό συντήρησης διαδρομών είναι η ενημέρωση της «Route Cache» του κόμβου με πληροφορίες δρομολόγησης που μπορεί να αποσπάσει από οποιοδήποτε πακέτο μπορεί να παραλάβει, είτε προορίζεται για το συγκεκριμένο κόμβο, είτε όχι. Παραδειγματος χάριν, όταν ένας κόμβος παραλαμβάνει ένα μήνυμα λάθους διαδρομών για μια κομμένη σύνδεση, αφαιρεί όλες τις αποθηκευμένες διαδρομές που περιέχουν τη σύνδεση αυτή, είτε ο κόμβος αυτός είναι ο προορισμός της διαδρομής, είτε όχι. Επιπλέον ένας κόμβος πρέπει να ενημερώσει την «Route Cache» με τη χρησιμοποίηση πληροφοριών δρομολόγησης που περιέχονται σε οποιοδήποτε πακέτο είναι σε θέση να «αρυφακούσει». Οι μηχανισμοί αυτοί δεν εφαρμόστηκαν στη συγκεκριμένη υλοποίηση.

Μια άλλη εφαρμογή του promiscuous mode λειτουργίας αφορά το μηχανισμό συντήρησης διαδρομών, ο οποίος χρησιμοποιεί τη λειτουργία αυτή, προκειμένου να ανακαλύπτει τρόπους μείωσης του μήκους των διαδρομών. Οι κόμβοι, με τις πληροφορίες δρομολόγησης που εξάγουν από τα πακέτα, τα οποία λαμβάνουν όταν είναι promiscuous mode, ελέγχουν αν κάποιος από τους ενδιαμέσους σταθμούς σε μία διαδρομή είναι περιττός και τον αποβάλλουν από την εν λόγω διαδρομή, ενημερώνοντας επίσης και τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου για αυτή την αλλαγή με σχετικό μήνυμα. Αυτός ο μηχανισμός δεν υλοποιήθηκε στο πρωτόκολλο, αλλά μια παραλλαγή αυτού βοήθησε στην μείωση του μήκους των διαδρομών.

#### 6.2.2.1.1.4. Στρατηγικές «Route Caching»

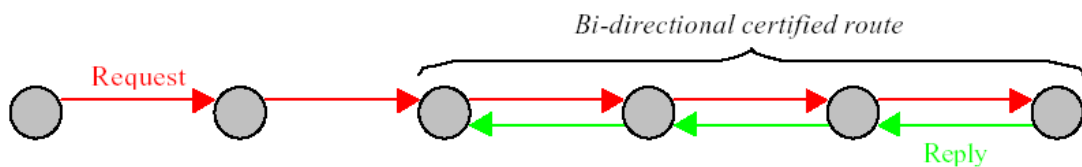
Στο μοντέλο του πρωτοκόλλου που περιγράφουμε, η «Route Cache» του κάθε κόμβου περιέχει μόνο μια διαδρομή για κάθε προορισμό. Η επιλογή αυτή έγινε λόγω της σχεδίασης και ανάπτυξης του πρωτοκόλλου με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της απόδοσης του βασικού μηχανισμού του DSR και όχι των διαφορετικών στρατηγιών και υλοποιήσεων που μπορούν να εφαρμοστούν στην αποθήκευση πληροφοριών δρομολόγησης σε κάθε κόμβο.

Στην παρούσα υλοποίηση το πρωτόκολλο δεν συλλέγει δεδομένα για τις διαδρομές, όπως είναι η ενέργεια που θα ξοδέψουν οι κόμβοι με την επιλογή μίας διαδρομής, η επίδραση που θα είχε αυτό στο όγκο των δεδομένων που διακινούνται στο δίκτυο και

άλλων. Συλλέγει μετρήσεις που αφορούν μόνο στο μήκος κάθε διαδρομής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή στην παρούσα φάση η μελέτη γύρω από την αποθήκευση διαδρομών στους κόμβους, με την επιλογή της καλύτερης διαδρομής σε συνδυασμό με μια σειρά παραμέτρων. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση θεωρούμε ότι η καλύτερη διαδρομή είναι αυτή που είναι και πιο μικρή.

#### 6.2.2.2.1.1.5. Αμφίδρομες συνδέσεις

Οι συνδέσεις του μοντέλου που περιγράφουμε στο OPNET, λόγω της χρήσης του 802.11 MAC επιπέδου, είναι αμφίδρομες. Αυτό δε μας δίνει τη δυνατότητα να μελετήσουμε την απόδοση του πρωτοκόλλου, το οποίο σχεδιάστηκε να λειτουργεί και κάτω από μη αμφίδρομες συνδέσεις. Εφόσον οι συνδέσεις είναι αμφίδρομες, ένας κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο «Route Reply», μπορεί να ενημερώσει τη «Route Cache» του με το τμήμα της διαδρομής μεταξύ αυτού και του κόμβου προέλευσης του μηνύματος της απάντησης, όταν αυτό χαρακτηρίζεται ως αμφίδρομο. Στην παρακάτω εικόνα περιγράφουμε ένα τέτοιο παράδειγμα ύπαρξης αμφίδρομων συνδέσεων:



Εικόνα 11: Αποθήκευση αμφίδρομων διαδρομών στην Route Cache

Ο λόγος για τη χρησιμοποίηση μόνο αυτού του τμήματος της διαδρομής και την αποθήκευση του στην «Route Cache» είναι ότι, τις περισσότερες φορές, τα πακέτα αναζήτησης διαδρομών δεν ακολουθούν τη βέλτιστη πορεία προς τον κόμβο προορισμού, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου και γι αυτό δεν προτιμάμε να τις αποθηκεύουμε.

#### 6.2.2.2.2. Μηχανισμοί που δεν έχουν υλοποιηθεί στο συγκεκριμένο μοντέλο

##### 6.2.2.2.2.1.1. Επίπεδο IP

Δεν έχει υλοποιηθεί ο μηχανισμός IP στο συγκεκριμένο μοντέλο δικτύου με προφανή λόγο να αξιολογηθεί αποκλειστικά ο αλγόριθμος και ο μηχανισμός λειτουργίας του DSR και όχι η εφαρμογή του επιπέδου IP σε αυτόν. Στην πραγματικότητα αυτό έχει

σαν αποτέλεσμα την αδυναμία αξιολόγησης του DSR, κάτω από τη λειτουργία μιας πραγματικής εφαρμογής σε ένα ad-hoc δίκτυο.

#### *6.2.2.2.1.2. Λειτουργία piggybacking στα μηνύματα ελέγχου*

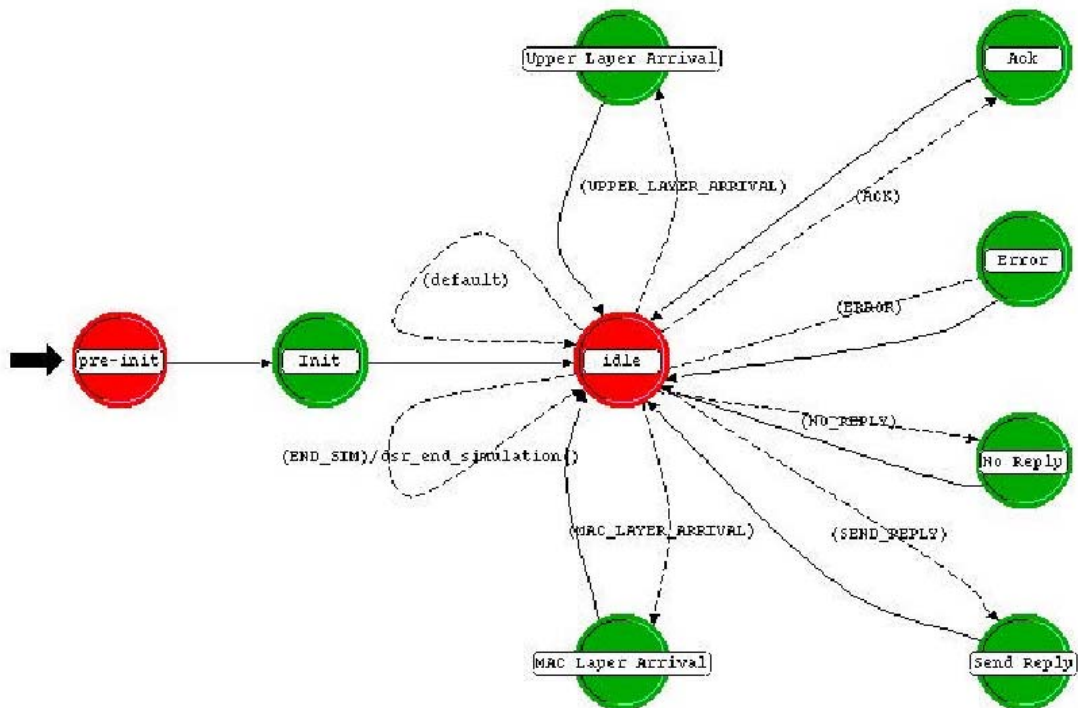
Το πρότυπο δεν υλοποιεί κάποιο piggybacking μηχανισμό. Η επιλογή έγινε γιατί το πρωτόκολλο του DSR λειτουργεί επάνω από το IEEE 802.11 MAC επίπεδο, με αποτέλεσμα όλες οι συνδέσεις να είναι αμφίδρομες, Ο κύριος λόγος χρήσης του μηχανισμού piggybacking είναι να επιτρέψει την ύπαρξη μη αμφίδρομων συνδέσεων, κάτι που όμως, ούτως ή άλλως, δεν συμβαίνει.

#### *6.2.2.2.1.3. Διάσωση πακέτων δεδομένων*

Ο μηχανισμός διάσωσης δεν έχει ενσωματωθεί στην τρέχουσα υλοποίηση του μοντέλου.

#### *6.2.2.2.3. Η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων της διαδικασίας δρομολόγησης DSR.*

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων που περιγράφει τον αλγόριθμο δυναμικής δρομολόγησης πηγής, όπως έχει υλοποιηθεί στο OPNET. Μπορούμε να δούμε τις διάφορες καταστάσεις καθώς και τις συνθήκες μετάπτωσης από την μια κατάσταση στην άλλη.



Εικόνα 12: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων στο επίπεδο δρομολόγησης

**Pre-Init State:** Η κατάσταση αυτή χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση κάποιων παραμέτρων για τη λειτουργία του DSR, όπως η διεύθυνση που χρησιμοποιούν οι κόμβοι για τη δρομολόγηση των δεδομένων, καθώς και ο έλεγχος των αρχικών τιμών των παραμέτρων αυτών, όπως ο έλεγχος ότι η επιλεγμένη διεύθυνση δρομολόγησης είναι ισχύουσα μέσα στο υπόλοιπο δίκτυο.

**Init State:** Αυτή η κατάσταση αρχικοποιεί κάθε μεταβλητή που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του μοντέλου, τη συλλογή στατιστικών, τους πίνακες αποθήκευσης και τις παραμέτρους που τίθενται από τους χρήστες και οι οποίες χρησιμοποιούνται από το DSR.

**Idle State:** Αυτή είναι η κατάσταση στην οποία μεταπίπτει η διαδικασία περιμένοντας το επόμενο γεγονός να συμβεί για να συνεχίσει την εκτέλεση. Είναι κατάσταση αναμονής ενός γεγονότος.

**Upper Layer Arrival State:** Αυτή η κατάσταση χειρίζεται κάθε πακέτο που παράγεται από τα ανώτερα στρώματα του δικτύου και το οποίο πρέπει να αναλάβει το πρωτόκολλο DSR να δρομολογήσει προς τον προορισμό του.

**MAC Layer Arrival State:** Αυτή η κατάσταση διαχειρίζεται κάθε πακέτο που παραλαμβάνεται από το επίπεδο συνδέσεων του 802.11 και το επεξεργάζεται ανάλογα με τον τύπο του: πακέτο αιτήματος νέας διαδρομής, πακέτο απάντησης για μια διαδρομή, πακέτο στοιχείων ή πακέτο λάθους.

**Send Reply:** Αυτή η κατάσταση ενεργοποιείται, όταν ένας κόμβος στέλνει μια προγραμματισμένη από επαναμετάδοση απάντηση και απλά αναλαμβάνει να μεταδώσει το πακέτο που περιέχει την απάντηση.

**No Reply:** Αυτή η κατάσταση ενεργοποιείται, όταν ο χρόνος αναμονής, για την παραλαβή μιας απάντησης στην αποστολή μιας αίτησης εύρεσης μιας διαδρομής, ολοκληρωθεί. Η ενεργοποίηση της κατάστασης αυτής αυτόματα σημαίνει ότι ένα αίτημα για εύρεση μιας διαδρομής απέτυχε και ένα νέο αίτημα πρέπει να ειδοθεί από τον κόμβο που επιθυμεί να ανακαλύψει αυτή τη διαδρομή.

**Ack State:** Αυτή η κατάσταση διαχειρίζεται κάθε αναγνώριση που προέρχεται από το στρώμα συνδέσεων του 802.11, κάθε μήνυμα επιβεβαίωσης που λαμβάνεται, βεβαιώνει ότι η σύνδεση, που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει ένας κόμβος για τη μετάδοση ενός πακέτου, είναι έγκυρη, επιτρέποντας στον κόμβο να αποστείλει και άλλα πακέτα δεδομένων μέσω αυτής. Συγχρόνως, φροντίζει για τον έλεγχο και τη σωστή λειτουργία του μηχανισμού αναγνώρισης λαθών του πρωτοκόλλου DSR, όταν κάποια επιβεβαίωση έχει παραληφθεί ή εάν το επίπεδο MAC λειτουργεί ικανοποιητικά.

**Error State:** Αυτή η κατάσταση ενεργοποιείται, όταν ανιχνεύεται ένα λάθος από το πρωτόκολλο του DSR είτε το 802.11 MAC επίπεδο. Η σύνδεση, που δημιούργησε το λάθος αυτό, χαρακτηρίζεται «σπασμένη (broken)», με συνέπεια την ενημέρωση της «Route Cache» και τη μετάδοση πακέτων λάθους.

Στο επίπεδο αυτό μπορούμε να αναγνωρίσουμε πότε, σε μία συγκεκριμένη διαδρομή, αναφέρθηκε ένα λάθος στον κόμβο προορισμού. Σε επόμενη παράγραφο θα



περιγράψουμε πώς, με τον τρόπο αυτό, προσπαθήσαμε να μελετήσουμε το χρόνο ζωής μίας διαδρομής σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο.

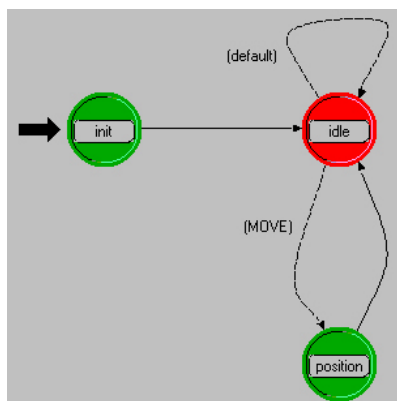
### **6.3. Μοντέλα κινητικότητας**

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε στα βασικά χαρακτηριστικά και στην υλοποίηση στο OPNET των μοντέλων κίνησης των κόμβων του δικτύου. Στην παρούσα υλοποίηση υποστηρίζονται δύο πρότυπα κίνησης.

#### **6.3.1. Billiard Mobility Model**

Το πρώτο ονομάζεται billiard mobility model μοντέλο και μιμείται την τροχιά που ακολουθούν οι μπάλες πάνω σε ένα τραπέζι μπιλιάρδου. Κάθε κόμβος επιλέγει μια τυχαία κατεύθυνση, που ακολουθεί με μια σταθερή ταχύτητα, έως ότου φθάσει στα όρια του δικτύου, όπου επιλέγει μια νέα τυχαία κατεύθυνση για να συνεχίσει να κινείται προς αυτή.

Η υλοποίησή του στο OPNET, όπως βλέπουμε και στην παρακάτω διαδικασία, χρησιμοποιεί ένα διάγραμμα καταστάσεων με τρεις καταστάσεις. Στην κατάσταση «Init», που είναι και η αρχική κατάσταση, αρχικοποιούνται οι παράμετροι του πρωτοκόλλου με τις τιμές που έχουμε ορίσει κατά την εκτέλεση της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Στην κατάσταση «idle» το μοντέλο βρίσκεται έως ότου έρθει ένα σχετικό γεγονός (event), συγκεκριμένα το MOVE, που ενεργοποιεί την τρίτη κατάσταση του μοντέλου. Στην κατάσταση «position» το μοντέλο βάσει της τυχαίας διεύθυνσης που έχει υπολογιστεί και της ταχύτητας που έχει τεθεί από τον χρήστη, ορίζει το επόμενο σημείο στο οποίο πρέπει να μετακινηθεί ο κόμβος και τον μετακινεί. Σε περίπτωση που ο κόμβος προσεγγίσει τα όρια του δικτύου, το μοντέλο φροντίζει να υπολογίσει μία νέα πορεία για να ακολουθήσουν οι κόμβοι.

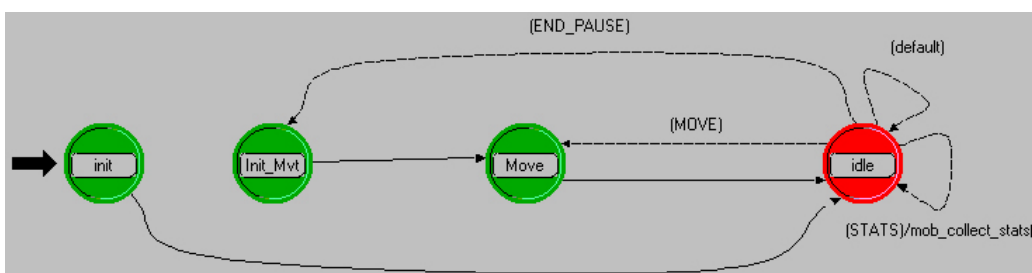


Εικόνα 13: Billiard mobility model

Οι παράμετροι που μπορεί να θέσει ο χρήστης κατά την έναρξη της προσομοίωσης αφορούν το χρονικό διάστημα μετά το πέρας του οποίου μπορούν οι κόμβοι να κινηθούν, την απόσταση που μπορούν να καλύψουν κάθε φορά που κινούνται και τα όρια μέσα στα οποία μπορούν να κινηθούν. Το μοντέλο υπολογίζει τη σταθερή ταχύτητα που κινούνται οι κόμβοι χρησιμοποιώντας μία κανονική κατανομή. Η ταχύτητα υπολογίζεται με τυχαίο τρόπο, κάθε φορά που ένας κόμβος πρέπει να κινηθεί.

### 6.3.2. Waypoint Mobility Model

Το δεύτερο μοντέλο κίνησης ονομάζεται waypoint mobility model και σε αυτό κάθε κόμβος υπολογίζει ένα τυχαίο σημείο προορισμού στο δίκτυο, κινείται προς εκείνο το σημείο με μια σταθερή ταχύτητα και μόλις το προσεγγίσει, ο κόμβος σταματά για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, υπολογίζει έπειτα ένα νέο προορισμό και συνεχίζει να κινείται.



Εικόνα 14: Waypoint mobility model

Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελείται από τέσσερις καταστάσεις, την «Init» στην πρώτη αρχικοποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου από τα στοιχεία που έχει δώσει ο

χρήστης κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Στην «idle» κατάσταση βρίσκεται το μοντέλο κατά τη διάρκεια αναμονής του κάθε κόμβου να κινηθεί. Όταν στο μοντέλο σταλεί ένα μήνυμα «END\_PAUSE», αυτό μεταπίπτει στην κατάσταση «Init\_Mov», όπου αρχικοποιούνται οι παράμετροι -όπως η ταχύτητα, η διεύθυνση, ο επόμενος προορισμός- που αφορούν την κίνηση του κόμβου. Στη συνέχεια ο κόμβος μεταπίπτει στην κατάσταση «Move», όπου εκτελεί την κίνηση του και κατόπιν παραμένει στάσιμος για το διάστημα που έχει ορίσει ο χρήστης κατά την έναρξη της προσομοίωσης, μεταπίπτοντας στην κατάσταση «idle». Με την έλευση κάθε γεγονότος «MOVE» ο κόμβος πηγαίνει στην κατάσταση «Move», και αφού ολοκληρωθεί η κίνησή του μεταπίπτει στην κατάσταση «idle» και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

Οι παράμετροι του μοντέλου αυτού, που ο χρήστης έχει την δυνατότητα να θέσει στην έναρξη της προσομοίωσης, είναι η ενεργοποίηση του μοντέλου κίνησης σε έναν κόμβο, το βήμα μετακίνησης του κόμβου, ο χρόνος αναμονής μετά από κάθε μετακίνηση του κόμβου, το πάνω όριο στην ταχύτητα που επιλέγει από μία τυχαία κανονική κατανομή το μοντέλο κίνησης και τέλος τα όρια μέσα στα οποία μπορούν οι κόμβοι να κινούνται.

#### **6.4. Περιγραφή του περιβάλλοντος προσομοίωσης και πειραμάτων**

Στις προηγούμενες παραγράφους περιγράψαμε το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε για την εκτέλεση των πειραμάτων και την υλοποίηση του μοντέλου του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης πηγής στο OPNET. Στην παρούσα παράγραφο θα περιγράψουμε το περιβάλλον εκτέλεσης των πειραμάτων και συγκεκριμένα τα διάφορα σενάρια που χρησιμοποιήσαμε για να εκτελέσουμε τα πειράματα στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

##### **6.4.1. Σεναρίων μοντέλου προσομοίωσης**

Είχαμε διάφορα σενάρια λειτουργίας του δικτύου, ανάλογα με το μοντέλο κινητικότητας, που χρησιμοποιούσαν οι κόμβοι και τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια που χρησιμοποιήσαμε στην εκτέλεση των πειραμάτων.

ΣενΑρία	Μέγεθος δικτύου	Αριθμός κόμβων	Μοντέλα κινητικότητας
Σενάριο Α	500m x 500m	16 κόμβοι	Billiard Model
Σενάριο Β	300m x 1500m	16 κόμβοι	Waypoint Model
Σενάριο Γ	500m x 500m	20 κόμβοι	Billiard Model
Σενάριο Δ	300m x 1500m	20 κόμβοι	Waypoint Model
Σενάριο Ε	500m x 500m	30 κόμβοι	Billiard Model
Σενάριο ΣΤ	300m x 1500m	30 κόμβοι	Waypoint Model

Πίνακας 1: Σενάρια εκτέλεσης των πειραμάτων του DSR στο OPNET

Στα σενάρια αυτά, όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, χρησιμοποιήσαμε διαφορετικό αριθμό κόμβων με προφανή λόγο να δούμε τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου και της Route Cache σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Επίσης, χρησιμοποιήσαμε διαφορετικό μοντέλο κίνησης για κάθε σενάριο και συγκεκριμένα τα Waypoint Model και Billiard Model, τα οποία περιγράψαμε παραπάνω. Τέλος, το μέγεθος του δικτύου, μέσα στο οποίο οι κόμβοι μπορούσαν να κινηθούν, ήταν διαφορετικό. Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύουμε τους βασικούς παράγοντες προσομοίωσης.

## 6.5. Παράμετροι προσομοίωσης

Για τα παραπάνω σενάρια, ανάλογα με το μοντέλο κίνησης που χρησιμοποιούνταν ανά περίπτωση, μπορούσαμε να θέσουμε διάφορες παραμέτρους. Η προσέγγιση που ακολουθήσαμε ήταν η εκτέλεση πολλών πειραμάτων με διαφορετικές κάθε φορά τιμές στις παραμέτρους της προσομοίωσης. Παρακάτω παραθέτουμε τις παραμέτρους προσομοίωσης που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του μοντέλου δυναμικής δρομολόγησης για τα διάφορα σενάρια εκτέλεσης των πειραμάτων που εκτελέσαμε με σκοπό τη συλλογή των αποτελεσμάτων. Από τα παρακάτω είναι φανερό ότι οι κρίσιμοι παράμετροι ήταν αυτοί αναφορικά με το μοντέλο κίνησης των κόμβων

### **6.5.1. Μέγεθος του δικτύου**

Σε αυτή την κατηγορία θεωρούμε ότι συγκαταλέγονται οι παράμετροι που αφορούν τον αριθμό των κόμβων στο δίκτυο καθώς και το μέγεθος της περιοχής στην οποία μπορούν να κινούνται οι κόμβοι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Για τον αριθμό των κόμβων επιλέξαμε να πειραματιστούμε με ad-hoc δίκτυα που περιείχαν δεκαέξι (16), είκοσι (20) και τριάντα (30) κόμβους. Ο αριθμός των κόμβων για τη μελέτη χρήσης της Route Cache από τους κόμβους κρίθηκε αρκετά ικανοποιητικός. Το συγκεκριμένο μέγεθος μας επέτρεψε να μελετήσουμε φαινόμενα που σχετίζονται με τον βαθμό συνδεσιμότητας των κόμβων. Γενικά, μικρός αριθμός κόμβων στο δίκτυο σημαίνει μικρότερος αριθμός γειτόνων για την αποστολή ενός μηνύματος ελέγχου του πρωτοκόλλου δρομολόγησης και μικρότερη πιθανότητα συγκρούσεων στο ασύρματο κανάλι. Από την άλλη περισσότεροι κόμβοι συνεπάγονται περισσότερους γείτονες, άρα και περισσότερες επιλογές στη δρομολόγηση των δεδομένων. Το αρνητικό σε αυτή την περίπτωση είναι ο χρόνος καθυστέρησης ολοκλήρωσης κάθε ξεχωριστού αιτήματος δρομολόγησης. Για την καλύτερη μελέτη αυτών των παραμέτρων αποφασίσαμε να εκτελέσουμε όλα τα πειράματα για κάθε επιλεγμένο αριθμό κόμβων και, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, καταφέραμε να δείξουμε ότι τα αποτελέσματα, με την αποδοτικότερη χρήση της Route Cache, ισχύουν, ανεξαρτήτως του αριθμού των κόμβων στο δίκτυο.

Το μέγεθος του δικτύου, όπως αναφέρεται και σε προηγούμενο πίνακα, ήταν ίδιο για κάθε διαφορετικό σενάριο, ακόμα και αν άλλαζαν οι υπόλοιπες παράμετροι προσομοίωσης με προφανή λόγο τη μελέτη της συμπεριφοράς του πρωτοκόλλου κρατώντας σταθερή αυτή την παράμετρο.

### **6.5.2. Κινητικότητα (mobility) των κόμβων**

Σε προηγούμενη παράγραφο περιγράψαμε τα μοντέλα κινητικότητας που υποστηρίζονται από το υλοποιημένο μοντέλο του DSR στο OPNET. Στο σημείο αυτό θα μιλήσουμε και θα αναλύσουμε τις παραμέτρους που μπορούμε να θέσουμε κατά την έναρξη της προσομοίωσης και αφορούν στα δύο μοντέλα κινητικότητας των κόμβων.

#### 6.5.2.1. Παράμετροι μοντέλου *Billiard*

Στο μοντέλο αυτό οι κόμβοι κινούνται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, προς μία τυχαία κατεύθυνση με τυχαία, αλλά σταθερή ταχύτητα. Οι κόμβοι διαγράφουν απόσταση που ορίζεται από το χρήστη και στη συνέχεια παραμένουν ακίνητοι για ένα χρονικό διάστημα που επίσης ορίζει ο χρήστης στην αρχή της προσομοίωσης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο οι κόμβοι επιλέγουν μια κατεύθυνση την οποία ακολουθούν ωστόσο φτάνουν στα όρια του δικτύου, όπου εκεί επιλέγουν μία νέα κατεύθυνση και συνεχίζουν την κίνηση τους.

Το μοντέλο αυτό, στην υλοποίησή του στο OPNET, περιγράφεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- *mobil\_POS\_TIMER* : Περιγράφει το χρόνο αναμονής των κόμβων σε κάθε θέση που βρίσκονται μετά από την ολοκλήρωση της κίνησής τους για το διάστημα που έχει οριστεί από την αρχή της προσομοίωσης
- *STEP\_DIST*: Περιγράφει το διάστημα το οποίο έχουν δικαίωμα κάθε φορά να προχωρήσουν οι κόμβοι προς την επιλεγμένη κατεύθυνση.

#### 6.5.2.2. Παράμετροι μοντέλου *Waypoint*

Στο μοντέλο αυτό οι κόμβοι κινούνται προς μία τυχαία κατεύθυνση για ένα συγκεκριμένο διάστημα με ταχύτητα που επιλέγεται τυχαία κάθε φορά από μία κατανομή. Η ταχύτητα των κόμβων προκύπτει από μία κατανομή και περιορίζεται από μία μέγιστη τιμή -σε μία εξελιγμένη μορφή του πρωτοκόλλου περιορίζεται και από μία ελάχιστη. Οι κόμβοι μετά το πέρας της κίνησής τους είναι αναγκασμένοι να παραμείνουν ακίνητοι για ένα συγκεκριμένο, ίδιο για όλους, χρονικό διάστημα και στη συνέχεια επιλέγουν μία νέα κατεύθυνση και ταχύτητα για να κινηθούν ξανά. Το διάστημα που προχωρούν οι κόμβοι κάθε φορά, η μέγιστη τιμή της ταχύτητας, καθώς και το χρονικό διάστημα που μένουν ακίνητοι, ορίζονται από το χρήστη.

Το μοντέλο αυτό, στην υλοποίηση στο OPNET, περιγράφεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- *Mobility*: Μία παράμετρος που ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί την κινητικότητα των κόμβων.

- MVT\_STEP: Το διάστημα που κινούνται κάθε φορά οι κόμβοι
- PAUSE\_TIME: Ο χρόνος αναμονής σε κάθε θέση που βρίσκονται οι κόμβοι μετά την ολοκλήρωση κάθε κίνησής τους.
- SPEED\_LIMIT: Το μέγιστο όριο της ταχύτητας από την τυχαία κατανομή που μπορούν να επιλέξουν οι κόμβοι.

## Κεφάλαιο 7

### ΜΕΘΟΔΟΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

#### 7. Μέθοδος, μελέτη και εξαγωγή συμπερασμάτων

##### 7.1. Σκοπός αυτής της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας, όπως περιγράψαμε σε προηγούμενα κεφάλαια, είναι να μελετήσουμε τα υπάρχοντα σημαντικότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα κινητών κόμβων και τις λειτουργίες δρομολόγησης του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης DSR και να εφαρμόσουμε μεθόδους αποδοτικότερης χρήσης της Route Cache στο μοντέλο του πρωτοκόλλου DSR που έχει υλοποιηθεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων OPNET. Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε τον τρόπο λειτουργίας της Route Cache του πρωτοκόλλου DSR, τους μηχανισμούς βελτίωσης της χρήσης της και τα αποτελέσματα που προέκυψαν στη συνολική απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης.

##### 7.2. Μέθοδος

###### 7.2.1. Εκτιμώμενος χρόνος ζωής διαδρομών (Μαθηματική ανάλυση)

Σε προηγούμενη παράγραφο περιγράψαμε την εργασία [Liang 2003] όπου παρουσιάζεται ένα αναλυτικό μαθηματικό πλαίσιο για τον προσδιορισμό του αναμενόμενου χρόνου ζωής των διαδρομών δρομολόγησης, σε ένα κόμβο πηγής που έχει μια αποθηκευμένη διαδρομή προς οποιονδήποτε προορισμό. Οι συγγραφείς στην εργασία αυτή προτείνουν αριθμητικές μεθόδους που καθορίζουν το χρόνο ζωής για οποιοσδήποτε διαδρομές. Βάσει των μεθόδων, προσδιορίζουν τη βέλτιστη τιμή του TTL για μία πρόσφατα αποθηκευμένη διαδρομή. Η προσέγγιση αυτή περιγράφει ότι για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου ύπαρξης άκυρων διαδρομών σε μια Cache, ορίζουμε μια παράμετρο που αντιστοιχεί σε κάθε ξεχωριστή διαδρομή και συνεπώς καταχώρηση στον πίνακα δρομολόγησης προς έναν προορισμό, που περιγράφει το χρόνο ζωής μιας διαδρομής. Μετά την πάροδο της χρονικής αυτής διάρκειας η εν λόγω διαδρομή θεωρείται άκυρη και επιτρέπεται η διαγραφή της από τους πίνακες δρομολόγησης, αφού έχει «λήξει» ο χρόνος ζωής της και δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί πλέον από τους κόμβους του δικτύου.



Στην παρούσα εργασία, η αναμενόμενη καθυστέρηση δρομολόγησης, δίνεται από τον

$$\text{τύπο, } C(T) = 2LD - 2L \int_0^T \left[ 2Dq^D(\tau) - \frac{q^D(\tau) - 1}{q(\tau) - 1} \right] f_\alpha(\tau) d\tau, \quad \text{βλέπε}$$

παράγραφο (5.3.1.2.2).

Εφόσον η  $q(\tau)$  είναι μία φθίνουσα συνάρτηση του  $\tau$  και  $0 \leq q(\tau) < 1$ , είναι πολύ εύκολη η επιβεβαίωση ότι η  $C(T)$  είναι μία κυρτή συνάρτηση του  $T$  και δεδομένου ότι ισχύει η

$$\text{σχέση } g(q(T)) = 2Dq^d(T) - \frac{q^d(T) - 1}{q(T) - 1}, \text{ το ελάχιστο } C(T) \text{ δίδεται για το } T_{\text{opt}} \text{ όπου}$$

$g[q(T_{\text{opt}})] = 0$ , δηλαδή το  $q(T_{\text{opt}})$  είναι ρίζα στο  $[0,1)$  της συνάρτησης με μορφή

$$g(x) = 2D^d x - \frac{x^d - 1}{x - 1}.$$

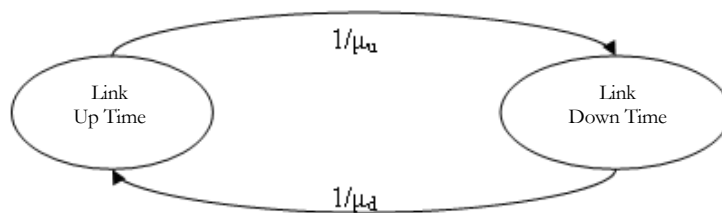
Για την εύρεση των ριζών της παραπάνω συνάρτησης για οποιεσδήποτε τιμές του  $D$ , χρησιμοποιήθηκε μία μέθοδος εύρεσης ριζών. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και αυτά που στη συγκεκριμένη εργασία περιγράφουν οι συγγραφείς, τέτοιες κατάλληλες μέθοδοι είναι η μέθοδος του Newton ή η μέθοδος του bisection. Εμείς υλοποιήσαμε και τις δύο μεθόδους στο MATLAB και τις χρησιμοποιήσαμε για την εύρεση των ριζών της συνάρτησης αυτής. Ο κώδικας της υλοποίησης που τελικά χρησιμοποιήσαμε παρατίθεται στο παράρτημα Α και βασίστηκε σε παρόμοιες υλοποιήσεις που έχουν γίνει στο εργαλείο αυτό για τον προσδιορισμό των ριζών πολυωνύμων μεγάλης τάξης σε συγκεκριμένο διάστημα.

Μετά από τον προσδιορισμό των ριζών του παραπάνω πολυωνύμου για τις διάφορες τιμές του  $D$  (το  $D$  περιγράφει τον αριθμό των συνδέσεων από τις οποίες αποτελείται μία διαδρομή) μπορούμε να προσδιορίσουμε την αριθμητική βέλτιστη τιμή του  $q(T)$ . Στη συνέχεια, μπορούμε να βρούμε τη βέλτιστη τιμή του TTL (Time-to-Live) αντιστρέφοντας τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του εναπομείναντος χρόνου ζωής μίας διαδρομής.

Από την ανάλυση που έχει γίνει και σε αυτή την εργασία, παράγραφος 5, αλλά και την ανάλυση στην εργασία [Liang 2003] καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος ζωής δεν εξαρτάται από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, του χρόνου αναμονής εξυπηρέτησης ενός αιτήματος για μία διαδρομή ( $f_a(t)$ ). Το συμπέρασμα αυτό μας

οδηγεί στη διαπίστωση ότι ο βέλτιστος χρόνος ζωής μιας διαδρομής εξαρτάται από την πιθανότητα μία σύνδεση σε μία διαδρομή να είναι ενεργή μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, δηλαδή από το χρόνο που συγκεκριμένες συνδέσεις, μέρος μιας διαδρομής, είναι ενεργές. Αυτά μας επιτρέπουν να μπορούμε να υπολογίσουμε σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας τους παραπάνω τύπους, τη βέλτιστη εκτίμηση για το χρόνο ζωής μιας διαδρομής, ξεχωριστά σε κάθε κόμβο του ad-hoc δικτύου απλά γνωρίζοντας το μήκος της διαδρομής. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώθηκε και από τα πειραματικά αποτελέσματα που θα περιγράψουμε στην επόμενη παράγραφο.

Στη συγκεκριμένη εργασία υποθέσαμε ότι μία σύνδεση παραμένει ενεργή για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα. Κατά το χρονικό αυτό διάστημα είναι δυνατή η χρησιμοποίηση της σύνδεσης αυτής για τη μεταφορά δεδομένων. Το διάστημα αυτό δεν εξαρτάται από τις προηγούμενες καταστάσεις των συνδέσεων και γι αυτό μπορεί να περιγραφεί από μία εκθετική κατανομή με μέση τιμή  $\mu_u = 1/\lambda_u$ . Το χρονικό αυτό διάστημα περιγράφει την κατάσταση των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων του ad-hoc δικτύου και ακολουθεί το παρακάτω μοντέλο.

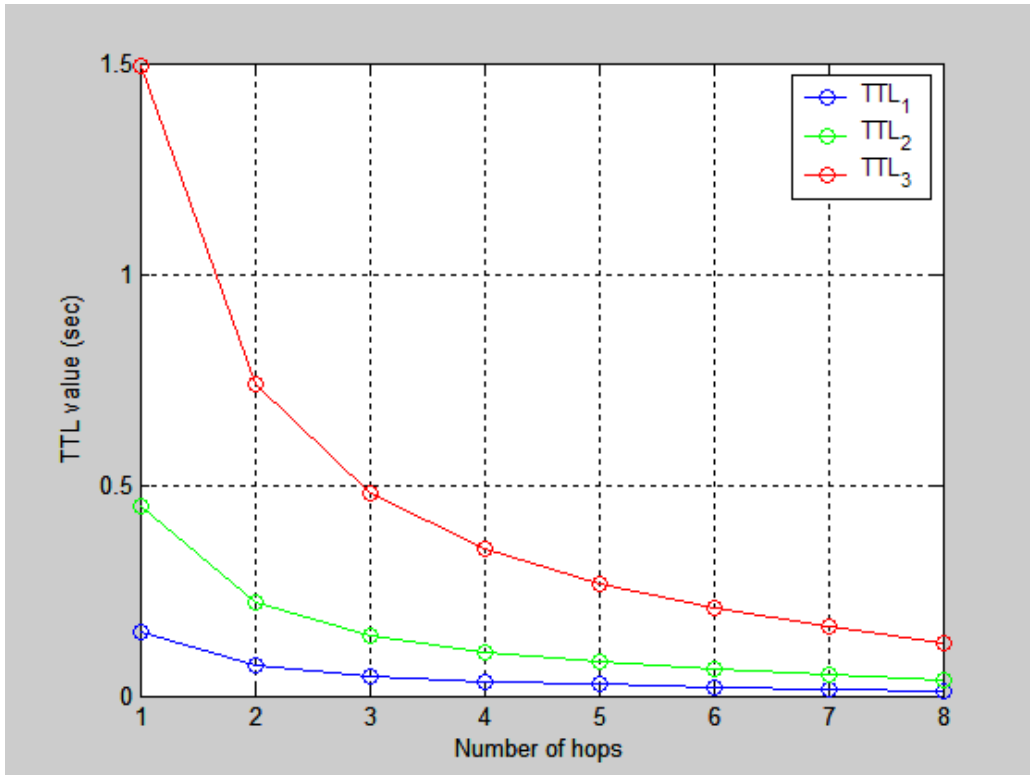


Εικόνα 15: Μοντέλο συνεχούς χρόνου κατάστασης συνδέσεων

Η βέλτιστη τιμή TTL ( $T_{opt}$ ) πρέπει να ικανοποιεί την σχέση  $q(T_{opt}) = 1 - [1 - e^{-\lambda_u T_{opt}}]$  και στην περίπτωση αυτή για να την υπολογίσουμε θα χρησιμοποιήσουμε την  $T_{opt} = -\frac{1}{\lambda_u} \log(q_{opt})$ , όπου το  $q_{opt}$  είναι η ρίζα της  $g(x)$ , βλέπε πιο πάνω, στο διάστημα  $[0,1)$ .

#### 7.2.1.1. Αποτελέσματα ανάλυσης

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των παραπάνω σχέσεων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 16: Τιμές Time-To-Live από την ανάλυση

Στο παραπάνω γράφημα περιέχονται τρεις καμπύλες, οι οποίες αναπαριστούν το χρόνο ζωής διαδρομών διαφορετικού μήκους για διάφορες τιμές της μέσης τιμής της παραπάνω σχέσης  $\mu_u = -1/\lambda_u$ . Συγκεκριμένα για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα τα διὰ μας με αυτά που παρουσιάζονται στη σχετική εργασία [Liang 2003] χρησιμοποιήσαμε τις ίδιες τιμές για τη μέση τιμή. Οι τιμές αυτές είναι [0,1 0,3 ] αντίστοιχα για τις τρεις καμπύλες [ $TTL_1$ ,  $TTL_2$ ,  $TTL_3$ ].

#### 7.2.1.2. Συμπεράσματα

Από το σχήμα αυτό μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής μίας διαδρομής εξαρτάται από:
  - το μήκος της κάθε διαδρομής
  - τα χρονικά διαστήματα που παραμένουν ενεργές οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων

- Ο χρόνος ζωής μιας διαδρομής είναι μεγαλύτερος για μικρότερες διαδρομές οι οποίες εκτιμούμε ότι γενικά θα είναι ενεργές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στο δίκτυο και μικρότερος για μεγάλες σε μήκος διαδρομές.
- Ο χρόνος ζωής εξαρτάται από τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πάνω από μία σύνδεση ανάμεσα σε δύο κόμβους.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του DSR στο OPNET σκοπός μας είναι να επιβεβαιώσουμε την ορθότητα των παραπάνω συμπερασμάτων. Για να το κάνουμε αυτό πρέπει να ορίσουμε το χρόνο ζωής των διαδρομών στο μοντέλο προσομοίωσης.

### ***7.2.2. Μελέτη του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης DSR***

Σε προηγούμενη παράγραφο περιγράψαμε αναλυτικά το πρωτόκολλο DSR, καθώς και την υλοποίηση αυτού στο OPNET. Στο μοντέλο αυτό έχουν υλοποιηθεί οι βασικότεροι μηχανισμοί που περιγράφονται από το σχετικό κείμενο προδιαγραφών. Έχουμε αναφέρει τους σημαντικότερους από αυτούς στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εργασίας αυτής. Παρακάτω περιγράφουμε τη μελέτη που κάναμε πάνω στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο όσον αφορά στο χρόνο ζωής των διαδρομών που ανακαλύπτονται από το πρωτόκολλο, χρησιμοποιώντας τα εργαλεία συλλογής στατιστικών και ανάλυσης αυτών που διαθέτει το OPNET.

### ***7.2.3. Μετάδοση πακέτων δεδομένων***

Στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο, όπως περιγράψαμε σε προηγούμενη παράγραφο, οι κόμβοι του δικτύου κάθε φορά που επιθυμούν να μεταδώσουν ένα πακέτο δεδομένων αναζητούν από το επίπεδο δρομολόγησης μιας διαδρομής προς τον προορισμό του πακέτου. Το επίπεδο δρομολόγησης αναλαμβάνει να εντοπίσει μία διαδρομή δρομολόγησης του πακέτου αυτού προς το συγκεκριμένο προορισμό. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να διαχωρίσουμε δύο περιπτώσεις.

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης αρχικά ελέγχει τη Route Cache του κόμβου εάν έχει καταχωρημένη μία διαδρομή προς το συγκεκριμένο προορισμό. Εάν μία τέτοια καταχώρηση υπάρχει, το πρωτόκολλο την ενσωματώνει στο πακέτο δρομολόγησης και προωθεί το πακέτο στον επόμενο ενδιάμεσο προορισμό του. Εάν μία τέτοια διαδρομή δε βρεθεί, το πρωτόκολλο καθυστερεί τη μετάδοση του πακέτου, ενεργοποιεί τη

διαδικασία εύρεσης της διαδρομής αυτής και περιμένει να ολοκληρωθεί για να μπορέσει να τη χρησιμοποιήσει για την μεταγωγή του πακέτου προς τον προορισμό του.

Η διαδικασία, όπως περιγράφηκε, έχει υλοποιηθεί και στο μοντέλο του DSR στο OPNET, το οποίο χρησιμοποιήσαμε για τη συγκεκριμένη εργασία. Το προφανές πρόβλημα στη διαδικασία αυτή είναι ότι το πρωτόκολλο δεν εξετάζει αν οι διαδρομές, που βρίσκονται αποθηκευμένες στην Route Caches των κόμβων, περιέχουν πληροφορίες που δεν είναι έγκυρες και οι οποίες θα προκαλέσουν στη συνέχεια λάθη στη μετάδοση των δεδομένων.

#### ***7.2.4. Πειραματική μελέτη χρόνου ζωής διαδρομών***

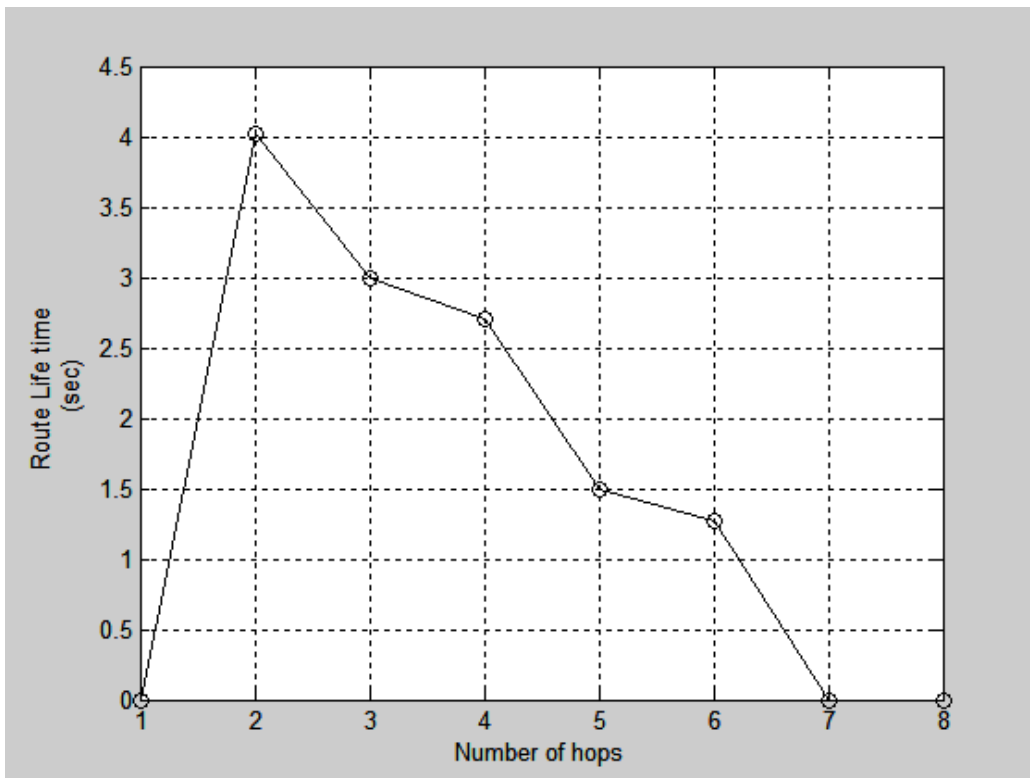
Ο χρόνος ζωής μιας διαδρομής ορίζεται ως ο χρόνος που η διαδρομή αυτή είναι έγκυρη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτυχή μετάδοση των δεδομένων. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από το πόσο σταθερή είναι η τοπολογία των κόμβων του δικτύου, που με τη σειρά της εξαρτάται από το μοντέλο κίνησης που ακολουθούν οι κόμβοι. Ο χρόνος αυτός είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί, αφού σε ένα πραγματικό περιβάλλον οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου κινούνται με τυχαία ταχύτητα, προς τυχαία διεύθυνση, για τυχαίο χρονικό διάστημα. Ο λόγος που επιθυμούμε να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε το χρόνο ζωής μιας διαδρομής είναι για να μας δοθεί η δυνατότητα να εξάγουμε μία TTL παράμετρο η οποία θα χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό των διαδρομών που αποθηκεύουν οι κόμβοι στις Route Cache. Οι κόμβοι θα μπορούν να επιλέγουν να χρησιμοποιούν ή όχι διαδρομές των οποίων ο χρόνος ζωής έχει περάσει. Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάσαμε μία θεωρητική ανάλυση και αριθμητική εκτίμηση του χρόνου ζωής των διαδρομών ενός ad-hoc δικτύου.

Ο χρόνος ζωής μιας διαδρομής στο μοντέλο του DSR στο OPNET ορίζεται ως ο χρόνος παραμονής μιας διαδρομής στην Route Cache ενός κόμβου ωστόσο αυτή αντικατασταθεί με μία άλλη. Μία διαδρομή που βρίσκεται αποθηκευμένη μπορεί να αντικατασταθεί είτε όταν ο κόμβος ανακαλύψει μια νέα, χρονικά, διαδρομή, είτε όταν η διαδρομή αυτή προκαλέσει ένα λάθος στη μετάδοση του πακέτου δεδομένων και ο κόμβος λάβει ένα Route Error για το λάθος αυτό και τη σβήσει από την Cache του. Στη συγκεκριμένη εργασία προσπαθήσαμε πειραματικά να μετρήσουμε το μέσο χρόνο ζωής μιας διαδρομής, όπως τον ορίσαμε και στις δύο αυτές περιπτώσεις. Παρακάτω

ακολουθούν μία σειρά από γραφικές παραστάσεις που μας δείχνουν το μέσο όρο του χρόνου ζωής των διαδρομών σε ένα ad-hoc ασύρματο κινητό δίκτυο. Για να μπορέσουμε να αποκτήσουμε μία καλύτερη άποψη για τη διακύμανση των τιμών της παραμέτρου αυτής, θα δείξουμε τόσο συνολικά αποτελέσματα όσο και αποτελέσματα από διάφορα πειράματα. Τα διάφορα πειράματα που κάναμε είχαν διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά το πλήθος των κόμβων του δικτύου, την εμβέλεια του ασύρματου πομποδέκτη και τα χαρακτηριστικά της κίνησης των κόμβων.

### 7.2.5. Μέσος χρόνος ζωής μίας διαδρομής

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζουμε το μέσο χρόνο ζωής διαδρομών, όταν αυτές προκάλεσαν ένα λάθος στην μετάδοση των δεδομένων και ένα Route Reply έφτασε πίσω στον κόμβο προέλευσης του πακέτου δεδομένων.



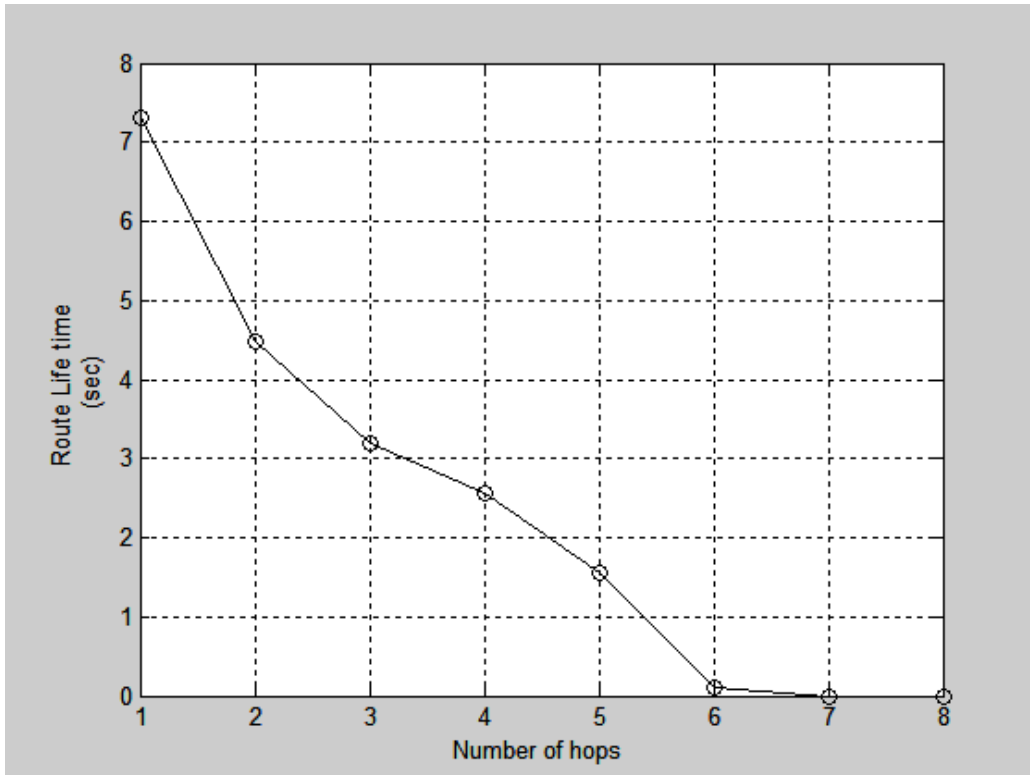
Εικόνα 17: Μέσος χρόνος ζωής μίας διαδρομής

Το παραπάνω γράφημα προέκυψε μετρώντας το χρόνο παραμονής μίας διαδρομής στην Route Cache ενός κόμβου, από τη στιγμή που εισήχθη η διαδρομή στην Cache, έως τη στιγμή που ο κόμβος έλαβε ένα μήνυμα λάθους αναφορικά με την διαδρομή

αυτή. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα τέτοιο μήνυμα, αμέσως αφαιρεί από την Cache του την εν λόγω διαδρομή καθώς και αυτές που περιέχουν τη σύνδεση που προκάλεσε το λάθος. Στο γράφημα εμφανίζονται διαδρομές μήκους έως οχτώ hops (συνδέσεων) επειδή, στην παρούσα υλοποίηση που είχαμε, το μοντέλο περιορίζει το μέγιστο μήκος μιας διαδρομής σε αυτό. Στην πράξη, δε συναντήσαμε ποτέ το φαινόμενο να παρατηρηθούν διαδρομές μεγαλύτερες από αυτό το μέγιστο στα διάφορα πειράματα που εκτελέσαμε και έτσι κρατήσαμε κι εμείς αυτή την παραδοχή.

Από το γράφημα αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν παρατηρούμε οι διαδρομές μήκους ενός hop, μίας σύνδεσης, να εμφανίζουν κάποια τιμή στο μέσο χρόνο ζωής τους. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και για τις διαδρομές μήκους εφτά και οχτώ hops. Όπως είπαμε και παραπάνω, στο γράφημα αυτό βλέπουμε το χρόνο ζωής των διαδρομών όπως αυτός προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα, από τις διαδρομές που δημιουργούν λάθη στη μετάδοση των δεδομένων. Το γεγονός να μην παρουσιάζεται μία τιμή για τις μικρότερες διαδρομές συνεπάγεται ότι οι διαδρομές αυτές δε δημιουργούν λάθη στο δίκτυο. Αυτό είναι πολύ λογικό, αφού στην υλοποίηση του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης, οι κόμβοι μπορούν πολύ εύκολα να παρακολουθούν τις αλλαγές στις συνδέσεις με τους γείτονες τους κάθε χρονική στιγμή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι πολύ μικρή η πιθανότητα να παρατηρηθεί ένα λάθος σε διαδρομές δρομολόγησης που έχουν μήκος ενός hop. Στη δεύτερη περίπτωση, οι διαδρομές που έχουν εφτά και οχτώ συνδέσεις επίσης δεν παρουσιάζουν κάποια τιμή για το χρόνο ζωής τους. Ο λόγος είναι ότι πολύ απλά δε χρησιμοποιούνται από το πρωτόκολλο διαδρομές αυτού του μήκους. Τέτοιες διαδρομές δε χρησιμοποιούνται γιατί το πρωτόκολλο πάντα προσπαθεί να βρει διαδρομές με το μικρότερο αριθμό hops. Το πρωτόκολλο θεωρεί ως καλύτερες διαδρομές αυτές που είναι και οι μικρότερες. Συνεπώς, όπως θα διασταυρώσουμε και στη συνέχεια, επειδή δεν χρησιμοποιούνται διαδρομές τέτοιου μήκους, δεν εμφανίζονται και λάθη όπως είναι φυσικό.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζουμε το μέσο χρόνο ζωής διαδρομών που αντικαταστάθηκαν όχι λόγω κάποιου λάθους, αλλά λόγω της ανακάλυψης μίας νέας, καλύτερης διαδρομής προς τον προορισμό αυτό. Και πάλι θα δείξουμε τα αποτελέσματά μας για τις διαδρομές διαφορετικού μεγέθους.



Εικόνα 18: Μέσος χρόνος ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση

Στο γράφημα αυτό βλέπουμε ότι όλες οι διαδρομές μέχρι και μήκους έξι συνδέσεων (hops) εμφανίζουν κάποιο χρόνο ζωής. Το διάγραμμα αυτό εμφανίζει το χρόνο παραμονής των διαδρομών μέσα στη Route Cache μέχρι τη στιγμή που, λόγω της ανακάλυψης πιο νέων και φρέσκων πληροφοριών δρομολόγησης, αντικαταστάθηκαν από καινούριες διαδρομές. Δηλαδή αντικαταστάθηκαν λόγω της αντίδρασης του πρωτοκόλλου στις αλλαγές της τοπολογίας των κόμβων του δικτύου και στην προσαρμογή των πληροφοριών δρομολόγησης των κόμβων με βάση τα νέα χαρακτηριστικά. Και στο διάγραμμα αυτό είναι φανερό ότι οι διαδρομές μεγάλου μήκους παραμένουν λιγότερο χρόνο στη Route Cache πριν αντικατασταθούν με νέες. Αντίθετα, οι διαδρομές με μικρό μήκος εμφανίζουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Παρατηρούμε ότι, για τις διαδρομές, μήκους εφτά και οχτώ hops, εμφανίζεται μηδενικός χρόνος ζωής εξαιτίας της μη χρησιμοποίησης τέτοιων διαδρομών, για την δρομολόγηση δεδομένων, στο δίκτυο. Αυτό μπορεί επιπλέον να επιβεβαιωθεί και παρατηρώντας το animation της προσομοίωσης των πειραμάτων με το OPENT, όπου



είναι φανερό σε έναν παρατηρητή ότι δεν μπορούν να εμφανιστούν διαδρομές τόσο μεγάλες πολύ συχνά.

#### **7.2.6. Χρόνος ζωής μίας διαδρομής σε διαφορετικά πειράματα**

Παρακάτω παραθέτουμε το χρόνο ζωής διαδρομών διαφορετικού μήκους διαδρομών που προέκυψαν από την εκτέλεση διαφορετικών πειραμάτων. Στα αποτελέσματα των πειραμάτων, που περιγράφουμε αναλυτικά στο Παράρτημα Β, περιέχονται οι γραφικές παραστάσεις του χρόνου ζωής διαδρομών διαφορετικού μήκους.

##### *7.2.6.1. Στατιστικά στοιχεία*

Τα στατιστικά στοιχεία που συλλέγουμε για την μελέτη του χρόνου ζωής των διαδρομών αφορούν το χρόνο ζωής μίας διαδρομής για την οποία προκύπτει ένα λάθος δρομολόγησης με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα μήνυμα ελέγχου (Route Error) και προωθείται στον κόμβο πηγή της διαδρομής με αποτέλεσμα αυτό να διαγράψει την συγκεκριμένη διαδρομή από την Route Cache. Επίσης μετράμε το χρόνο ζωής των διαδρομών που αντικαθιστούνται εξαιτίας της ανακάλυψης μία νέας πιο φρέσκιας ή καλύτερης διαδρομής. Στο παράρτημα παρουσιάζουμε τις γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από τα διάφορα πειράματα.

Από τις τιμές αυτές για να μπορέσουμε να βγάλουμε τα ζητούμενα συμπεράσματα πρέπει να υπολογίσουμε την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση. Επίσης μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε την πιθανότητα να παρατηρούμε τιμές μικρότερες ή ίσες από μία τιμή. Η πιθανότητα αυτή μας δίνεται από την συνάρτηση κατανομή πιθανότητας CDF (Cumulative distribution function) που περιγράφει την πιθανότητα να πάρει τιμή μία τυχαία μεταβλητή  $X$ , μικρότερη από  $x$ . Για κάθε πραγματικό αριθμό  $x$ , η CDF δίνεται από την  $F(x) = P(X \leq x)$ . Τα εργαλεία στατιστικής ανάλυσης του OPNET μας επιτρέπουν να εξάγουμε την συνάρτηση κατανομής της πιθανότητας για κάθε χρονοσειρά που προκύπτει από την συλλογή των αποτελεσμάτων του χρόνου ζωής των διαδρομών διαφορετικού μήκους. Η CDF μας δείχνει την πιθανότητα ο χρόνος ζωής μίας διαδρομής να είναι μικρότερος από μία τιμή.

##### *7.2.6.2. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».*

Στα πειράματα αυτά οι κόμβοι κινούνται κάθε ένα δευτερόλεπτο επιλέγοντας τυχαία μία ταχύτητα, κατά ένα διάστημα τριών μέτρων. Η κατεύθυνση τους είναι η ίδια έως να

προσεγγίσουν τα όρια του δικτύου όπου επιλέγουν τυχαία μία νέα κατεύθυνση. Τα γραφήματα από τα πειράματα αυτά φαίνονται στο παράρτημα. Τα πειράματα αυτά παρουσιάζονται στο παράρτημα Β. Ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής μίας διαδρομής εξαρτάται από:

#### *7.2.6.3. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint»*

Στα πειράματα αυτά οι κόμβοι κινούνται κάθε ένα δευτερόλεπτο επιλέγοντας τυχαία μία ταχύτητα, κατά ένα διάστημα πέντε μέτρων. Παραμένουν ακίνητοι για ένα σταθερό χρόνο και στη συνέχεια συνεχίζουν να κινούνται επιλέγοντας ξανά τυχαία μια κατεύθυνση. Η ταχύτητα τους επιλέγεται τυχαία από μία κατανομή, και περιορίζεται από μία μέγιστη τιμή

#### *7.2.6.4. Αποτελέσματα πειραμάτων*

Από τα διάφορα πειράματα που εκτελέσαμε στο μοντέλο του DSR στο OPNET προέκυψαν τα παρακάτω εμπειρικά συμπεράσματα.

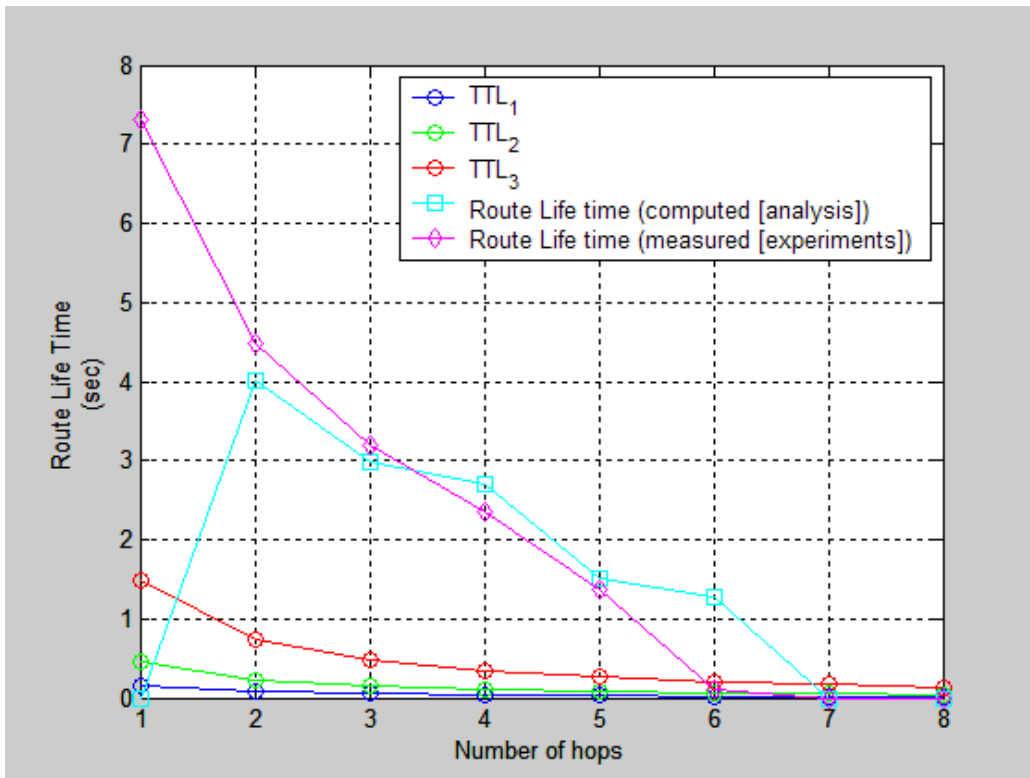
Το μοντέλο τείνει να χρησιμοποιεί περισσότερες μικρές διαδρομές από ότι μεγάλες. Αυτό οφείλεται στην περιγραφή του πρωτοκόλλου δρομολόγησης το οποίο ορίζει ότι οι διαδρομές μικρού μήκους είναι αυτές που προτιμούνται και επιλέγονται για την δρομολόγηση των δεδομένων. Αυτό συνεπάγεται και την εμφάνιση περισσότερων λαθών και στις διαδρομές αυτές.

Ο χρόνος ζωής μίας διαδρομής την οποία χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι μεγαλύτερος για τις μικρότερες διαδρομές και μικρότερος για διαδρομές μεγάλου μήκους. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται από τα γραφήματα της συνάρτησης κατανομής της πιθανότητας, για το χρόνο ζωής διαδρομών μετά από την αντικατάστασή τους με νέες στις Route Caches. Στα γραφήματα αυτά βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερη η πιθανότητα να υπάρχουν μικρού μήκους διαδρομές με μεγαλύτερο χρόνο ζωής από το να υπάρχουν μεγάλου μήκους διαδρομές με μεγάλο χρόνο ζωής.

Ο πειραματικά μετρούμενος χρόνος ζωής μίας διαδρομής, η οποία προκάλεσε ένα λάθος, είναι μεγαλύτερος για τις μικρότερες διαδρομές και μικρότερος για τις διαδρομές. Εξαρτάται δηλαδή κυρίως από το μήκος της διαδρομής.

### 7.2.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων.

Παραπάνω περιγράψαμε τη μελέτη του χρόνου ζωής μίας διαδρομής σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο με βάση ένα θεωρητικό μαθηματικό μοντέλο ανάλυσης και πειραματικές μετρήσεις. Στο σημείο αυτό θα κάνουμε μία σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο αναλύσεις.

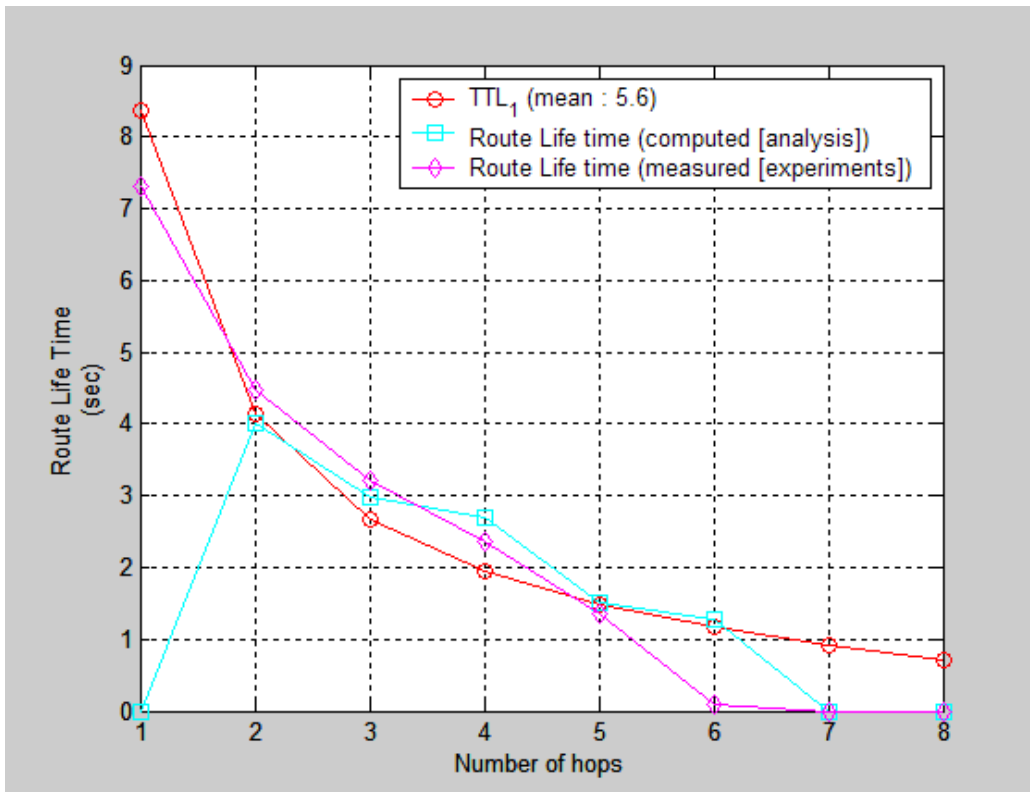


Εικόνα 19: Συνολική απεικόνιση του χρόνου ζωής των διαδρομών στον DSR

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζουμε την συνολική απεικόνιση του χρόνου ζωής των διαδρομών του DSR που μετρήσαμε χρησιμοποιώντας τις σχέσεις από τη μαθηματική ανάλυση και από τα στατιστικά στοιχεία που συλλέξαμε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων προσομοίωσης.

Στο διάγραμμα είναι φανερό ότι η μορφή της καμπύλης των αποτελεσμάτων από τη μαθηματική ανάλυση μοιάζει αρκετά με αυτή των πειραματικών αποτελεσμάτων. Ο λόγος που δε συμπίπτουν είναι η μέση τιμή ( $\mu_c$ ) που επιλέξαμε για την εξαγωγή των τιμών του χρόνου ζωής των διαδρομών που υπολογίσαμε. Με την επιλογή διαφορετικής

μέσης τιμές τα πειραματικά αποτελέσματα συμπίπτουν με αυτά που προέκυψαν από την ανάλυση μας (βλέπε στο παρακάτω γράφημα).



Εικόνα 20: Τα πειραματικά με τα αναλυτικά αποτελέσματα

Αυτό μπορεί να μας οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος ζωής μιας διαδρομής σε ένα ad-hoc δίκτυο μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τις παραπάνω μετρήσεις. Κατά συνέπεια μπορούμε να προσδιορίσουμε παραμέτρους που θα περιγράφουν το χρόνο για τον οποίο μία διαδρομή πρέπει να διατηρείται σε μία Route Cache, μετά το πέρας του οποίου το πρωτόκολλο πρέπει να την απορρίπτει και να προσπαθεί να ανακαλύψει μία νέα διαδρομή.

### 7.2.8. Εφαρμογή του *TTL* στο μοντέλο του *DSR* στο *OPNET*

Στην παραπάνω παράγραφο παρουσιάσαμε τη μελέτη του χρόνου ζωής διαδρομών σε ένα ad-hoc ασύρματο δίκτυο του οποίου οι κόμβοι χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο «Δυναμικής Δρομολόγησης Πηγής» DSR. Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε τον τρόπο αξιοποίησης των αποτελεσμάτων αυτών για την αποδοτικότερη λειτουργία της Route Cache, που διατηρείται σε κάθε κόμβο, για την αποθήκευση των ήδη γνωστών

διαδρομών δρομολόγησης. Θα περιγράψουμε πώς μπορούμε να προσδιορίσουμε μία παράμετρο που ονομάζουμε TTL (Time-To-Live) η οποία χαρακτηρίζει κάθε αποθηκευμένη διαδρομή και περιγράφει το χρόνο παραμονής της διαδρομής στην Cache για τον οποίο υποθέτουμε ότι είναι έγκυρη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δρομολογήσει πακέτα δεδομένων.

#### 7.2.8.1. Υλοποίηση

Στο υπάρχον μοντέλο του DSR η υλοποίηση της Route Cache έχει γίνει σύμφωνα με την περιγραφή των προδιαγραφών του πρωτοκόλλου. Σε κάθε κόμβο υπάρχει ένας πίνακας στον οποίο αποθηκεύονται οι διαδρομές που ανακαλύπτονται για κάθε προορισμό. Στον πίνακα αυτόν υπάρχει μία διαδρομή για κάθε κόμβο του δικτύου που αποτελεί πιθανό προορισμό των πακέτων δεδομένων. Στο κεφάλαιο 4 έχουμε περιγράψει το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSR και στο κεφάλαιο 6 την υλοποίηση του πρωτοκόλλου στο OPNET.

Σύμφωνα με την περιγραφή του πρωτοκόλλου, αλλά και την υλοποίηση, ο αλγόριθμος δρομολόγησης DSR, κάθε φορά που επιθυμεί να μεταδώσει ένα πακέτο δεδομένων, αρχικά ελέγχει αν υπάρχει μια διαδρομή στην Route Cache και αν ναι τη χρησιμοποιεί για να μεταδώσει το πακέτο. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο, όταν υπάρχει μια διαδρομή στην Cache αυτή, πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Με άλλα λόγια ο αλγόριθμός θεωρεί ότι οι διαδρομές στην Route Cache, έχουν άπειρο χρόνο ζωής και η τιμή της παραμέτρου TTL είναι ίση με το άπειρο. Ο μόνος τρόπος να αντικατασταθεί μία διαδρομή στη Route Cache είναι είτε να συμβεί ένα Route Error, είτε να ανακαλύψει ένας κόμβος μια νέα διαδρομή προς το συγκεκριμένο προορισμό.

Στην υλοποίηση που κάναμε εμείς προσπαθήσαμε να βρούμε ένα τρόπο για να εισάγουμε στην παρούσα υλοποίηση της Cache, που έχουν οι κόμβοι και χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος DSR, την παράμετρο TTL. Η παράμετρος αυτή ορίζει το χρόνο ζωής που έχει μία αποθηκευμένη διαδρομή, πέραν του οποίου δεν χρησιμοποιείται, αλλά ενεργοποιείται η διαδικασία εύρεσης μίας νέας για το συγκεκριμένο προορισμό. Έτσι, προσθέσαμε στην παρούσα υλοποίηση της δομής της Route Cache επιπλέον πεδία, τα οποία σημειώνουν το χρόνο εισαγωγής μίας νέας καταχώρησης διαδρομής σ' αυτή (start\_life\_time) καθώς και μίας δυαδικής μεταβλητής που περιγράφει, σύμφωνα με την

τιμή του TTL, την κατάσταση της διαδρομής, εάν έχει περάσει ο χρόνος ζωής της ή όχι (`dirty_bit`).

Κάθε φορά που ένας κόμβος επιθυμεί να αποστείλει ένα πακέτο δεδομένων, ελέγχει εάν υπάρχει διαθέσιμο το πακέτο αυτό στη Route Cache. Εάν υπάρχει, ελέγχει, στη συνέχεια, το χρόνο παραμονής της συγκεκριμένης αποθηκευμένης διαδρομής στη Route Cache. Στην περίπτωση που ο χρόνος αυτός είναι μικρότερος του εκτιμώμενου χρόνου ζωής, που έχει η συγκεκριμένη διαδρομή, τη χρησιμοποιεί για τη δρομολόγηση του πακέτου δεδομένων. Στην περίπτωση που ο χρόνος αυτός είναι μεγαλύτερος από τον εκτιμώμενο χρόνο ζωής, θέτει το (`dirty_bit`) ίσος με ένα, δηλαδή ακυρώνει τη συγκεκριμένη διαδρομή αποτρέποντας την περαιτέρω χρήση της και ενεργοποιεί τη διαδικασία εύρεσης μίας νέας διαδρομής προς το συγκεκριμένο προορισμό.

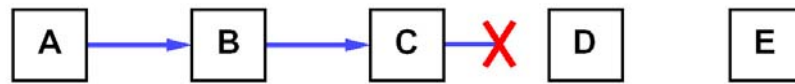
Η διαδικασία αυτή είναι πλήρως καταναμημένη αφού, σύμφωνα με αυτά που περιγράψαμε παραπάνω, μπορούμε σε μία πραγματική υλοποίηση να έχουμε εκτιμήσεις του χρόνου ζωής διαδρομών, με τη χρήση των μαθηματικών σχέσεων που έχουμε (βλέπε παραπάνω).

#### 7.2.8.2. Επιλογή του *Time-to-Live* (TTL)

Παραπάνω περιγράψαμε με απλά λόγια τη νέα υλοποίηση της Route Cache, η οποία επιτρέπει στον αλγόριθμο δρομολόγησης να επιλέγει από τις αποθηκευμένες διαδρομές αυτές για τις οποίες δεν έχει παρέλθει ο χρόνος ζωής τους. Από την παραπάνω ανάλυση περιγράψαμε μία μέθοδο εκτίμησης του χρόνου ζωής των διαδρομών και έναν τρόπο υπολογισμού αυτού. Ας δούμε όμως πιο αναλυτικά το σκοπό που επιθυμούμε η παράμετρος αυτή να εξυπηρετήσει στο μοντέλο μας.

Έστω ότι έχουμε το πολύ απλό ασύρματο ad-hoc δίκτυο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στο δίκτυο αυτό ο κόμβος A επιθυμεί να αποστείλει ένα πακέτο δεδομένων στον κόμβο E, χρησιμοποιώντας μία διαδρομή που έχει αποθηκευμένη στη Route Cache του, η οποία περιγράφει ότι το πακέτο πρέπει να ακολουθήσει το μονοπάτι  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ . Η σύνδεση του κόμβου C με τον κόμβο D όμως προκαλεί λάθος στη μετάδοση του πακέτου, οπότε έχουμε την εμφάνιση ενός λάθους εξαιτίας μίας μη έγκυρης διαδρομής στη cache. Το λάθος αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πακέτου Route Error, το οποίο ο κόμβος C θα μεταδώσει πίσω στον κόμβο A,

ακολουθώντας τη διαδρομή  $C \rightarrow B \rightarrow A$ . Ο Α τότε θα καταλάβει ότι το πακέτο δε μεταδόθηκε λόγω της χρήσης μη έγκυρης διαδρομής από τη Route Cache του και θα ενεργοποιήσει τη διαδικασία ανακάλυψης μίας νέας διαδρομής προς τον Ε.



Εικόνα 21: Εμφάνιση λάθους στην μετάδοση πακέτου δεδομένων

Από τα παραπάνω μπορούμε να εξάγουμε τη συνολική καθυστέρηση δρομολόγησης για τη μετάδοση του πακέτου από τον Α στον Ε. Η καθυστέρηση δρομολόγησης, για το παράδειγμα που φαίνεται στο σχήμα, θα είναι ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου από τον Α στον C, η αναμονή του C για να αντληφθεί το λάθος στην προώθηση του πακέτου στον D μετά από ένα transmission timeout, η μετάδοση του πακέτου λάθους από τον C, πίσω στον Α, και η αναμονή του Α, για την ολοκλήρωση της διαδικασίας εύρεσης μίας νέας διαδρομής προς τον Ε, για την αποστολή του πακέτου προς τον προορισμό του. Αυτό φαίνεται και στην παρακάτω σχέση

$$\begin{aligned}
 & routing\_delay = packet\_propagation(A \rightarrow C) \\
 & + error\_timeout(C) + error\_propagation(C \rightarrow A) \\
 & + route\_discovery(E) \\
 & + delay\_in\_buffer(E)
 \end{aligned}$$

Εάν ο κόμβος Α με κάποιο τρόπο ήταν σε θέση να προβλέψει, με βάση τα χαρακτηριστικά του δικτύου, ότι είναι πολύ πιθανό για τη συγκεκριμένη να συμβεί κάποιο λάθος θα μπορούσε να ενεργοποιήσει αμέσως τη διαδικασία εύρεσης μίας νέας διαδρομής μειώνοντας σημαντικά τη συνολική καθυστέρηση δρομολόγησης, που σε αυτή την περίπτωση θα είναι ίση με το χρόνο ανακάλυψης μίας νέας διαδρομής προς τον κόμβο Ε.

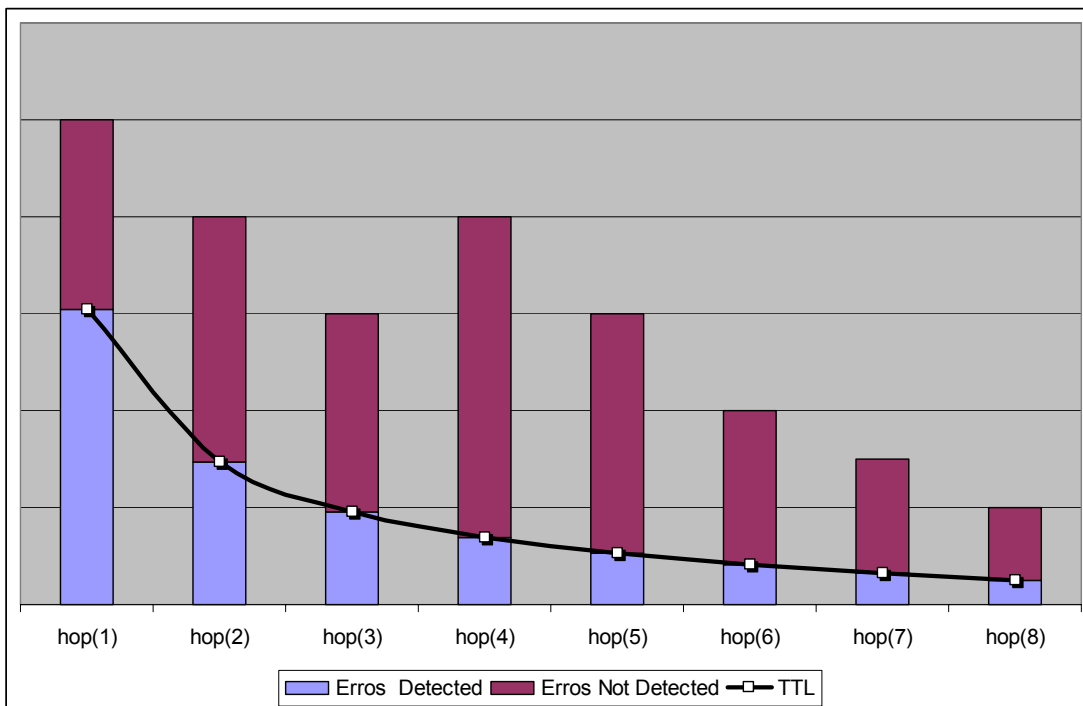
Η χρήση της παραμέτρου TTL μπορεί να αποτρέψει την επιλογή διαδρομών που είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν λάθος στη μετάδοση των δεδομένων με αποτέλεσμα τη μεγάλη καθυστέρηση δρομολόγησης και την αύξηση της συνολικής καθυστέρησης των δεδομένων. Από την προηγούμενη ανάλυση έχουμε παρουσιάσει ένα τρόπο

προσδιορισμού των τιμών που πρέπει να έχει η TTL για διαδρομές συγκεκριμένου μήκους.

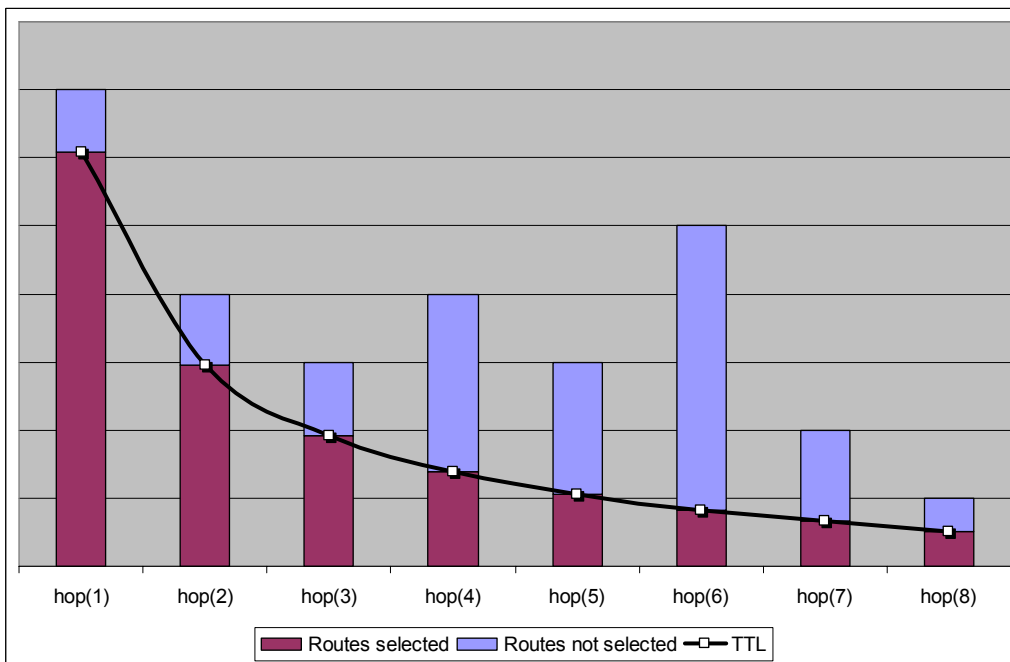
Ο προσδιορισμός της TTL όπως θα δείξουμε και στο παρακάτω παράδειγμα δεν πρέπει να ικανοποιεί το παρακάτω trade-off. Σε ένα ασύρματο δίκτυο ad-hoc δείξαμε παραπάνω ότι ο χρόνος ζωής των διαδρομών που προκαλούν λάθη και αυτών που αντικαθίστανται από νέες ακολουθεί τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την μαθηματική ανάλυση όπως περιγράφεται στο [Liang 2003]. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τον εκτιμώμενο χρόνο ζωής της κάθε διαδρομής σε ένα τέτοιο δίκτυο.

Η χρήση αυτής της τεχνικής θα έχει σαν αποτέλεσμα το πρωτόκολλο να μην χρησιμοποιεί διαδρομές για τις οποίες θεωρεί ότι έχει παρέλθει ο χρόνος ζωής τους. Όπως δείχνουμε και στα παρακάτω σχήματα για ένα ποσοστό από τις διαδρομές αυτές που θα απορριφθούν ή θα επιλεγούν ο αλγόριθμος θα έχει πάρει την λάθος απόφαση. Οι περιπτώσεις που αλγόριθμος παίρνει την σωστή απόφαση είναι όταν επιλέγει να χρησιμοποιήσει μία διαδρομή η οποία δεν προκαλεί κάποιο Route Error ή όταν δεν επιλέγει μία διαδρομή η οποία θα προκαλούσε κάποιο Route Error. Λάθος απόφαση παίρνει όταν επιλέγει μία διαδρομή η οποία στην πορεία προκαλεί λάθος στην δρομολόγηση των δεδομένων ή όταν δεν επιλέγει μία διαδρομή η οποία δεν θα προκαλούσε λάθος στην μετάδοση των δεδομένων. Αυτό που εμείς θα προσπαθήσουμε να μελετήσουμε είναι η τιμή που πρέπει να έχει το TTL ούτως ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τις περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος αποτυγχάνει, να αποτρέψει το πρωτόκολλο δρομολόγηση από την χρήση διαδρομών που προκαλούν λάθη και να προτρέψει το πρωτόκολλο να χρησιμοποιήσει διαδρομές οι οποίες δεν θα προκαλέσουν κάποιο λάθος. Στα παρακάτω διαγράμματα βλέπουμε σχηματικά αυτά που περιγράψαμε.





Εικόνα 22: Άκυρες διαδρομές δρομολόγησης και πλήθος αυτών που αποφεύγονται με την χρήση του Time-to-Live



Εικόνα 23: Έγκυρες Διαδρομές δρομολόγησης και πλήθος αυτών που δεν χρησιμοποιούνται με την χρήση του Time-to-Live

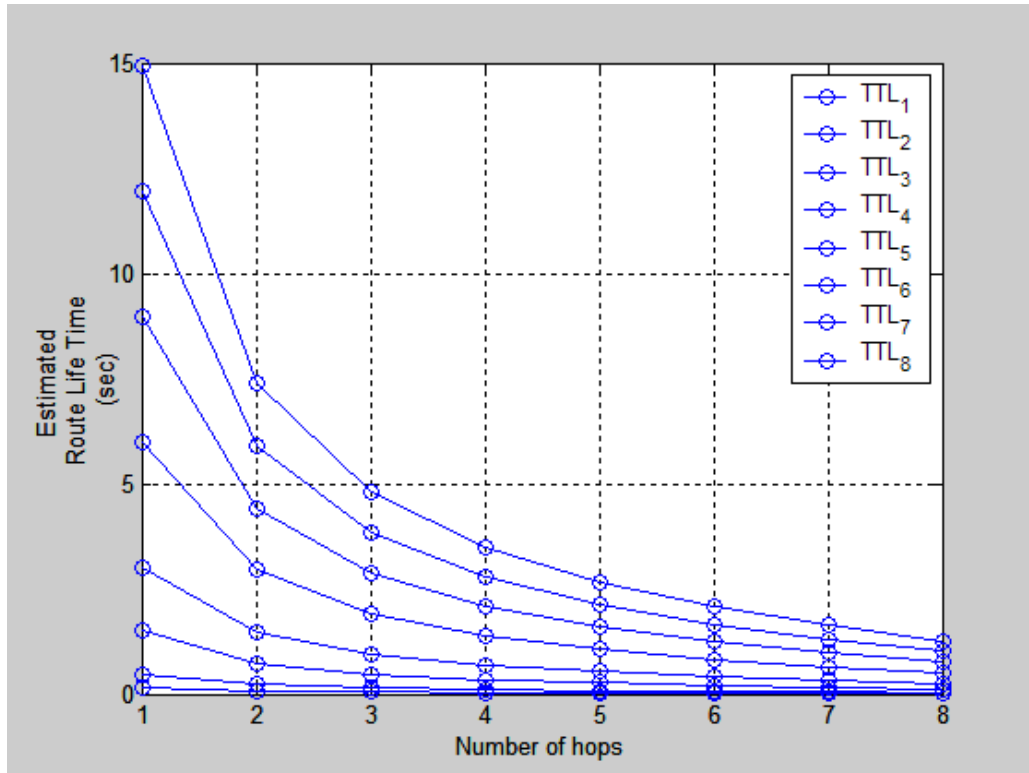
Στα διαγράμματα αυτά ο κάθετος άξονας είναι ο άξονας του χρόνου, και ο οριζόντιος μας δείχνει τον αριθμό των hops που έχουν οι διαδρομές. Η καμπύλη μας δείχνει τις τιμές του TTL, που εκτιμάμε ότι πρέπει να έχει κάθε διαδρομή διαφορετικού μήκους. Οι κουκίδες που υπάρχουν μας δείχνουν το χρόνο ζωής διαδρομών διαφορετικού μήκους. Στο πρώτο διάγραμμα εμφανίζουμε το χρόνο ζωής διαδρομών οι οποίες προκάλεσαν ένα λάθος και στις δεύτερες το χρόνο ζωής διαδρομών μετά από την αντικατάστασή τους με νέες. Τα γραμμοσκιασμένα τμήματα είναι αυτά που επιθυμούμε να βελτιώσουμε με την επιλογή του TTL. Συγκεκριμένα σκοπός μας είναι να ελαχιστοποιήσουμε τις περιπτώσεις όπου το πρωτόκολλο επιλέγει να χρησιμοποιήσει διαδρομές που προκαλούν λάθη δρομολόγησης και τις περιπτώσεις όπου επιλέγει να μην χρησιμοποιήσει διαδρομές οι οποίες δεν προκαλούν λάθη. Αυτά είναι τα γραμμοσκιασμένα τμήματα στα γραφήματα

#### 7.2.8.3. Περιβάλλον εκτέλεσης πειραμάτων

Το περιβάλλον εκτέλεσης των πειραμάτων περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο (βλέπε 6.5). Στο σημείο αυτό θα εισάγουμε δύο ακόμα παραμέτρους στα σενάρια που περιγράψαμε. Η πρώτη παράμετρος που αναφερόμαστε αφορά τη χρήση ή όχι της παραμέτρου TTL. Όταν αυτή η παράμετρος είναι απενεργοποιημένη, υποθέτουμε ότι το πρωτόκολλο δρομολόγησης θεωρεί ότι όλες οι διαδρομές έχουν άπειρο χρόνο ζωής. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούν πάντα τις διαδρομές που υπάρχουν αποθηκευμένες. Διαφορετικά η ενεργοποίηση της παραμέτρου αυτής αναγκάζει το πρωτόκολλο να ενεργοποιήσει τις επιπλέον λειτουργίες της Route Cache και να ελέγχει, κάθε φορά που υπάρχει διαθέσιμη μία διαδρομή, εάν έχει παρέλθει ο χρόνος ζωής της. Η δεύτερη παράμετρος αφορά την επιλογή των διαφορετικών τιμών της παραμέτρου που μπορούμε να επιλέξουμε.

Από την σχέση  $T_{opt} = -\mu_u \log(q_{opt})$ , όπου μας δίνει, βλέπε πιο πάνω, το βέλτιστο χρόνο ζωής μίας διαδρομής, μπορούμε να πάρουμε τις διαφορετικές κατανομές της τιμής του TTL, ανάλογα με τη μέση τιμή  $\mu_u$ , που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στην υλοποίηση που περιγράψαμε παραπάνω. Το ζητούμενο είναι να βρούμε το βέλτιστο TTL που θα βελτιώνει, όσο το δυνατόν περισσότερο, την απόδοση του πρωτοκόλλου DSR.

Παρακάτω παραθέτουμε έναν πίνακα και μία γραφική αναπαράσταση των τιμών αυτών.



Εικόνα 24: Εκτιμώμενος χρόνος ζωής διαδρομών

	hop_1	hop_2	hop_2	hop_3	hop_5	hop_6	hop_7	hop_8
TTL_1	0.14954	0.073719	0.047891	0.034657	0.02647	0.020761	0.016384	0.012658
TTL_2	0.44861	0.22116	0.14367	0.10397	0.079409	0.062282	0.049151	0.037975
TTL_3	1.4954	0.73719	0.47891	0.34657	0.2647	0.20761	0.16384	0.12658
TTL_4	2.9907	1.4744	0.95782	0.69315	0.5294	0.41521	0.32768	0.25317
TTL_5	5.9815	2.9488	1.9156	1.3863	1.0588	0.83042	0.65535	0.50633
TTL_6	8.9722	4.4232	2.8735	2.0794	1.5882	1.2456	0.98303	0.7595
TTL_7	11.963	5.8975	3.8313	2.7726	2.1176	1.6608	1.3107	1.0127
TTL_8	14.954	7.3719	4.7891	3.4657	2.647	2.0761	1.6384	1.2658

Πίνακας 2: Πίνακας τιμών του χρόνου ζωής διαδρομών

#### 7.2.8.4. Στατιστικά στοιχεία

Για την μελέτη των αποτελεσμάτων κατά την εκτέλεση των πειραμάτων επιλέξαμε να αποθηκεύουμε συγκεκριμένα στατιστικά στοιχεία με σκοπό την αξιολόγηση των επιδόσεων του πρωτοκόλλου κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Τα στατιστικά αυτά είναι τα παρακάτω:

- **Total\_errors\_detected:** Το στατιστικό αυτό περιγράφει τα συνολικά λάθη που συνέβησαν κατά την δρομολόγηση ενός πακέτου με την χρήση μίας διαδρομής που προέρχεται από την Route Cache.
- **Total\_data\_served:** Το στατιστικό αυτό αφορά τα συνολικά πακέτα δεδομένων που ο αλγόριθμος δρομολόγησης κρίνει ότι μπορεί να τα εξυπηρετήσει δίνοντας τους μία έγκυρη διαδρομή προς τον προορισμό τους. Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούμε την παράμετρο του TTL, το στατιστικό αυτό μας δίνει τα συνολικά πακέτα τα οποία χρησιμοποίησαν μία διαδρομή που έχει ανακαλυφθεί από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το TTL το στατιστικό αυτό εκφράζει τα συνολικά πακέτα για τον προορισμό των οποίων υπάρχει διαθέσιμη μία διαδρομή στην Route Cache, που έχει ανακαλυφθεί από το πρωτόκολλο δρομολόγησης, και η οποία είναι έγκυρη σύμφωνα με την τιμή του TTL που έχει και του χρόνου παραμονής της στην Route Cache.
- **Total\_data\_successfully\_transmitted:** Το στατιστικό αυτό αφορά τα συνολικά πακέτα που μεταδόθηκαν με επιτυχία στον προορισμό τους χρησιμοποιώντας ένα μονοπάτι από την Route Cache.
- **Upper\_layer\_Average\_delay:** Το στατιστικό αυτό εκφράζει την συνολική καθυστέρηση που έχουν τα πακέτα δεδομένων για να μεταδοθούν στο δίκτυο. Η χρονική αυτή καθυστέρηση υπολογίζεται από την συνολική καθυστέρηση που παρατηρείται στην μετάδοση των δεδομένων σε σχέση με τα συνολικά πακέτα που μεταδόθηκαν με επιτυχία
- **Upper\_layer\_throughput:** Το στατιστικό αυτό περιγράφει το ρυθμό της συνολικής απόδοσης του πρωτοκόλλου που εκφράζει το ποσοστό των πακέτων δεδομένων που μεταδόθηκαν με επιτυχία κατά την διάρκεια της.

#### 7.2.8.5. Αποτελέσματα

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα της απόδοσης του πρωτοκόλλου. Στο παράρτημα Γ υπάρχουν τα γραφήματα που παρουσιάζουν τις μεταβολές των παραμέτρων της απόδοσης του πρωτοκόλλου. Στα πειράματα αυτά θα

προσπαθήσουμε να δείξουμε τη βελτίωση που παρατηρείται στις στατιστικές παραμέτρους που αναφέραμε παραπάνω.

Τα σενάρια εκτέλεσης των πειραμάτων στα έχουν περιγραφεί παραπάνω, απλά σημειώνουμε ότι τα δίκτυα που χρησιμοποιήσαμε αποτελούνται από κόμβους που έχουν εμβέλεια ασύρματου μέσου ίση με 50, 100, 200 και 300 μέτρα. Παρακάτω παρουσιάζουμε τους πίνακες με τα επιμέρους αποτελέσματα κατά την χρησιμοποίηση του TTL. Σημειώνουμε με πράσινο χρώμα την περίπτωση μη χρήσης της παραμέτρου TTL και με κίτρινο χρώμα τις περιπτώσεις όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη βελτίωση των παραμέτρων του δικτύου.

#### 7.2.8.5.1. Βελτίωσης του miss\_ratio.

Σαν miss\_ratio ορίζουμε το ποσοστό των αποθηκευμένων διαδρομών δρομολόγησης στην Route Cache και οι οποίες προκάλεσαν λάθη σε σχέση με τις συνολικές διαδρομές που χρησιμοποιήθηκαν στη την μετάδοση των δεδομένων.

Από τα πειράματα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας που εμφανίζει για ποιες τιμές του TTL παρουσιάζεται η μεγαλύτερη μείωση του ποσοστού λανθασμένων πληροφοριών που περιέχονται συνολικά στις Route Caches των κόμβων. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζεται η τιμή του miss ratio όταν δεν χρησιμοποιείτε η παράμετρος TTL, ο χρόνος ζωής των διαδρομών είναι άπειρος, και όταν χρησιμοποιείται. Εμφανίζουμε και την κατανομή του TTL, σύμφωνα με αυτά που έχουμε πει σε προηγούμενη παράγραφο, που αντιστοιχεί η μεγαλύτερη μείωση του miss ratio.

##### 7.2.8.5.1.1. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».

	miss_ratio % 50m range	miss_ratio % 100m range	miss_ratio % 200m range	miss_ratio % 300m range
NO_TTL	12.97598125	7.67370966	5.430643226	0.602973282
TTL_1	4.08719346	0.756590614	2.959190696	0.170203713
TTL_2	3.966901923	0.252900922	3.52552765	0.292062168
TTL_3	0.257566001	6.647398844	3.396129694	0.206664944
TTL_4	1.94235589	1.733736281	4.022364564	0.342359166
TTL_5	0.672166208	7.694330032	3.415178571	0.7692713
TTL_6	2.924117931	4.62032945	3.23952536	0.500412712
TTL_7	1.111385527	5.149117468	3.081009296	0.46004342
TTL_8	1.316222442	7.233714506	4.600987783	0.481549333
<b>miss ratio GAIN %</b>	77.46514985	96.7043199	45.50938862	71.77259463

Πίνακας 3: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 16 κόμβων

	miss_ratio % 50m range	miss_ratio % 100m range	miss_ratio % 200m range	miss_ratio % 300m range
NO_TTL	4.561671764	8.032928943	5.690582399	1.829191898
TTL_1	2.019607843	2.943623882	6.023978468	0.979154881
TTL_2	2.693810405	2.386533134	5.019343319	0.996116833
TTL_3	0.957061562	2.225886232	4.216038699	1.107508317
TTL_4	1.642575558	8.285817394	4.982628591	1.339696894
TTL_5	4.13354531	11.13905565	3.531001858	1.312117299
TTL_6	7.712339744	8.017854191	3.786567605	1.527388375
TTL_7	5.12189116	11.10868775	4.267076616	1.477381497
TTL_8	5.242673993	10.46173716	4.172901081	1.692294835
<b>miss ratio GAIN %</b>	79.01949961	72.29047775	37.95007943	46.47063102

Πίνακας 4: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 20 κόμβων

	miss_ratio % 50m range	miss_ratio % 100m range	miss_ratio % 200m range	miss_ratio % 300m range
NO_TTL	14.63961439	14.58518016	6.239265704	8.32037325
TTL_1	4.905025246	13.78324732	7.421565683	
TTL_2	9.414037347	11.25025875	4.395696756	
TTL_3	8.183833904	10.92459016	4.035603417	
TTL_4	10.34536162	13.70529328	3.942771585	
TTL_5	10.61108479	13.72062663	4.004753745	
TTL_6	9.256806475	13.02274839	4.160999306	
TTL_7	12.91536864	11.52761758	4.865514063	
TTL_8	13.07237814	14.39242219	4.111658089	
<b>miss ratio GAIN %</b>	66.49484669	25.09801016	36.80712166	

Πίνακας 5: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 30 κόμβων

7.2.8.5.1.1.1. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint».

	miss_ratio % 50m range	miss_ratio % 100m range	miss_ratio % 200m range	miss_ratio % 300m range
NO_TTL	7.151418298	10.7259426	13.72535211	8.3507198
TTL_1	2.586605081	6.558839933	7.694151486	2.339633247

TTL_2	3.52238806	3.407171948	11.88137634	3.665261109
TTL_3	0.397398844	3.369086909	9.510618652	4.768
TTL_4	11.5333774	10.98113892	8.246866191	6.941321942
TTL_5	9.157509158	10.4910491	9.464089074	6.80492547
TTL_6	4.63190184	5.90534086	13.47702367	5.793110615
TTL_7	10.69338136	11.45113524	10.02519798	7.029904494
TTL_8	8.805330795	16.00865333	11.95628255	8.100573352
<b>miss ratio GAIN %</b>	94.4430765	68.23428882	43.94204664	71.98285534

Πίνακας 6: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 16 κόμβων

	<b>miss_ratio % 50m range</b>	<b>miss_ratio % 100m range</b>	<b>miss_ratio % 200m range</b>	<b>miss_ratio % 300m range</b>
NO_TTL	7.864214993	16.61465962	23.02054705	8.3507198
TTL_1	2.46277205	4.1766018	7.445137094	2.689665254
TTL_2	3.46193952	3.882693102	7.809502314	5.379852744
TTL_3	0.834454913	9.861607552	8.233650084	4.534436643
TTL_4	5.12255577	10.7954953	11.81591496	5.513920871
TTL_5	4.373104146	13.45046729	11.40224833	4.62299342
TTL_6	8.473771659	14.66077463	10.84719929	6.209040497
TTL_7	5.800785764	14.27565817	12.4285153	6.781719935
TTL_8	9.888579387	12.31310466	12.73186803	6.615059817
<b>miss ratio GAIN %</b>	89.38921541	76.63091998	67.65873079	67.79121659

Πίνακας 7: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 20 κόμβων

	<b>miss_ratio % 50m range</b>	<b>miss_ratio % 100m range</b>	<b>miss_ratio % 200m range</b>	<b>miss_ratio % 300m range</b>
NO_TTL	25.02114463	18.75799512	19.13550405	8.32037325
TTL_1	6.188704768	14.63012192	15.86977504	9.173981397
TTL_2	7.216494845	18.69904289	16.98539304	15.86977504
TTL_3	10.51802866	13.01805675	13.96431342	6.058235064
TTL_4	10.7243983	15.33901046	16.7037996	6.744316587
TTL_5	14.8581355	15.37029781	16.6055958	6.950331034
TTL_6	15.71167112	20.77891791	17.74052683	5.124068098
TTL_7	15.73975519	20.30888031	20.55513878	6.252439092
TTL_8	21.91882835	23.29848907	17.3861875	5.978139639
<b>miss ratio GAIN %</b>	75.26610049	30.59995661	27.02406279	38.41540585

Πίνακας 8: Πίνακας βελτίωσης του miss ratio για πειράματα 30 κόμβων

7.2.8.5.2. Βελτίωση της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio

Σαν μέση καθυστέρηση στη μετάδοση των δεδομένων ορίζουμε μέσο χρόνο παράδοσης ενός πακέτου δεδομένων.

7.2.8.5.2.1.1. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)
NO TTL	93.3707563	12.97598125	68.2743083	7.67370966
TTL_0.1	100.7179837	4.08719346	69.2122619	0.756590614
TTL_0.3	89.44608605	3.966901923	76.13546945	0.252900922
TTL_0.5	93.93867011	0.257566001	61.46461249	6.647398844
TTL_1	93.10766773	1.94235589	58.74761365	1.733736281
TTL_2	90.9870809	0.672166208	66.67186147	7.694330032
TTL_3	74.51232263	2.924117931	72.7889419	4.62032945
TTL_4	92.58566434	1.111385527	68.87182448	5.149117468
TTL_5	81.17505835	1.316222442	58.26533721	7.233714506
Delay & miss_ratio GAIN	20.19736631	77.46514985	13.95355718	77.40680378
TTL	Upper Average Layer Delay (200r)	miss_ratio % (200r)	Upper Average Layer Delay (300r)	miss_ratio %(300r)
NO TTL	1.432906643	5.430643226	0.000261981	0.602973282
TTL_0.1	24.70097032	2.959190696	5.995685123	0.170203713
TTL_0.3	13.85028592	3.52552765	1.092611987	0.292062168
TTL_0.5	19.05867987	3.396129694	0.145992959	0.206664944
TTL_1	9.00507872	4.022364564	0.026492765	0.342359166
TTL_2	3.211840888	3.415178571	0.005311356	0.7692713
TTL_3	4.078491999	3.23952536	0.002587823	0.500412712
TTL_4	1.431232877	3.081009296	0.000256785	0.46004342
TTL_5	13.34291626	4.600987783	0.000262789	0.481549333
Delay & miss_ratio GAIN	0.116809174	43.26621787	1.98335323	23.70417836



Πίνακας 9: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 16 κόμβων

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)
NO TTL	82.95330843	4.561671764	52.81175252	8.032928943
TTL_0.1	88.45687412	2.019607843	60.60212173	2.943623882
TTL_0.3	80.2546492	2.693810405	59.23589521	2.386533134
TTL_0.5	90.24490862	0.957061562	59.89914786	2.225886232
TTL_1	86.85975067	1.642575558	63.06295513	8.285817394
TTL_2	76.72921109	4.13354531	49.62857674	11.13905565
TTL_3	79.51110153	7.712339744	34.51113999	8.017854191
TTL_4	78.97742019	5.12189116	60.72386959	11.10868775
TTL_5	90.68422324	5.242673993	32.09543796	10.46173716
Delay & miss_ratio GAIN	3.253226767	40.94686017	34.65253784	0.187661962
TTL	Upper Average Layer Delay (200r)	miss_ratio % (200r)	Upper Average Layer Delay (300r)	miss_ratio %(300r)
NO TTL	4.43898133	5.690582399	0.000339856	1.829191898
TTL_0.1	9.99036519	6.023978468	13.84313799	0.979154881
TTL_0.3	17.12398793	5.019343319	1.795276999	0.996116833
TTL_0.5	2.811135775	4.216038699	0.564879655	1.107508317
TTL_1	2.505945753	4.982628591	0.110398966	1.339696894
TTL_2	0.791208791	3.531001858	0.009371569	1.312117299
TTL_3	1.001622878	3.786567605	0.005908106	1.527388375
TTL_4	3.824432114	4.267076616	0.001395543	1.477381497
TTL_5	2.592749978	4.172901081	0.002169421	1.692294835
Delay & miss_ratio GAIN	82.17589279	37.95007943	-310.6274513	19.23310513

Πίνακας 10: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 20 κόμβων

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)
NO TTL	83.158595	14.63961439	27.49932191	14.58518016
TTL_0.1	85.38894485	4.905025246	24.34736006	13.78324732
TTL_0.3	80.92841986	9.414037347	27.99597554	11.25025875
TTL_0.5	83.18228653	8.183833904	20.61024584	10.92459016
TTL_1	79.64732297	10.34536162	23.21989066	13.70529328
TTL_2	79.52295198	10.61108479	30.83932347	13.72062663
TTL_3	75.66601816	9.256806475	35.88958353	13.02274839
TTL_4	81.60672646	12.91536864	16.39956427	11.52761758
TTL_5	81.60195412	13.07237814	18.87592263	14.39242219

Delay & miss_ratio GAIN	4.371938968	27.51800349	40.36375033	10.71246123
<b>TTL</b>	<b>Upper Average Layer Delay (200r)</b>	<b>miss_ratio % (200r)</b>	<b>Upper Average Layer Delay (300r)</b>	<b>miss_ratio %(300r)</b>
NO TTL	0.002435358	6.239265704	-	-
TTL_0.1	0.634318883	7.421565683	-	-
TTL_0.3	0.254133497	4.395696756	-	-
TTL_0.5	0.02286742	4.035603417	-	-
TTL_1	0.010122275	3.942771585	-	-
TTL_2	0.001711121	4.004753745	-	-
TTL_3	0.023245029	4.160999306	-	-
TTL_4	0.017271259	4.865514063	-	-
TTL_5	0.106142477	4.111658089	-	-
Delay & miss_ratio GAIN	29.73842648	35.81370092	-	-

Πίνακας 11: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 30 κόμβων

7.2.8.5.2.1.2. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint».

<b>TTL</b>	<b>Upper Average Layer Delay (50r)</b>	<b>miss_ratio % (50r)</b>	<b>Upper Average Layer Delay (100r)</b>	<b>miss_ratio %(100r)</b>
NO TTL	82.46796276	7.151418298	59.34562618	10.7259426
TTL_0.1	80.21611374	2.586605081	48.49224714	6.558839933
TTL_0.3	80.48963169	3.52238806	59.48848211	3.407171948
TTL_0.5	87.30214001	0.397398844	59.35788426	3.369086909
TTL_1	93.51082898	11.5333774	60.36495769	10.98113892
TTL_2	90.54568807	9.157509158	61.07335045	10.4910491
TTL_3	88.61471722	4.63190184	63.5820759	5.90534086
TTL_4	98.14861461	10.69338136	53.07745305	11.45113524
TTL_5	80.97288843	8.805330795	41.36711072	16.00865333
Delay & miss_ratio GAIN	2.730574323	63.83087979	18.28842282	38.85068961
<b>TTL</b>	<b>Upper Average Layer Delay (200r)</b>	<b>miss_ratio % (200r)</b>	<b>Upper Average Layer Delay (1300r)</b>	<b>miss_ratio %(300r)</b>
NO TTL	21.26827641	13.72535211	2.236587311	8.3507198
TTL_0.1	28.92714763	7.694151486	18.13256833	2.339633247
TTL_0.3	13.23988543	11.88137634	7.747482095	3.665261109
TTL_0.5	9.010714713	9.510618652	6.466242069	4.768
TTL_1	13.41878173	8.246866191	5.373261253	6.941321942
TTL_2	18.77938614	9.464089074	1.717296649	6.80492547
TTL_3	8.802966987	13.47702367	3.224231066	5.793110615
TTL_4	9.531195492	10.02519798	2.104548769	7.029904494
TTL_5	29.11276596	11.95628255	2.714980267	8.100573352

Delay & miss_ratio GAIN	57.633075	30.70765272	23.21799194	18.51091124
-------------------------	-----------	-------------	-------------	-------------

Πίνακας 12: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 16 κόμβων

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)
NO TTL	71.6564323	7.864214993	52.92550187	16.61465962
TTL_0.1	88.49647681	2.46277205	67.06067164	4.1766018
TTL_0.3	87.67307692	3.46193952	56.97691895	3.882693102
TTL_0.5	77.01872964	0.834454913	42.02380711	9.861607552
TTL_1	69.61306241	5.12255577	41.20436492	10.7954953
TTL_2	69.12374405	4.373104146	47.74703251	13.45046729
TTL_3	73.57394002	8.473771659	36.68190765	14.66077463
TTL_4	86.24110866	5.800785764	31.84810436	14.27565817
TTL_5	79.89210062	9.888579387	50.47009008	12.31310466
Delay & miss_ratio GAIN	3.534488346	44.39236275	9.784450168	19.04458112
TTL	Upper Average Layer Delay (200r)	miss_ratio % (200r)	Upper Average Layer Delay (300r)	miss_ratio %(300r)
NO TTL	11.47499147	23.02054705	2.236587311	8.3507198
TTL_0.1	13.78761785	7.445137094	8.345608074	2.689665254
TTL_0.3	17.18763484	7.809502314	3.275763317	5.379852744
TTL_0.5	13.89889348	8.233650084	1.422784817	4.534436643
TTL_1	9.993236572	11.81591496	1.158435124	5.513920871
TTL_2	4.548534017	11.40224833	0.562488463	4.62299342
TTL_3	7.24189009	10.84719929	0.306762087	6.209040497
TTL_4	4.910561417	12.4285153	0.385479722	6.781719935
TTL_5	6.806094256	12.73186803	0.206923898	6.615059817
Delay & miss_ratio GAIN	60.36132988	50.46925555	74.8505922	44.63958161

Πίνακας 13: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 20 κόμβων

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)
NO TTL	76.84071249	25.02114463	44.09647599	18.75799512
TTL_0.1	76.98276985	6.188704768	47.67297645	14.63012192
TTL_0.3	77.94542986	7.216494845	45.29692043	18.69904289
TTL_0.5	81.60042388	10.51802866	53.74787286	13.01805675
TTL_1	89.09368479	10.7243983	41.16498736	15.33901046
TTL_2	75.63789299	14.8581355	45.63005597	15.37029781
TTL_3	84.49875506	15.71167112	47.52459023	20.77891791

TTL_4	82.43699409	15.73975519	46.39122429	20.30888031
TTL_5	77.28346982	21.91882835	41.3283008	23.29848907
Delay & miss_ratio GAIN	1.565341415	40.6176827	6.647897736	18.22681283
<b>TTL</b>	<b>Upper Average Layer Delay (200r)</b>	<b>miss_ratio % (200r)</b>	<b>Upper Average Layer Delay (300r)</b>	<b>miss_ratio %(300r)</b>
NO TTL	3.519209119	19.13550405	0.04250759	8.32037325
TTL_0.1	2.014427129	15.86977504	1.207816969	9.173981397
TTL_0.3	3.135723598	16.98539304	0.781808529	15.86977504
TTL_0.5	3.711564299	13.96431342	0.146136734	6.058235064
TTL_1	2.939589235	16.7037996	0.139802433	6.744316587
TTL_2	2.488385625	16.6055958	0.034800226	6.950331034
TTL_3	2.683234525	17.74052683	0.024187398	5.124068098
TTL_4	2.174163734	20.55513878	0.328129345	6.252439092
TTL_5	1.487738972	17.3861875	0.024779873	5.978139639
Delay & miss_ratio GAIN	29.29133958	13.22101707	43.0986356	16.46611486

Πίνακας 14: Πίνακας βελτίωσης της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 30 κόμβων

### 7.2.8.5.3. Βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio

Η διαπερατότητα του δικτύου (throughput) αφορά το πλήθος των πακέτων δεδομένων που καταφέρνουμε να παραδώσουμε στη μονάδα του χρόνου.

#### 7.2.8.5.3.1.1. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Layer Throughput	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)	Upper Layer Throughput
NO TTL	93.3707563	12.97598125	0.621020718	68.2743083	7.67370966	1.819069894
TTL_0.1	100.7179837	4.08719346	0.616143945	69.2122619	0.756590614	1.754713061
TTL_0.3	89.44608605	3.966901923	0.86862561	76.13546945	0.252900922	1.400859465
TTL_0.5	93.93867011	0.257566001	0.647940512	61.46461249	6.647398844	1.550254669
TTL_1	93.10766773	1.94235589	0.655063688	58.74761365	1.733736281	1.290756123
TTL_2	90.9870809	0.672166208	0.679287106	66.67186147	7.694330032	2.067025813
TTL_3	74.51232263	2.924117931	0.837569244	72.7889419	4.62032945	1.484956341
TTL_4	92.58566434	1.111385527	0.836172744	68.87182448	5.149117468	1.624648486
TTL_5	81.17505835	1.316222442	0.625999238	58.26533721	7.233714506	1.506168602
Delay & miss_ratio GAIN	20.19736631	77.46514985	34.86977472	2.347071495	-0.26871452	13.63091763

TTL	Upper Average Layer Delay (200r)	miss_ratio % (200r)	Upper Layer Throughput	Upper Average Layer Delay (300r)	miss_ratio %(300r)	Upper Layer Throughput
NO TTL	1.432906643	5.430643226	3.776164948	0.000261981	0.602973282	3.983977234
TTL_0.1	24.70097032	2.959190696	2.941791449	5.995685123	0.170203713	3.911041897
TTL_0.3	13.85028592	3.52552765	3.424752872	1.092611987	0.292062168	3.984269325
TTL_0.5	19.05867987	3.396129694	3.156611985	0.145992959	0.206664944	4.024422987
TTL_1	9.00507872	4.022364564	3.692612197	0.026492765	0.342359166	4.002871987
TTL_2	3.211840888	3.415178571	3.60333338	0.005311356	0.7692713	3.922754343
TTL_3	4.078491999	3.23952536	3.840832224	0.002587823	0.500412712	4.017689266
TTL_4	1.431232877	3.081009296	3.80212139	0.000256785	0.46004342	4.011103174
TTL_5	13.34291626	4.600987783	3.826397563	0.000262789	0.481549333	3.961339865
Delay & miss_ratio GAIN	0.116809174	43.26621787	0.687375756	1.98335323	23.70417836	0.680875876

Πίνακας 15: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 16 κόμβων

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Layer Throughput	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)	Upper Layer Throughput
NO TTL	82.95330843	4.561671764	0.625249504	52.81175252	8.032928943	1.77318786
TTL_0.1	88.45687412	2.019607843	0.833461925	60.60212173	2.943623882	1.555336523
TTL_0.3	80.2546492	2.693810405	0.79720744	59.23589521	2.386533134	1.534725653
TTL_0.5	90.24490862	0.957061562	0.63842704	59.89914786	2.225886232	1.781095183
TTL_1	86.85975067	1.642575558	0.762379275	63.06295513	8.285817394	2.252776775
TTL_2	76.72921109	4.13354531	0.704847764	49.62857674	11.13905565	2.232169738
TTL_3	79.51110153	7.712339744	0.773241283	34.51113999	8.017854191	1.524501798
TTL_4	78.97742019	5.12189116	0.644244273	60.72386959	11.10868775	2.040711156
TTL_5	90.68422324	5.242673993	0.689836675	32.09543796	10.46173716	1.657893463
Delay & miss_ratio GAIN	3.253226767	40.94686017	27.50229073	-13.42011011	72.29047775	0.445938257
TTL	Upper Average Layer Delay (200r)	miss_ratio % (200r)	Upper Layer Throughput	Upper Average Layer Delay (300r)	miss_ratio %(300r)	Upper Layer Throughput
NO TTL	4.43898133	5.690582399	3.776602603	0.000339856	1.829191898	3.917357291
TTL_0.1	9.99036519	6.023978468	3.217511896	13.84313799	0.979154881	3.796568923
TTL_0.3	17.12398793	5.019343319	3.53245336	1.795276999	0.996116833	3.910603987
TTL_0.5	2.811135775	4.216038699	3.604025828	0.564879655	1.107508317	3.918977651
TTL_1	2.505945753	4.982628591	3.742337101	0.110398966	1.339696894	3.928287671
TTL_2	0.791208791	3.531001858	3.806860157	0.009371569	1.312117299	3.948346322
TTL_3	1.001622878	3.786567605	3.800130237	0.005908106	1.527388375	3.921230478

TTL_4	3.824432114	4.267076616	3.844683408	0.001395543	1.477381497	3.944062289
TTL_5	2.592749978	4.172901081	3.843793688	0.002169421	1.692294835	3.918503877
Delay & miss_ratio GAIN	82.17589279	37.95007943	0.801184472	-310.6274513	19.23310513	0.68170954

Πίνακας 16: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 20 κόμβων

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Layer Throughput	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)	Upper Layer Throughput
NO TTL	83.158595	14.63961439	0.835361863	27.49932191	14.58518016	2.09880491
TTL_0.1	85.38894485	4.905025246	0.882716708	24.34736006	13.78324732	2.798992947
TTL_0.3	80.92841986	9.414037347	0.786125499	27.99597554	11.25025875	2.871363639
TTL_0.5	83.18228653	8.183833904	1.013736447	20.61024584	10.92459016	2.0483162
TTL_1	79.64732297	10.34536162	0.645579276	23.21989066	13.70529328	2.227317607
TTL_2	79.52295198	10.61108479	0.63122258	30.83932347	13.72062663	2.108330598
TTL_3	75.66601816	9.256806475	0.685337751	35.88958353	13.02274839	2.363795021
TTL_4	81.60672646	12.91536864	0.748644028	16.39956427	11.52761758	2.568732393
TTL_5	81.60195412	13.07237814	0.78657814	18.87592263	14.39242219	2.467209361
Delay & miss_ratio GAIN	4.371938968	27.51800349	21.3529719	40.36375033	20.9634886	22.39024127
TTL	Upper Average Layer Delay (200r)	miss_ratio % (200r)	Upper Layer Throughput	Upper Average Layer Delay (300r)	miss_ratio %(300r)	Upper Layer Throughput
NO TTL	0.002435358	6.239265704	3.695571555	-	-	-
TTL_0.1	0.634318883	7.421565683	3.984777564	-	-	-
TTL_0.3	0.254133497	4.395696756	3.810600541	-	-	-
TTL_0.5	0.02286742	4.035603417	3.892107651	-	-	-
TTL_1	0.010122275	3.942771585	3.853001719	-	-	-
TTL_2	0.001711121	4.004753745	3.861681394	-	-	-
TTL_3	0.023245029	4.160999306	3.833564303	-	-	-
TTL_4	0.017271259	4.865514063	3.782861612	-	-	-
TTL_5	0.106142477	4.111658089	3.804150231	-	-	-
Delay & miss_ratio GAIN	29.73842648	35.81370092	4.494834878	-	-	-

Πίνακας 17: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 30 κόμβων

7.2.8.5.3.1.2. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint».

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Layer Throughput	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)	Upper Layer Throughput
NO TTL	82.46796276	7.151418298	0.485601673	59.34562618	10.7259426	1.658065365
TTL_0.1	80.21611374	2.586605081	0.45638542	48.49224714	6.558839933	1.746881546
TTL_0.3	80.48963169	3.52238806	0.673125885	59.48848211	3.407171948	2.026154427
TTL_0.5	87.30214001	0.397398844	0.59580966	59.35788426	3.369086909	1.465631772
TTL_1	93.51082898	11.5333774	0.569932854	60.36495769	10.98113892	2.094854632
TTL_2	90.54568807	9.157509158	0.581182795	61.07335045	10.4910491	1.86677012
TTL_3	88.61471722	4.63190184	0.648499806	63.5820759	5.90534086	1.36716168
TTL_4	98.14861461	10.69338136	0.831850166	53.07745305	11.45113524	1.875223269
TTL_5	80.97288843	8.805330795	0.409015166	41.36711072	16.00865333	1.419359853
Delay & miss_ratio GAIN	2.39890862	50.7456016	38.61687946	18.28842282	38.85068961	5.356615186
TTL	Upper Average Layer Delay (200r)	miss_ratio % (200r)	Upper Layer Throughput	Upper Average Layer Delay (1300r)	miss_ratio %(300r)	Upper Layer Throughput
NO TTL	21.26827641	13.72535211	3.373576069	2.236587311	8.3507198	3.658247492
TTL_0.1	28.92714763	7.694151486	3.240070526	18.13256833	2.339633247	2.899954122
TTL_0.3	13.23988543	11.88137634	2.909474415	7.747482095	3.665261109	3.724131132
TTL_0.5	9.010714713	9.510618652	3.480826393	6.466242069	4.768	3.733824546
TTL_1	13.41878173	8.246866191	3.201985561	5.373261253	6.941321942	3.430009367
TTL_2	18.77938614	9.464089074	3.109602679	1.717296649	6.80492547	3.302079586
TTL_3	8.802966987	13.47702367	2.991252376	3.224231066	5.793110615	3.77991232
TTL_4	9.531195492	10.02519798	3.105652669	2.104548769	7.029904494	3.714377809
TTL_5	29.11276596	11.95628255	3.026988261	2.714980267	8.100573352	3.642347848
Delay & miss_ratio GAIN	57.633075	30.70765272	3.179128652	5.90357198	15.81678392	1.534349907

Πίνακας 18: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 16 κόμβων

TTL	Upper Average Layer Delay (50r)	miss_ratio % (50r)	Upper Layer Throughput	Upper Average Layer Delay (100r)	miss_ratio %(100r)	Upper Layer Throughput
NO TTL	71.6564323	7.864214993	0.543748925	52.92550187	16.61465962	2.184066404
TTL_0.1	88.49647681	2.46277205	0.568759514	67.06067164	4.1766018	2.08006714
TTL_0.3	87.67307692	3.46193952	0.771471946	56.97691895	3.882693102	1.554899335
TTL_0.5	77.01872964	0.834454913	0.61494844	42.02380711	9.861607552	1.645562522
TTL_1	69.61306241	5.12255577	0.574872121	41.20436492	10.7954953	2.077232095
TTL_2	69.12374405	4.373104146	0.63091072	47.74703251	13.45046729	1.938272919
TTL_3	73.57394002	8.473771659	0.646381159	36.68190765	14.66077463	2.20186962
TTL_4	86.24110866	5.800785764	0.681582529	31.84810436	14.27565817	2.045247387

TTL_5	79.89210062	9.888579387	0.755981152	50.47009008	12.31310466	2.184837009
Delay & miss_ratio GAIN	3.534488346	44.39236275	16.02978703	4.639373661	25.89011786	0.035283034
<b>TTL</b>	<b>Upper Average Layer Delay (200r)</b>	<b>miss_ratio % (200r)</b>	<b>Upper Layer Throughput</b>	<b>Upper Average Layer Delay (300r)</b>	<b>miss_ratio %(300r)</b>	<b>Upper Layer Throughput</b>
NO TTL	11.47499147	23.02054705	2.932665189	2.236587311	8.3507198	3.658247492
TTL_0.1	13.78761785	7.445137094	3.058831221	8.345608074	2.689665254	3.359002563
TTL_0.3	17.18763484	7.809502314	2.703854128	3.275763317	5.379852744	3.783065218
TTL_0.5	13.89889348	8.233650084	2.741914989	1.422784817	4.534436643	3.183178458
TTL_1	9.993236572	11.81591496	3.376113485	1.158435124	5.513920871	3.766176425
TTL_2	4.548534017	11.40224833	3.51302216	0.562488463	4.62299342	3.79350328
TTL_3	7.24189009	10.84719929	3.24482976	0.306762087	6.209040497	3.722328124
TTL_4	4.910561417	12.4285153	3.348715214	0.385479722	6.781719935	3.709797235
TTL_5	6.806094256	12.73186803	3.221881099	0.206923898	6.615059817	3.755906145
Delay & miss_ratio GAIN	60.36132988	50.46925555	19.78940431	74.8505922	44.63958161	3.697283706

Πίνακας 19: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 20 κόμβων

<b>TTL</b>	<b>Upper Average Layer Delay (50r)</b>	<b>miss_ratio % (50r)</b>	<b>Upper Layer Throughput</b>	<b>Upper Average Layer Delay (100r)</b>	<b>miss_ratio %(100r)</b>	<b>Upper Layer Throughput</b>
NO TTL	76.84071249	25.02114463	0.78827126	44.09647599	18.75799512	1.797364876
TTL_0.1	76.98276985	6.188704768	0.661666747	47.67297645	14.63012192	1.936677253
TTL_0.3	77.94542986	7.216494845	0.581632582	45.29692043	18.69904289	2.063833683
TTL_0.5	81.60042388	10.51802866	0.632647249	53.74787286	13.01805675	1.696801267
TTL_1	89.09368479	10.7243983	0.841711239	41.16498736	15.33901046	1.768134973
TTL_2	75.63789299	14.8581355	0.818171305	45.63005597	15.37029781	1.926038932
TTL_3	84.49875506	15.71167112	0.665551255	47.52459023	20.77891791	1.888529776
TTL_4	82.43699409	15.73975519	0.707675385	46.39122429	20.30888031	1.742177894
TTL_5	77.28346982	21.91882835	0.707857432	41.3283008	23.29848907	1.776675008
Delay & miss_ratio GAIN	1.565341415	40.6176827	3.793116262	6.647897736	18.22681283	1.626264293
<b>TTL</b>	<b>Upper Average Layer Delay (200r)</b>	<b>miss_ratio % (200r)</b>	<b>Upper Layer Throughput</b>	<b>Upper Average Layer Delay (300r)</b>	<b>miss_ratio %(300r)</b>	<b>Upper Layer Throughput</b>
NO TTL	3.519209119	19.13550405	3.15837991	0.04250759	8.32037325	3.66008416
TTL_0.1	2.014427129	15.86977504	3.225809123	1.207816969	9.173981397	3.621588035
TTL_0.3	3.135723598	16.98539304	3.161135	0.781808529	15.86977504	3.767388002
TTL_0.5	3.711564299	13.96431342	3.336091341	0.146136734	6.058235064	3.746133706
TTL_1	2.939589235	16.7037996	3.198393765	0.139802433	6.744316587	3.689421188
TTL_2	2.488385625	16.6055958	3.271995123	0.034800226	6.950331034	3.729360335



TTL_3	2.683234525	17.74052683	3.249876345	0.024187398	5.124068098	3.785755092
TTL_4	2.174163734	20.55513878	3.098724326	0.328129345	6.252439092	3.729142245
TTL_5	1.487738972	17.3861875	3.201778211	0.024779873	5.978139639	3.739799743
Delay & miss_ratio GAIN	16.47017455	12.70781498	1.266910757	43.0986356	38.41540585	3.433553068

Πίνακας 20: Πίνακας βελτίωσης της διαπερατότητας του δικτύου και της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων δεδομένων και του miss\_ratio για πειράματα 30 κόμβων

#### 7.2.8.6. Συμπεράσματα από την χρήση του TTL

Στην προηγούμενη παράγραφο περιγράψαμε τα αποτελέσματα από τα πειράματα που εκτελέσαμε με την νέα υλοποίηση που προτείνουμε για τον τρόπο λειτουργίας της Route Cache των κόμβων που χρησιμοποιούν το δυναμικό πρωτόκολλο δρομολόγησης πηγής DSR για την δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων σε ένα ασύρματο δίκτυο ad-hoc.

##### 7.2.8.6.1. Κέρδος στην απόδοση του αλγορίθμου

Παρουσιάζουμε τους πίνακες κέρδους του αλγορίθμου με την εφαρμογή του TTL. Στο σημείο αυτό παραθέτουμε τους πίνακες με τα ποσοστά κέρδους και στο παράρτημα Γ τις γραφικές αναπαραστάσεις αυτών.

Billiard mobility model	50m	100m	200m	300m
miss ratio GAIN % (16nodes)	77.46514985	96.7043199	45.50938862	71.77259463
miss ratio GAIN % (20nodes)	79.01949961	72.29047775	37.95007943	46.47063102
miss ratio GAIN % (30nodes)	66.49484669	25.09801016	36.80712166	0
Waypoint mobility model	50m	100m	200m	300m
miss ratio GAIN % (16nodes)	94.4430765	68.23428882	43.94204664	71.98285534
miss ratio GAIN % (20nodes)	89.38921541	76.63091998	67.65873079	67.79121659
miss ratio GAIN % (30nodes)	75.26610049	30.59995661	27.02406279	38.41540585

Πίνακας 21: Κέρδος του miss ratio

Billiard mobility model	50m	100m	200m	300m
miss ratio GAIN % (16nodes)	77.46515	77.4068038	43.2662179	23.7041784
Average Delay GAIN % (16nodes)	20.197366	13.9535572	0.11680917	1.98335323
miss ratio GAIN % (20nodes)	40.94686	0.18766196	37.9500794	19.2331051
Average Delay GAIN % (20nodes)	3.2532268	34.6525378	82.1758928	-310.62745
miss ratio GAIN % (30nodes)	27.518003	10.7124612	35.8137009	0
Average Delay GAIN % (30nodes)	4.371939	40.3637503	29.7384265	0
Waypoint mobility model	50m	100m	200m	300m

miss ratio GAIN % (16nodes)	63.83088	38.8506896	30.7076527	18.5109112
Average Delay GAIN % (16nodes)	2.7305743	18.2884228	57.633075	23.2179919
miss ratio GAIN % (20nodes)	44.392363	19.0445811	50.4692555	44.6395816
Average Delay GAIN % (20nodes)	3.5344883	9.78445017	60.3613299	74.8505922
miss ratio GAIN % (30nodes)	40.617683	18.2268128	13.2210171	16.4661149
Average Delay GAIN % (30nodes)	1.5653414	6.64789774	29.2913396	43.0986356

Πίνακας 22: Κέρδος του miss ratio και του Average Delay

Billiard mobility model	50m	100m	200m	300m
miss ratio GAIN % (16nodes)	77.46515	-0.2687145	43.2662179	23.7041784
Average Delay GAIN % (16nodes)	20.197366	2.3470715	0.11680917	1.98335323
Throughput GAIN % (16nodes)	34.869775	13.6309176	0.68737576	0.68087588
miss ratio GAIN % (20nodes)	40.94686	72.2904778	37.9500794	19.2331051
Average Delay GAIN % (20nodes)	3.2532268	-13.42011	82.1758928	-310.62745
Throughput GAIN % (20nodes)	27.502291	0.44593826	0.80118447	0.68170954
miss ratio GAIN % (30nodes)	27.518003	20.9634886	35.8137009	0
Average Delay GAIN % (30nodes)	4.371939	40.3637503	29.7384265	0
Throughput GAIN % (30nodes)	21.352972	22.3902413	4.49483488	0
Waypoint mobility model	50m	100m	200m	300m
miss ratio GAIN % (16nodes)	50.745602	38.8506896	30.7076527	15.8167839
Average Delay GAIN % (16nodes)	2.3989086	18.2884228	57.633075	5.90357198
Throughput GAIN % (16nodes)	38.616879	5.35661519	3.17912865	1.53434991
miss ratio GAIN % (20nodes)	44.392363	25.8901179	50.4692555	44.6395816
Average Delay GAIN % (20nodes)	3.5344883	4.63937366	60.3613299	74.8505922
Throughput GAIN % (20nodes)	16.029787	0.03528303	19.7894043	3.69728371
miss ratio GAIN % (30nodes)	40.617683	18.2268128	12.707815	38.4154058
Average Delay GAIN % (30nodes)	1.5653414	6.64789774	16.4701745	43.0986356
Throughput GAIN % (30nodes)	3.7931163	1.62626429	1.26691076	3.43355307

Πίνακας 23: Κέρδος του miss ratio, του Average Delay και του Throughput

Στους παραπάνω πίνακες αναφέρεται το κέρδος από την χρήση της παραμέτρου TTL. Εμφανίζουμε τις περιπτώσεις όπου παρατηρείται: α) μείωση της συνολική καθυστέρησης μετάδοσης των δεδομένων, β) αύξηση της διαπερατότητας του δικτύου (throughput) και γ) μείωση του ποσοστού λανθασμένων πληροφοριών που υπάρχουν σε μία Route Cache.

Από τους πίνακες αυτούς μπορούμε να δούμε την βελτίωση στην απόδοση του αλγόριθμου δρομολόγησης με την χρήση της παραμέτρου TTL για την βέλτιστη λειτουργία των Route Caches των κόμβων που συμμετέχουν στην διαδικασία της

δρομολόγησης. Το κέρδος που επιτυγχάνουμε δεν είναι πάντοτε το ίδιο αλλά αλλάζει όταν λαμβάνουμε υπόψη μας ξεχωριστά κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους ή όλες μαζί. Η βελτίωση μίας από αυτές δεν συνεπάγεται βελτίωση όλων. Αυτό το γεγονός σημαίνει ότι η μελέτη στην βελτίωση της απόδοσης πρέπει να γίνεται προσεκτικά λαμβάνοντας υπόψη πολλές παραμέτρους του δικτύου.

#### 7.2.8.6.2. Βέλτιστη απόδοση του αλγορίθμου δρομολόγησης

Στις παραπάνω παραγράφους παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα από την βελτίωση της απόδοσης του αλγορίθμου με την χρήση της παραμέτρου TTL στις Route Caches των κόμβων ενός δικτύου ad-hoc. Ξεχωρίζουμε τις περιπτώσεις σε σχέση με τις παραμέτρου που εξετάζουμε κάθε φορά. Παρατηρούμε ότι ανάλογα με τις παραμέτρους που παίρνουμε υπόψη μας τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η βέλτιστη απόδοση του αλγορίθμου παρατηρείται για διαφορετική επιλογή της παραμέτρου TTL. Για κάθε διαφορετική ομάδα πειραμάτων είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση διαφορετικών τιμών του TTL για να επιτύχουμε την βέλτιστη απόδοση. Επίσης διαφορετικό TTL πρέπει να επιλέξουμε για να επιτύχουμε την βέλτιστη απόδοση και για περιπτώσεις όπου εξετάζουμε διαφορετικές παραμέτρους κάθε φορά. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε την διακύμανση στην απόδοση του αλγορίθμου κατά την επιλογή χρήση μία συγκεκριμένης ομάδας τιμών του TTL. Η ανάλυση αυτή θα γίνει για τις παρακάτω τιμές του TTL

	hop_1	hop_2	hop_2	hop_3	hop_5	hop_6	hop_7	hop_8
<b>TTL_4</b>	2.9907	1.4744	0.95782	0.69315	0.5294	0.41521	0.32768	0.25317

Θα περιγράψουμε την βελτίωση της χρήσης σε πειράματα διαφορετικού αριθμού κόμβων, μοντέλου κίνησης και εμβέλειας του ασύρματου μέσου εξετάζοντας τις παραμέτρους: α) τη συνολική καθυστέρησης μετάδοσης των δεδομένων, β) την αύξηση της διαπερατότητας του δικτύου (throughput) και γ) το ποσοστό λανθασμένων πληροφοριών που υπάρχουν σε μία Route Cache.

Billiard mobility model	Average Delay	miss_ratio %	Throughput
NO TTL	93.3707563	12.97598125	0.621020718
TTL_1	93.10766773	1.94235589	0.655063688
GAIN (%) 16nodes 50 m	0.281767634	85.03114445	-5.481776769
NO TTL	68.2743083	7.67370966	1.819069894

TTL_1	58.74761365	1.733736281	1.290756123
GAIN (%) 16nodes 100 m	13.95355718	77.40680378	29.04307159
NO TTL	1.432906643	5.430643226	3.776164948
TTL_1	9.00507872	4.022364564	3.692612197
GAIN (%) 16nodes 200 m	-528.4483894	25.93207845	2.212635104
NO TTL	0.000261981	0.602973282	3.983977234
TTL_1	0.026492765	0.342359166	4.002871987
GAIN (%) 16nodes 300 m	-10012.45851	43.22150316	-0.474268598
<b>Billiard mobility model</b>			
<b>Average Delay</b>	<b>miss_ratio %</b>	<b>Throughput</b>	
NO TTL	82.95330843	4.561671764	0.625249504
TTL_1	86.85975067	1.642575558	0.762379275
GAIN (%) 20nodes 50 m	-4.709206071	63.99180731	-21.93200804
NO TTL	52.81175252	8.032928943	1.77318786
TTL_1	63.06295513	8.285817394	2.252776775
GAIN (%) 20nodes 100 m	-19.41083589	-3.1481475	-27.04670643
NO TTL	4.43898133	5.690582399	3.776602603
TTL_1	2.505945753	4.982628591	3.742337101
GAIN (%) 20nodes 200 m	43.54682827	12.44079706	0.907310243
NO TTL	0.000339856	1.829191898	3.917357291
TTL_1	0.110398966	1.339696894	3.928287671
GAIN (%) 20nodes 300 m	-32384.02286	26.76017782	-0.279024333
<b>Billiard mobility model</b>			
<b>Average Delay</b>	<b>miss_ratio %</b>	<b>Throughput</b>	
NO TTL	83.158595	14.63961439	0.835361863
TTL_1	79.64732297	10.34536162	0.645579276
GAIN (%) 30nodes 50 m	4.222380172	29.33310028	22.71860808
NO TTL	27.49932191	14.58518016	2.09880491
TTL_1	23.21989066	13.70529328	2.227317607
GAIN (%) 30nodes 100 m	15.56195189	6.032746101	-6.123136875
NO TTL	0.002435358	6.239265704	3.695571555
TTL_1	0.010122275	3.942771585	3.853001719
GAIN (%) 30nodes 200 m	-315.6380975	36.80712166	-4.259967945
NO TTL	0.000428694	2.833749653	3.887828114
TTL_1	0.010247001	1.572195787	3.936173155
GAIN (%) 30nodes 300 m	-2290.283695	44.51888912	-1.243497375

Πίνακας 24: Απόδοση του πρωτοκόλλου με την χρήση σταθερού TTL για το μοντέλο κίνησης billiard

Waypoint mobility model	Average Delay	miss_ratio %	Throughput
NO TTL	82.46796276	7.151418298	0.485601673
TTL_1	93.51082898	11.5333774	0.569932854
GAIN (%) 16nodes 50 m	-13.39049232	-61.27398671	-17.36632847
NO TTL	59.34562618	10.7259426	1.658065365
TTL_1	60.36495769	10.98113892	2.094854632
GAIN (%) 16nodes 100 m	-1.717618595	-2.379243753	-26.34330808
NO TTL	21.26827641	13.72535211	3.373576069
TTL_1	13.41878173	8.246866191	3.201985561
GAIN (%) 16nodes 200 m	36.90705598	39.9150847	5.086309145
NO TTL	2.236587311	8.3507198	3.658247492
TTL_1	5.373261253	6.941321942	3.430009367
GAIN (%) 16nodes 300 m	-140.2437511	16.87756135	6.239001752
<b>Waypoint mobility model</b>			
NO TTL	71.6564323	7.864214993	0.543748925
TTL_1	69.61306241	5.12255577	0.574872121
GAIN (%) 20nodes 50 m	2.851621027	34.8624653	-5.723817461
NO TTL	52.92550187	16.61465962	2.184066404
TTL_1	41.20436492	10.7954953	2.077232095
GAIN (%) 20nodes 100 m	22.14648239	35.02427646	4.891532085
NO TTL	11.47499147	23.02054705	2.932665189
TTL_1	9.993236572	11.81591496	3.376113485
GAIN (%) 20nodes 200 m	12.91290635	48.6723103	-15.12099975
NO TTL	2.236587311	8.3507198	3.658247492
TTL_1	1.158435124	5.513920871	3.766176425
GAIN (%) 20nodes 300 m	48.2052358	33.97071147	-2.950290623
<b>Waypoint mobility model</b>			
NO TTL	76.84071249	25.02114463	0.78827126
TTL_1	89.09368479	10.7243983	0.841711239
GAIN (%) 30nodes 50 m	-15.9459379	57.13865828	-6.779389493

NO TTL	44.09647599	18.75799512	1.797364876
TTL_1	41.16498736	15.33901046	1.768134973
GAIN (%) 30nodes 100 m	6.647897736	18.22681283	1.626264293
NO TTL	3.519209119	19.13550405	3.15837991
TTL_1	2.939589235	16.7037996	3.198393765
GAIN (%) 30nodes 200 m	16.47017455	12.70781498	-1.266910757
NO TTL	0.04250759	8.32037325	3.66008416
TTL_1	0.139802433	6.744316587	3.689421188
GAIN (%) 30nodes 300 m	-228.8881701	18.94213896	-0.801539701

Πίνακας 25: Απόδοση του πρωτοκόλλου με την χρήση σταθερού TTL για το μοντέλο κίνησης waypoint

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε καταρχήν ότι η χρήση του συγκεκριμένου TTL δεν έχει πάντα θετικά αποτελέσματα και δεν καταφέρνει να βελτιστοποιήσει όλες τις παραμέτρους που εξετάζουμε. Παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να δείχουν εάν εξετάσουμε ξεχωριστά τα αποτελέσματα από όλα τα πειράματα για κάθε διαφορετική ομάδα τιμών του TTL για διαδρομές δρομολόγησης.

Στα παραπάνω γραφήματα εμφανίζουμε την βελτίωση των διαφόρων παραμέτρων με την χρήση του TTL\_4, σε σχέση με τις τιμές τους χωρίς την χρήση της παραμέτρου TTL. Οι θετικοί αριθμοί εμφανίζουν θετικά αποτελέσματα και οι αρνητικοί αστοχία του πρωτοκόλλου, και παρουσιάζουν αρνητική βελτίωση στην απόδοση του πρωτοκόλλου.

#### 7.2.8.6.3. Μελέτη των αποτελεσμάτων

Είναι ιδιαίτερα δύσκολο να εντοπίσουμε τις τιμές του TTL για τις οποίες μπορούμε να έχουμε βελτίωση όλων των παραμέτρων που εξετάζουμε. Στα συγκεκριμένα πειράματα που εξετάζουμε είναι φανερό ότι αναλύοντας την διακύμανση των τιμών τριών μόνο παραμέτρων τα αποτελέσματα δεν είναι πάντα θετικά. Αν και στην πλειονότητα των περιπτώσεων καταφέρνουμε σε σημαντικό βαθμό να μειώσουμε το miss ratio είναι δυσκολότερο να καταφέρουμε αυτό να το συνδυάσουμε με μείωση στη μέση καθυστέρηση των πακέτων και αύξηση της διαπερατότητας του δικτύου.

Από τα γραφήματα που υπάρχουν στο παράρτημα Γ μπορούμε να δείξουμε ότι η μέση καθυστέρηση όταν χρησιμοποιούμε την παράμετρο του TTL στον αλγόριθμο δρομολόγησης δεν δίνει καλά αποτελέσματα σε σχέση με το miss ratio. Δεν παρατηρούνται δηλαδή πειράματα όπου να παίρνουμε την ελάχιστη μέση καθυστέρηση

στις περιπτώσεις που παρουσιάζεται το ελάχιστο miss ratio. Τα πράγματα είναι διαφορετικά εάν συγκρίνουμε την διαπερατότητα του δικτύου (throughput) και το miss ratio. Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι σε πάρα πολλές περιπτώσεις παρουσιάζεται το μέγιστο throughput όταν έχουμε το ελάχιστο miss ratio.

Για να μπορέσουμε να το εξηγήσουμε αυτό ανατρέξαμε στο μοντέλο του DSR που έχει υλοποιηθεί στο OPNET. Στο μοντέλο αυτό δημιουργούνται πακέτα, για τα οποία επιλέγεται τυχαία ένας προορισμός και προωθούνται στο επίπεδο δρομολόγηση με σκοπό να ανακαλυφθεί μία διαδρομή προς αυτόν τον προορισμό. Εκεί αναλαμβάνει ο DSR ελέγχοντας αρχικά εάν μία διαδρομή υπάρχει διαθέσιμη στην Route Cache, και εάν όχι ενεργοποιεί τον μηχανισμό εύρεσης της ζητούμενης διαδρομής. Το πακέτο σε αυτή την περίπτωση αποθηκεύεται σε μία ουρά προτεραιότητας, όπου παραμένει έως ότου βρεθεί η διαδρομή για να μεταδοθεί. Η δομή αυτή εξυπηρετεί τα δεδομένα εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο FIFO, και έχει αναλυθεί στο σχετικό κεφάλαιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πακέτα να εξυπηρετούνται με την σειρά με την οποία εισέρχονται στην ουρά προτεραιότητας. Εάν την χρονική στιγμή που πρέπει να εξυπηρετηθεί ένα πακέτο η ζητούμενη για αυτό διαδρομή έχει ανακαλυφθεί τότε το πακέτο θα προωθηθεί στο επίπεδο του ασύρματου μέσου για να μεταδοθεί. Εάν την στιγμή αυτή δεν υπάρχει ακόμα κάποια διαθέσιμη διαδρομή το πακέτο θα μεταφερθεί στο τέλος της ουράς αναμένοντας να εξυπηρετηθεί. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στις περιπτώσεις όπου, η αναζήτηση μίας διαδρομής είναι χρονοβόρα και τα δεδομένα στην δομή αποθήκευσης των πακέτων (buffer) είναι πολλά, να αυξάνεται δραματικά η καθυστέρηση δρομολόγησης των πακέτων και φυσικά και η μέση καθυστέρηση παράδοσης αυτών στους προορισμούς τους. Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη παράμετρος αν και δίνει μια καλή εικόνα για την λειτουργία της τεχνικής που μελετάμε δεν μπορεί να μας οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα από μόνη της.

#### *7.2.8.6.4. Μείωση του αριθμού των λαθών δρομολόγησης*

Παραπάνω μελετήσαμε την απόδοση του πρωτοκόλλου με ή χωρίς την χρήση της παραμέτρου TTL. Εκτελέσαμε διάφορα πειράματα προσπαθώντας να εντοπίσουμε τις περιπτώσεις που παρατηρείται η μεγαλύτερη βελτίωση στην απόδοση του αλγορίθμου δρομολόγησης. Είδαμε ότι δεν είναι απλό και εύκολο να κρίνουμε την απόδοση του πρωτοκόλλου από τα αποτελέσματα αλλά πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας και άλλες

παραμέτρους όπως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της υλοποίησης του μοντέλου του DSR στο OPNET.

Στην πλειονότητα όμως των πειραμάτων παρατηρούμε ότι το ποσοστό των λανθασμένων πληροφοριών δρομολόγησης που υπάρχουν στις Route Cache μειώνεται. Οι σχετικοί πίνακες δείχνουν ότι η χρήση της τεχνικής αυτής οδηγεί τελικά στην καλύτερη χρήση των Route Caches που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος δρομολόγησης.

Στο σημείο αυτό θα αναλύσουμε τα λάθη δρομολόγησης και θα δείξουμε ότι με την συγκεκριμένη τεχνική όχι μόνο μειώνουμε τον αριθμό των λαθών αλλά και περιορίζουμε σημαντικά τα λάθη δρομολόγησης τα οποία κοστίζουν στην απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης.

#### *7.2.8.6.5. Λάθη δρομολόγησης*

Σαν λάθος δρομολόγησης ορίζουμε την περίπτωση εκείνη κατά την οποία ο αλγόριθμος δρομολόγησης πάρει απόφαση να χρησιμοποιήσει μία διαδρομή μέσω της οποίας το πακέτο δεδομένων δεν θα μπορέσει να φτάσει τελικά στον προορισμό του. Αυτό σημαίνει ότι μία σύνδεση πάνω στη συγκεκριμένη διαδρομή είναι διακομμένη και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προώθηση του πακέτου. Η αντίδραση του DSR στο γεγονός αυτό είναι να δημιουργηθεί ένα κατάλληλο μήνυμα ελέγχου το οποία μεταδίδεται πίσω στον κόμβο προέλευσης του πακέτου δεδομένων. Ο κόμβος προέλευσης του πακέτου αναλαμβάνει να ανακαλύψει μία νέα διαδρομή για να μπορέσει το πακέτο να φτάσει στον προορισμό του.

#### *7.2.8.6.6. Καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων δεδομένων*

Σε προηγούμενη παράγραφο είχαμε αναλύσει το χρόνο δρομολόγησης, δηλαδή την χρονική περίοδο που ένα πακέτο δεδομένων αναμένει να εξυπηρετηθεί με μία διαδρομή από το επίπεδο δρομολόγησης. Η συνολική καθυστέρηση στη μετάδοση του πακέτου εξαρτάται από τον χρόνο αυτό συν το χρόνο που απαιτείται για την προώθηση του πακέτου στον προορισμό του. Στην περίπτωση που συμβεί κάποιο λάθος ο χρόνος αυτός αυξάνει αφού το πακέτο πρέπει να περιμένει να ανακαλυφθεί μία νέα διαδρομή. Λάθη στη μετάδοση πακέτων δεδομένων που συμβαίνουν σε απομακρυσμένες συνδέσεις από τον κόμβο προέλευσης του πακέτου, οδηγούν σε αύξηση της συνολικής



καθυστέρησης μετάδοσης. Συνεπώς τα λάθη δρομολόγησης επηρεάζουν σημαντικά τον χρόνο αυτό.

Με την χρήση της παραμέτρου TTL αποτρέπουμε το πρωτόκολλο να χρησιμοποιεί διαδρομές για τις οποίες έχει περάσει ο χρόνος ζωής τους και είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν ένα λάθος στην μετάδοση των δεδομένων. Ανατρέχοντας στις τιμές που παίρνει η παράμετρος αυτή για διαδρομές διαφορετικού μήκους παρατηρούμε ότι διαδρομές μεγάλου μήκους έχουν γενικά μικρότερο χρόνο ζωής. Οι διαδρομές αυτές με την χρήση της τεχνικής αυτής μαρκάρονται ως μη έγκυρες πολύ γρηγορότερα από ότι διαδρομές μικρού μήκους.

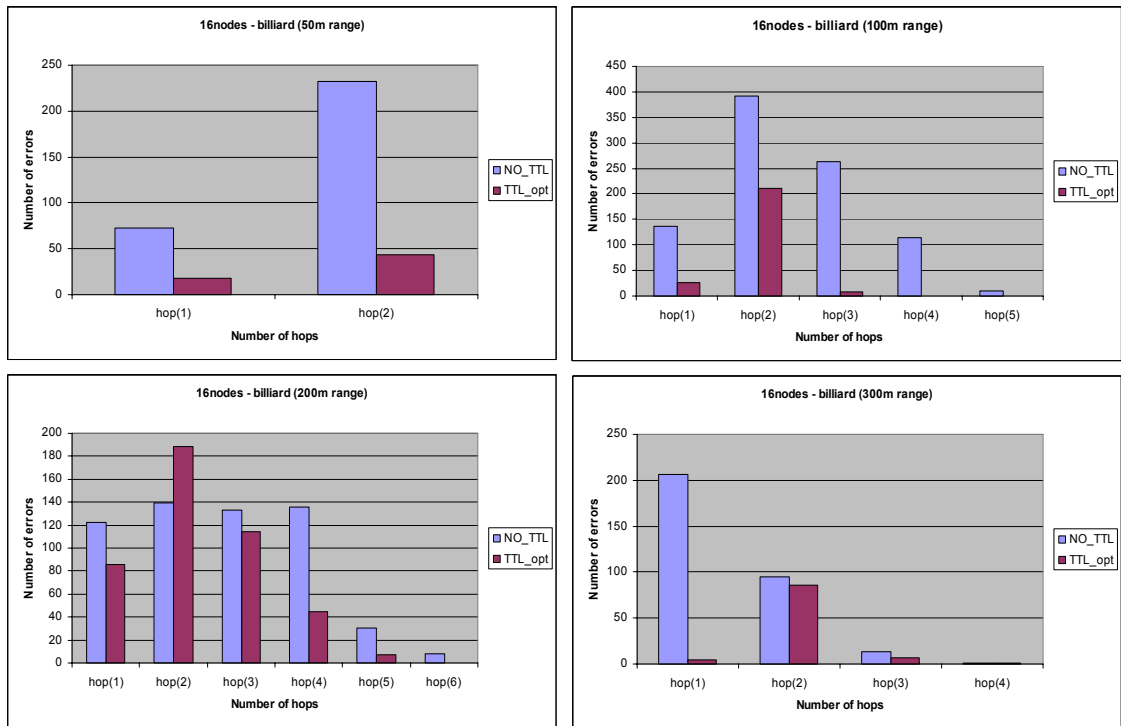
Με τον τρόπο αυτό αποτρέπουμε τον αλγόριθμο δρομολόγησης να χρησιμοποιεί μεγάλες σε μήκος διαδρομές, για μεγάλο χρονικό διάστημα, περιορίζοντας έτσι την πιθανότητα εμφάνισης λαθών δρομολόγησης τα οποία κοστίζουν σε χρόνο. Παρακάτω παρουσιάζουμε τα σχετικά αποτελέσματα για τα πειράματα που εκτελέσαμε.

#### *7.2.8.6.7. Πειραματικά αποτελέσματα*

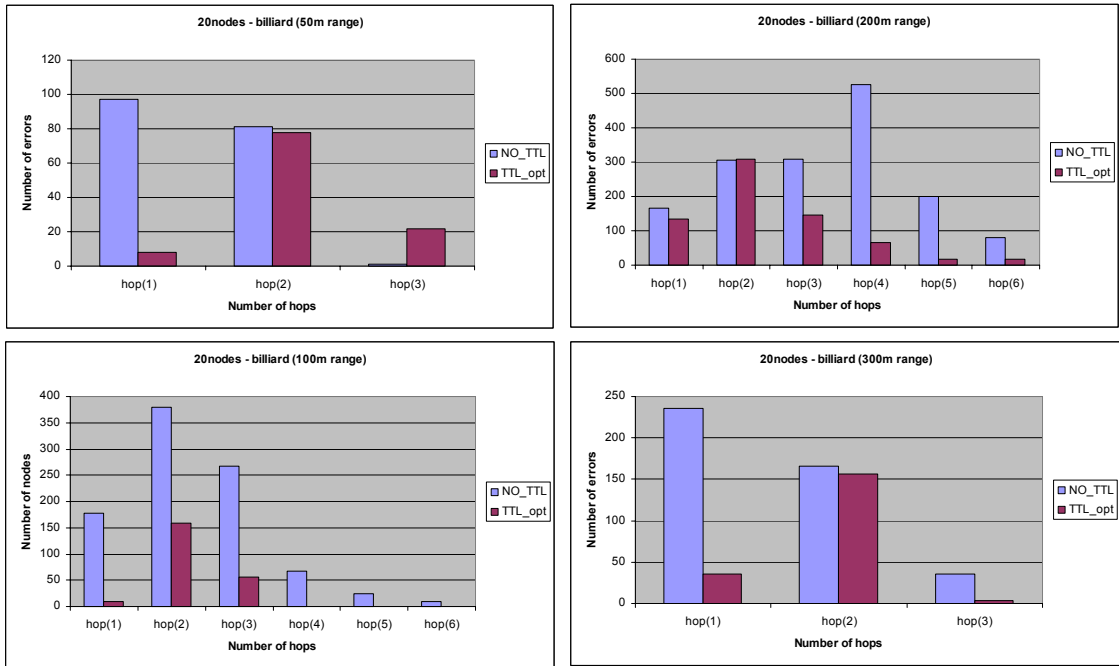
Τα πειραματικά αποτελέσματα αφορούν την μείωση του αριθμού των λαθών που συμβαίνουν σε μία διαδρομή. Στα γραφήματα φαίνεται ο αριθμός των λαθών που συνέβη στις συνδέσεις των διαδρομών δρομολόγησης. Δηλαδή εμφανίζουμε τα λάθη που συνέβησαν στην πρώτη σύνδεση μίας διαδρομής, στην δεύτερη και ούτω καθ' εξής, καθώς και την μείωση αυτών με την χρήση της παραμέτρου TTL. Παρατηρούμε την μείωση των λαθών σε συνδέσεις πολλών hops.

7.2.8.6.8. Δίκτυο κόμβων με χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard»

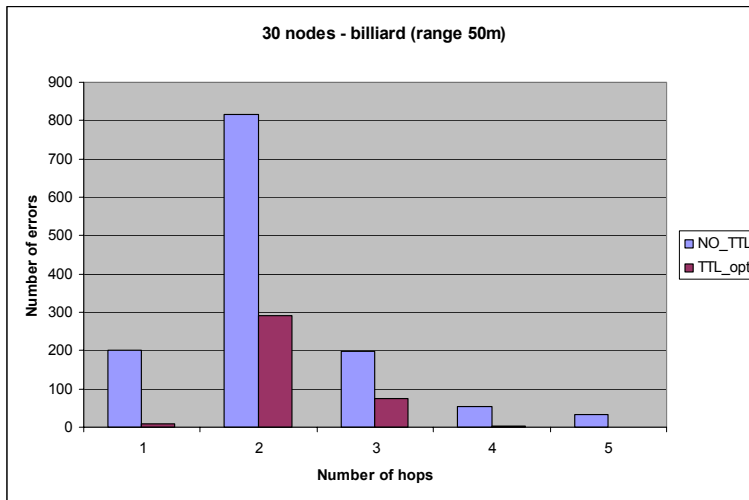
7.2.8.6.8.1. Δίκτυο 16 κόμβων



7.2.8.6.8.2. Δίκτυο 20 κόμβων

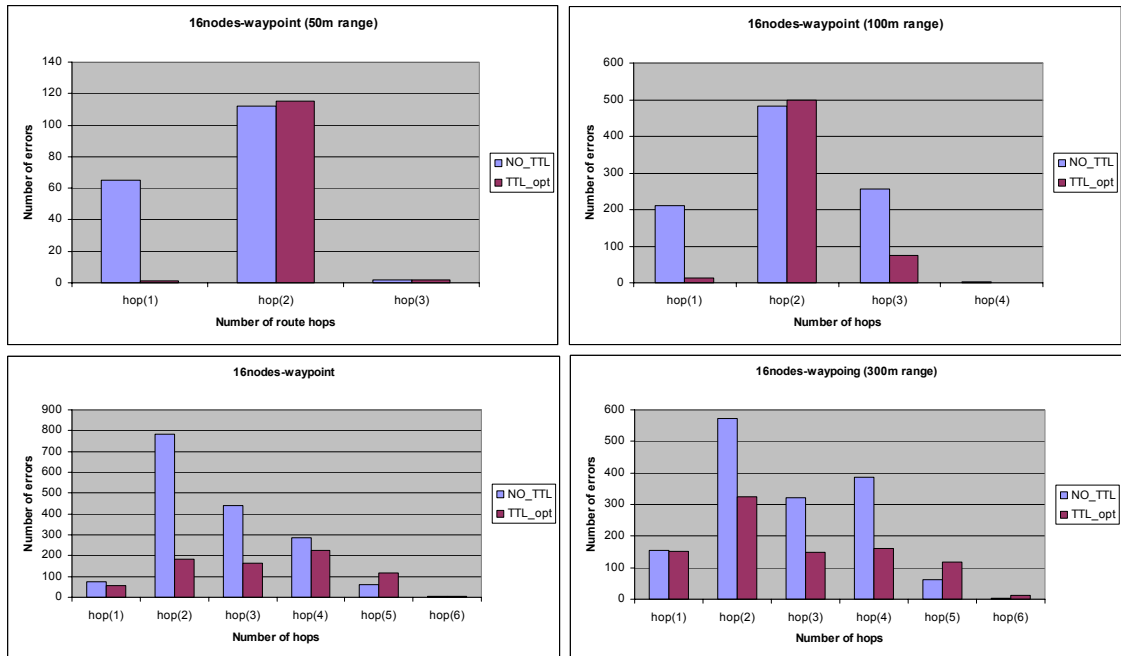


7.2.8.6.8.3. Δίκτυο 30 κόμβων

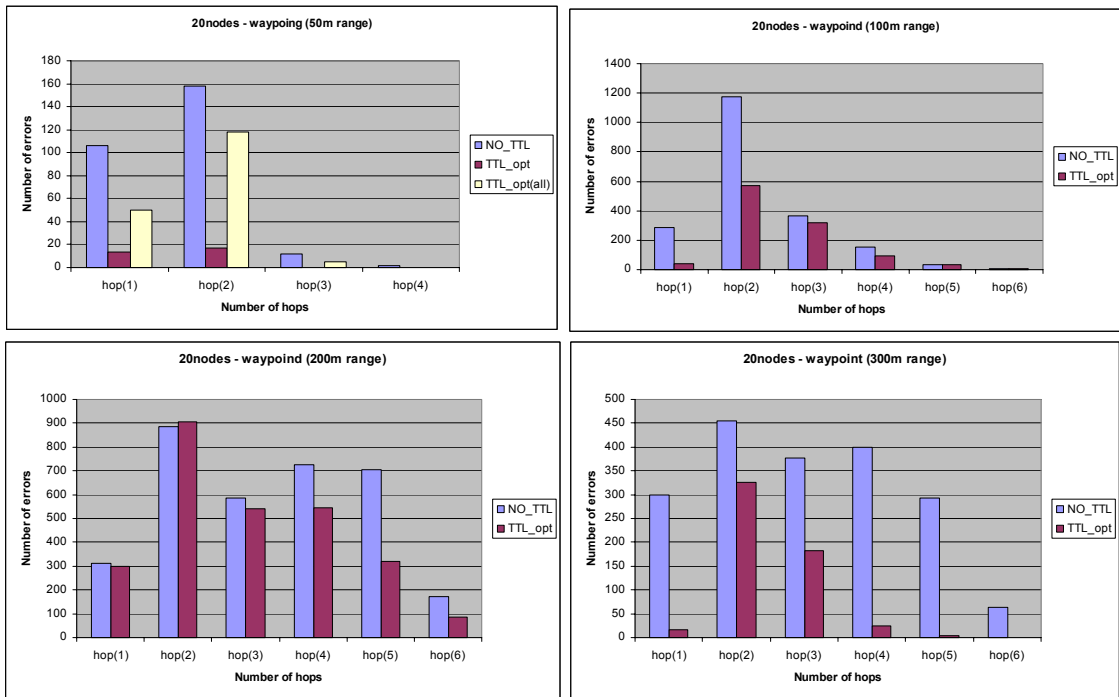


7.2.8.6.9. Δίκτυο κόμβων με χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint»

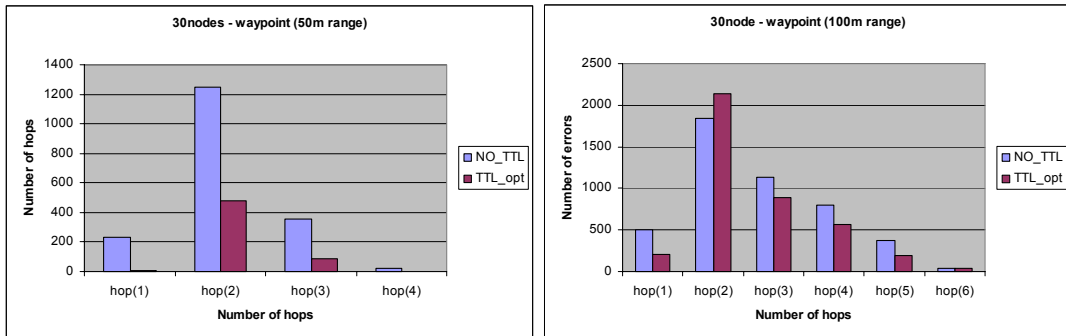
7.2.8.6.9.1. Δίκτυο 16όμβων



7.2.8.6.9.2. Δίκτυο 20όμβων



### 7.2.8.6.9.3. Δίκτυο 30 κόμβων



### 7.2.8.7. Συμπεράσματα

Η χρήση της παραμέτρου TTL, από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη λειτουργία του αλγορίθμου δρομολόγησης. Η τεχνική αυτή αποτρέπει τον αλγόριθμο να χρησιμοποιεί διαδρομές οι οποίες είναι πιθανόν να προκαλέσουν λάθος στο μέλλον. Τα παραπάνω αποτελέσματα μας δίνουν μία εικόνα για την βελτίωση στην απόδοση του αλγόριθμου δρομολόγησης του DSR όταν χρησιμοποιείται η παράμετρος TTL στην λειτουργία της Route Cache.

Τα αποτελέσματα που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι ότι :

- Τα λάθη δρομολόγησης μειώνονται δραματικά με την χρήση του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Παρατηρούμε ότι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε μικρότερο ποσοστό λαθών από τις διαδρομές δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης δείξαμε ότι όχι μόνο μειώνονται τα λάθη αλλά μειώνονται κυρίως τα λάθη τα οποία κοστίζουν σε χρόνο, δηλαδή λάθη τα οποία τα αντιλαμβάνονται κόμβοι που βρίσκονται μακριά από τον κόμβο προέλευσης του πακέτου δεδομένων.
- Το miss ration μειώνεται δραματικά με την χρήση του TTL και κάνει την λειτουργία της Route Cache των κόμβων πολύ πιο αποδοτική.
- Η διαπερατότητα του δικτύου αυξάνεται με την χρήση του TTL στην πλειονότητα των περιπτώσεων πράγμα που μας κάνει να θεωρούμε ότι όντας η εφαρμογή αυτής της τεχνικής μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του πρωτοκόλλου.

- Η καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων μειώνεται αρκετά αλλά όχι όσο θα περιμέναμε σε μερικές περιπτώσεις.
- Τα αποτελέσματα δεν εξαρτώνται από παραμέτρους όπως ο αριθμός των κόμβων ή το μοντέλο κίνησης. Μπορούμε να δούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται βελτίωση.
- Στις περιπτώσεις μεγάλης εμβέλειας του ασύρματου καναλιού όπως παρατηρούμε και από τους πίνακες τα αποτελέσματα δεν είναι αρκετά ικανοποιητικά ιδιαιτέρως για την μέση καθυστέρηση παράδοσης των δεδομένων. Στις περιπτώσεις αυτές παρατηρείτε αστοχία του αλγορίθμου. Σε προηγούμενη παράγραφο δώσαμε μια εξήγηση για το φαινόμενο αυτό.
- Μπορούμε να εντοπίσουμε περιπτώσεις βελτίωσης όλων των παραμέτρων που εξετάζουμε για την απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης και αν επιλέξουμε αυτό το κατώφλι τιμών του TTL για χρήση.

# Κεφάλαιο 8

## ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΟΥΛΕΙΑ

### 8. Μελλοντική Δουλειά

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η περιγραφή των σημαντικότερων πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα, που αποτελούνται από κινητούς κόμβους και η εξαγωγή αποτελεσμάτων για την βελτίωση της απόδοσης του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης πηγής (DSR), με την βελτιστοποίηση του χρόνου ζωής των αποθηκευμένων διαδρομών. Εφαρμόσαμε μία τεχνική, από το [Liang 2003] στο μοντέλο του DSR που έχει υλοποιηθεί στο OPNET και περιγράψαμε και αναλύσαμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα που συγκριτώσαμε. Στο παρόν κεφάλαιο, στο πρώτο μέρος, θα μιλήσουμε για τα σημαντικότερα θέματα που θα απασχολήσουν στο μέλλον την έρευνα και την ανάπτυξη των ασύρματων ad-hoc δικτύων, ενώ στο δεύτερο θα αναφερθούμε στην μελλοντική δουλειά που πιστεύουμε ότι πρέπει να γίνει πάνω στην βελτιστοποίηση του χρόνου ζωής των αποθηκευμένων διαδρομών και κατά συνέπεια στην βελτίωσης της απόδοσης του πρωτοκόλλου.

Όπως έχουμε αναφέρει ήδη, η έρευνα των ασύρματων ad-hoc δικτύων δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ακόμα εξαντλητική και πλήρης. Ένα μεγάλο μέρος της προσπάθειας μέχρι τώρα ήταν στην επινόηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για την αποτελεσματική υποστήριξη και αποδοτική επικοινωνία των κόμβων του δικτύου. Εντούτοις, υπάρχουν ακόμα πολλά προβλήματα και θέματα που αξίζουν περαιτέρω έρευνα, όπως:

- Scalability – Μέχρι ποίο σημείο μπορεί το μέγεθος, ενός ad-hoc ασύρματου δικτύου, να αυξάνεται.
- Address auto-configuration – Ποιος πρέπει να είναι ο αυτόματος τρόπος ανάθεσης διευθύνσεων στους κόμβους ενός ασύρματου ad-hoc δικτύου. Είναι απαραίτητη η σχεδίαση και ανάπτυξη ενός νέου πρωτοκόλλου ανάθεσης διευθύνσεων στα MANETs [MANET].



- Interoperation with the Internet – Ο αποτελεσματικός και αποδοτικός τρόπος διασύνδεσης ενός ad-hoc δικτύου με το διαδίκτυο και τις υπηρεσίες που αυτό προσφέρει.
- Improvement of interaction between layers – Υλοποίηση νέων μηχανισμών επικοινωνίας των στρωμάτων της στοίβας του δικτύου, η διαεπικοινωνία τους πολλές φορές κρίνεται απαραίτητη για την βελτίωση της απόδοσης.
- Quality of service (QoS) – Πόσο καλά εφαρμογές, με συγκεκριμένους περιορισμούς, μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα MANET.
- Applications for MANET – Ποιες θα είναι οι εφαρμογές που θα κάνουν χρήση της τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας των Mobile Ad-hoc Networks. (Killer applications for MANETs)
- Security – Η ασφάλεια αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των τηλεπικοινωνιακών δικτυακών συστημάτων και συνεπώς είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα και στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Το ερώτημα είναι πώς σε δίκτυα δίχως δομή, προϋπάρχουσα υποδομή και διαχείριση, μπορούμε να προσφέρουμε υπηρεσίες ασφάλειας όπως, αυθεντικοποίηση, εμπιστευτικότητα και ακεραιότητα.
- Power control – Ο τρόπος μεγιστοποίησης της ζωής και της λειτουργίας του δικτύου, με τον αποδοτικότερο τρόπο χρήσης των πηγών ενέργειας των κόμβων (συνήθως μπαταριών).

Μερικά από τα παραπάνω θέματα θα συζητηθούν παρακάτω.

## **8.1. Ερευνητικά θέματα και προβλήματα στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα**

### ***8.1.1. Scalability***

Λόγω πολλών αντιφατικών παραγόντων και χαρακτηριστικών των ασύρματων ad-hoc δικτύων, κανένας δεν μπορεί να ορίσει το μέγεθος ή το όριο του μεγέθους ενός τέτοιου δικτύου. Αυτό που με ασφάλεια μπορούμε να πούμε είναι ότι ένα τέτοιο δίκτυο δεν μπορεί να έχει μέγεθος αντίστοιχο ή ίσο με αυτό που έχει σήμερα το Ιντερνετ, το οποίο αριθμεί δεκάδες εκατομμύρια τερματικών. Στην πραγματικότητα σήμερα, την στιγμή

δηλαδή που γράφτηκε αυτή η εργασία, δεν υπάρχουν αναφορές για κανένα ad-hoc ασύρματο δίκτυο που να έχει υλοποιηθεί, παρά μόνο αυτά που έχουν δημιουργηθεί για στρατιωτικούς σκοπούς από τον στρατό των Ηνωμένων Πολιτειών, για τα οποία δεν έχουμε στοιχεία και χαρακτηριστικά.

Οι περισσότερες προσομοιώσεις στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα έχουν γίνει με τα μεγέθη των δικτύων να φτάνουν ακόμα και τους 10000 (δέκα χιλιάδες) κόμβους. Τα εργαλεία προσομοίωσης σε περιπτώσεις τέτοιες απαιτούν πολύ μεγάλα μεγέθη μνήμης, σκληρών δίσκων και υπολογιστικής ισχύς για να μπορέσουν να λειτουργήσουν. Γενικά πειράματα που ξεπερνούν τις λίγες χιλιάδες κόμβους απαιτούν πολύ μεγάλο χρόνο εκτέλεσης των πειραμάτων και της συλλογής των αποτελεσμάτων. Γενικά ο χρόνος εκτέλεσης ενός πειράματος εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των κόμβων του δικτύου και από τις παραμέτρους τις οποίες θέλουμε κάθε φορά να μετράμε και να συλλέγουμε. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα στην μελέτη της συμπεριφοράς των πρωτοκόλλων τέτοιων δικτύων που αποτελούνται από πολλές εκατοντάδες ή και χιλιάδες κόμβους.

Στην εργασία αυτή περιγράψαμε διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης και προσπαθήσαμε να μελετήσουμε ένα συγκεκριμένο τρόπο βελτίωσης της απόδοσης της δυναμικής δρομολόγησης πηγής (DSR). Για όλα τα πρωτόκολλα που περιγράψαμε, αλλά και για τον DSR, με τις αλλαγές που προτείναμε εμείς, έγιναν πειράματα τα οποία περιορίζονταν σε μεγέθη δικτύων της τάξης των μερικών εκατοντάδων κόμβων, στην καλύτερη περίπτωση. Τα εργαλεία μοντελοποίησης και προσομοίωσης δεν επιτρέπουν την εκτέλεση πειραμάτων σε μεγαλύτερα δίκτυα και μας περιορίζουν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορούμε να γνωρίζουμε σήμερα την συμπεριφορά των διαφόρων πρωτοκόλλων των ασύρματων ad-hoc δικτύων, συμπεριλαμβανομένων και των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, σε συνθήκες όπου το μέγεθος του δικτύου αυξάνεται υπερβολικά από λίγες εκατοντάδες σε πολλές δεκάδες χιλιάδες κόμβους.

### ***8.1.2. Ποιότητα υπηρεσιών σε ad-hoc ασύρματα δίκτυα***

Τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, στα οποία αναφερθήκαμε στην εργασία αυτή, έχουν σαν σκοπό την εύρεση μονοπατιών ανάμεσα σε δύο κόμβους του δικτύου απλά χωρίς να εξετάζουν την ποιότητα των δικτυακών υπηρεσιών που μπορούν να προσφερθούν πάνω από αυτή την διαδρομή.

Σήμερα υπάρχουν προτάσεις για την υλοποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης τα οποία εξετάζουν την ποιότητα της σύνδεσης για την εύρεση μιας διαδρομής. Τα πρωτόκολλα αυτά δεν έχουν την απόδοση που έχουν αυτά που προτείνονται ως υποψήφια πρότυπα από την ομάδα εργασίας MANET της IETF, αλλά ανακαλύπτουν διαδρομές οι οποίες περιέχουν συνδέσεις υψηλής ποιότητας.

Η παροχή όμως ποιότητας στις προσφερόμενες υπηρεσίες των ασύρματων δικτύων και συγκεκριμένα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, αφορά την εύρεση διαδρομών ικανών να υποστηρίξουν την εφαρμογή η οποία θα χρησιμοποιήσει το συγκεκριμένο μονόπατι για την μετάδοση δεδομένων σε ένα άλλο κόμβο του δικτύου. Το ερώτημα στην περίπτωση αυτή είναι εάν το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι ικανό να βρίσκει διαδρομές ικανές να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες των εφαρμογών για να λειτουργήσουν. Συγκεκριμένα το πρωτόκολλο πρέπει να μπορεί να βρίσκει διαδρομές για τις οποίες μπορεί να εγγυηθεί για το απαιτούμενο bandwidth και την ελάχιστη καθυστέρηση μετάδοσης των δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι κρίσιμα για τις εφαρμογές πραγματικού χρόνου μετάδοσης ήχου και εικόνας, εφαρμογές μετάδοσης ιατρικών ή άλλων ευαίσθητων δεδομένων, στρατιωτικών εφαρμογών και άλλων.

### ***8.1.3. Client-Server vs. Peer to Peer application model***

Σήμερα γίνεται λόγος για το είδος των εφαρμογών που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν αποδοτικά πάνω από τα ad-hoc ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Γενικά οι δικτυακές εφαρμογές μέχρι σήμερα ακολουθούσαν το μοντέλο του εξυπηρετή και του εξηρητητή (client – server model). Το μοντέλο αυτό υπαγορεύει ότι στο δίκτυο υπάρχουν κόμβοι που επιτελούν συγκεκριμένες εργασίες και προσφέρουν τις υπηρεσίες του σε άλλους κόμβους του δικτύου, οι οποίοι χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες αυτές. Οι υπηρεσίες αυτές έχουν να κάνουν με την επεξεργασία, μετάδοση και ανταλλαγή πληροφοριών και για να λειτουργήσουν απαιτούν την παρουσία ενός ή περισσότερων server, που έχουν την ευθύνη εκτέλεσης τους και ενός ή περισσότερων clients, που χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες αυτές μέσω του server. Το μοντέλο αυτό δουλεύει πολύ καλά, και σήμερα είναι πολύ διαδεδομένο. Ολόκληρος ο παγκόσμιος δικτυακός ιστός (World Wide Web, www) ή όπως έχουμε συνηθίσει να λέμε κοινά, Ιντερνετ, είναι βασισμένος στο μοντέλο αυτό. Εφαρμογές όπως το ηλεκτρονικό

ταχυδρομείο, το ηλεκτρονικό εμπόριο, οι ηλεκτρονικές τραπεζικές συναλλαγές, λειτουργούν σύμφωνα με το μοντέλο αυτό.

Στα ασύρματα ad-hoc τηλεπικοινωνιακά δίκτυα όμως το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να λειτουργήσει. Τα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών τα έχουμε συζητήσει σε προηγούμενα κεφάλαια, βλέπε κεφάλαιο 2. Επίσης έχουμε επισημάνει και τις διαφορές που έχουν με τα δίκτυα, ενσύρματα ή ασύρματα, τύπου Ethernet. Η βασικότερη από αυτές είναι η δυνατότητα της αυτοδημιουργίας και της δυναμικής αλλαγής των χαρακτηριστικών τους στην πάροδο του χρόνου. Αυτό το χαρακτηριστικό κάνει αδύνατη τη λειτουργία του μοντέλου client-server, που περιγράψαμε παραπάνω. Η βασική αρχή του μοντέλου αυτού είναι η ύπαρξη ενός κόμβου, ο οποίος μπορεί να προσφέρει με μεγάλη αξιοπιστία μια υπηρεσία (server). Στην περίπτωση των ad-hoc δικτύων το χαρακτηριστικό αυτό δεν μπορεί να υπάρξει.

Για να μπορέσει λοιπόν το μοντέλο αυτό να λειτουργήσει σε ένα δίκτυο τέτοιου τύπου πρέπει να απαντηθούν τα παρακάτω ερωτήματα. Σε ποιόν κόμβο σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο θα υπάρχει η υπηρεσία; Πώς οι άλλοι κόμβοι θα μπορούν να ανακαλύπτουν την υπηρεσία αυτή, εφόσον δεν θα μπορούν να γνωρίζουν εκ των προτέρων την ύπαρξη της; Οι προσφερόμενες υπηρεσίες θα είναι συγκεκριμένες, θα περιγράφονται με κάποιο πρότυπο και καθολικό τρόπο κατανοητό για όλους τους κόμβους του δικτύου και πώς αυτοί θα γνωρίζουν ποια υπηρεσία να χρησιμοποιήσουν; Θα μπορούν όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο να χρησιμοποιήσουν την υπηρεσία αυτή; Ποιος θα είναι υπεύθυνος και θα ορίζει ποιος έχει δικαίωμα να την χρησιμοποιεί, authentication, authorization; Τι θα γίνει στην περίπτωση που δεν θα είναι πλέον δυνατό να δίδεται στους κόμβους η υπηρεσία αυτή;

Οι απαντήσεις στις ερωτήσεις αυτές δεν είναι προφανείς αλλά σήμερα φαίνεται ότι υπάρχουν οι απαραίτητες τεχνολογίες που θα μπορούσαν να δώσουν λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Στο σημείο αυτό θα τις αναφέρουμε, χωρίς να είναι θέμα της συγκεκριμένης εργασίας. Οι τεχνολογίες αυτές δεν είναι άλλες από τα Peer-To-Peer συστήματα και η τεχνολογία των grids. Τα πρώτα αναφέρονται σε συστήματα τα οποία δεν ακολουθούν το μοντέλο του client-server, αλλά όλοι οι κόμβοι καλούνται να επιτελέσουν και τους δύο ρόλους. Στην εργασία [Rüdiger 2002] παρουσιάζονται οι διαφορές και οι ομοιότητες των ad-hoc ασύρματων δικτύων (MANETs) και των Peer-

To-Peer (p2p) συστημάτων και αναδεικνύονται οι δυνατότητες συνεργασίας των δύο αυτών δικτυακών συστημάτων, παρά τις πολλές και σημαντικές διαφορές τους. Η τεχνολογία των grids αναφέρεται σε συστήματα που αποτελούνται από κόμβους οι οποίοι μπορούν να εκτελούν με καταναμημένο τρόπο με κοινό σκοπό την λειτουργία μίας διεργασίας ή μίας υπηρεσίας. Τα χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας ταιριάζουν επίσης με ένα ad-hoc δικτυακό περιβάλλον και όπως περιγράφεται στην [Dan 2002] μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία λογισμικού για τα δίκτυα αυτά.

#### **8.1.4. Security**

Η ασφάλεια στα δίκτυα υπολογιστών αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σύγχρονα θέματα και προβλήματα. Σήμερα είναι πολύ σημαντικό ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα και οι προσφερόμενες υπηρεσίες αυτού να είναι ασφαλείς. Η ασφάλεια ενός συστήματος ορίζεται ως οι διαδικασίες εκείνες που εγγυούνται την ακεραιότητα και εμπιστευτικότητα των δεδομένων και την αυθεντικοποίηση των χρηστών. Σήμερα τα θέματα ασφάλειας στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα δεν έχουν ερευνηθεί αρκετά και ο λόγος είναι ότι η έρευνα στα θέματα ασφάλειας σε αυτού του τύπου τα δίκτυα είναι πολύ δύσκολη λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Η υλοποίηση υπηρεσιών και μηχανισμών ασφάλειας στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα παρόμοιων με αυτές που υπάρχουν στα άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα δεν μπορεί να γίνει. Υπάρχουν πολλά προβλήματα τα οποία δύσκολα μπορούν να υπερπηδηθούν. Το βασικότερο από όλα έχει να κάνει με την απουσία κάποιας κεντρικής διαχείρισης του δικτύου, η οποία θα μπορούσε να αναλάβει κεντρικό ρόλο στις υπηρεσίες ασφαλείας. Ο ρόλος μιας τέτοιας οντότητας σε ένα δίκτυο είναι χωρίς άλλο η διανομή των απαραίτητων πληροφοριών, παραδείγματος χάριν, κλειδιών στους κόμβους του δικτύου για να μπορέσουν να χρησιμοποιήσουν τους μηχανισμούς ασφαλείας

Τα ασύρματα ειδικά δίκτυα έχουν προταθεί για να υποστηρίξουν σενάρια όπου δεν υπάρχει καμία δικτυακή υποδομή. Τα ασύρματα ad-hoc δίκτυα εισάγουν δύο κύρια προβλήματα που συνήθως δεν αντιμετωπίζονται από τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης, την έλλειψη υποστήριξης προϋπάρχουσας υποδομής και τις συχνές αλλαγές στην τοπολογία των κόμβων του δικτύου. Στο φυσικό επίπεδο το ασύρματο κανάλι προσφέρει μικρή προστασία στα πακέτα του πρωτοκόλλου, τα οποία είναι ευαίσθητα σε εξωτερικές παρεμβολές του ασύρματου σήματος, στην παρουσία jamming

κόμβων, στην αλλοίωση των δεδομένων που μεταφέρουν και στην μη εξουσιοδοτημένη παραλαβή τους (eavesdropping) από κόμβους του δικτύου. Η προσθήκη επιπρόσθετων μηχανισμών, που θα εξασφαλίζουν την ασφαλή μετάδοση των πακέτων πληροφοριών, κώδικες διόρθωσης λαθών, frequency hopping σχήματα, κ.λπ, στα φυσικό και MAC επίπεδο, μπορεί να αντιμετωπίσει αυτά τα προβλήματα. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης από την φύση τους στηρίζονται στην συνεργασία των κόμβων του δικτύου και στην αμοιβαία εμπιστοσύνη αυτών για την μεταγωγή των πακέτων δεδομένων. Το γεγονός αυτό επιτρέπει σε κακόβουλους κόμβους να μπορούν να παραλύσουν ένα τέτοιο δίκτυο με την παρεμβολή λανθασμένων πληροφοριών δρομολόγησης, επανάληψη παλαιών πληροφοριών δρομολόγησης, αλλαγή αναπροσαρμοσμένων νέων πληροφοριών δρομολόγησης ή μετάδοση λανθασμένων πληροφοριών δρομολόγησης. Οι επιθέσεις αυτές είναι δυνατές και στα κλασικά ενσύρματα δίκτυα επίσης, αλλά η φύση του περιβάλλοντος των ad-hoc δικτύων ενισχύει τις επιθέσεις αυτές και κάνει δυσκολότερο τον εντοπισμό τους. Στην εργασία [Seung 2001] γίνεται μία αναλυτική ανασκόπηση στα θέματα αυτά και προτείνεται ένα ασφαλές πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο εισάγει την έννοια της ασφάλειας και της εμπιστοσύνης σε υπάρχοντες μεθόδους δρομολόγησης στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Σε μία δεύτερη εργασία [Pietro 2002] γίνεται μια ανάλυση στα θέματα ασφάλειας των ad-hoc δικτύων με την βοήθεια της προσομοίωσης για την συλλογή αποτελεσμάτων.

## **8.2. Μελλοντική δουλειά στο πρόβλημα του caching**

Στην εργασία αυτή μελετήσαμε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της χρήσης της Route Cache στα ασύρματα ad-hoc δίκτυα, που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα δρομολόγησης πηγής. Συγκεκριμένα μελετήσαμε την βελτίωση της απόδοσης του πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης πηγής DSR, με την υλοποίηση μίας νέας βελτιωμένης Route Cache, η οποία περιέχει πληροφορίες για τον χρόνο ζωής κάθε διαδρομής. Ο χρόνος ζωής μίας διαδρομής ορίζεται ως ο χρόνος στον οποίο η χρησιμοποίηση μιας διαδρομής δεν θα προκαλέσει κάποιο Route Error, λόγω μιας διακομμένης σύνδεσης κατά μήκος της. Ο χρόνος αυτός, σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, έχει υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα και επιβεβαιωθεί με την εκτέλεση πειραμάτων. Εμείς στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας προσπαθήσαμε να υλοποιήσουμε μία τεχνική προσεγγιστικής εύρεσης του χρόνο ζωής μιας διαδρομής, και την χρήση της μεταβλητής TTL (Time to Live) για κάθε διαδρομή

ούτος ώστε να δώσουμε σε κάθε κόμβο την δυνατότητα να γνωρίζει την ζωή κάθε διαδρομής, και να την απορρίπτει μετά την πάροδο του χρόνου αυτού. Επιλέξαμε το μοντέλο του DSR στο OPNET, και υλοποιήσαμε μία σειρά από σενάρια και συνθήκες για την εκτέλεση πειραμάτων και συλλογή αποτελεσμάτων για, του πραγματικού χρόνου ζωής μιας διαδρομής, των επιτυχών και ανεπιτυχών προσπελάσεων που γίνονται σε μία Route Cache, των ανανεώσεων στις διαδρομές σε μία Route Cache, του μεγέθους των διαδρομών που αποθηκεύονται, και της απόδοσης του πρωτοκόλλου με την χρήση της βελτιωμένης Route Cache με την χρήση της παραμέτρου TTL. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν περιγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, και μας δείχνουν τις περιπτώσεις που η απόδοση του αλγορίθμου βελτιώνεται. Περαιτέρω έρευνα πάνω στο θέμα αυτό πρέπει να γίνει στις ακόλουθες κατευθύνσεις.

### ***8.2.1. Χαρακτηρισμός διαδρομών δρομολόγησης***

Στην εργασία αυτή μελετήσαμε την συμπεριφορά ενός αλγορίθμου με την χρήση μιας τεχνικής βελτίωσης της λειτουργίας της Route Cache. Η τεχνική αυτή ορίζει σαν κριτήριο για την εγκυρότητα των πληροφοριών δρομολόγησης τον χρόνο ζωής των διαδρομών δρομολόγησης. Το κριτήριο αυτό, όπως είδαμε, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση αλλά δεν είναι το μόνο που μπορούμε να λάβουμε υπόψη μας. Η χρησιμοποίηση και άλλων χαρακτηριστικών όπως ενέργεια που απαιτείται για την χρήση του συγκεκριμένου μονοπατιού, μπορούν να συνδυαστούν και να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό εγκυρότητας διαδρομών δρομολόγησης. Η υλοποίηση μας επιτρέπει την εισαγωγή και άλλων παραμέτρων για τον χαρακτηρισμό των διαδρομών δρομολόγησης.

### ***8.2.2. Εφαρμογή του TTL και σε άλλους αλγόριθμους δρομολόγησης***

Στα πειράματα που εκτελέσαμε χρησιμοποιήσαμε σαν αλγόριθμο δρομολόγησης τον DSR, αφού είναι ένα από τα σημαντικότερα πρωτόκολλα της κλάσης του στον χώρο των δικτύων ad-hoc. Για να μπορέσουμε να γενικεύσουμε τα συμπεράσματά μας είναι απαραίτητο να εφαρμόσουμε την συγκεκριμένη τεχνική και σε άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούν αποθηκευμένες πληροφορίες δρομολόγησης.

Χαρακτηριστικά αναφέρουμε την εφαρμογή της τεχνικής αυτής στον AODV. Η διαφορά είναι ότι στην περίπτωση αυτή οι πίνακες δρομολόγησης αφορούν τους ενδιάμεσους κόμβους, και η επιλογή των αντίστοιχων τιμών του TTL πρέπει να

υπακούει διαφορετικούς κανόνες. Συγκεκριμένα στην εργασία [Liang 2003] περιγράφεται τρόπος υπολογισμού του χρόνου ζωής διαδρομών που αποθηκεύονται από τους ενδιάμεσους κόμβους.

### **8.3. Βελτίωση παραμέτρων προσομοίωσης**

Στο τέλος αφήσαμε, όπως πιστεύουμε ένα από τα σημαντικότερα θέματα που αναδείχθηκαν από την εργασία αυτή, το πρόβλημα της δημιουργία μοντέλων και σεναρίων προσομοίωσης που να μπορούν να προσεγγίζουν όσο είναι το δυνατό τα πραγματικά ασύρματα ad-hoc δίκτυα.

Μια από τις σημαντικότερες μεθόδους για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των ad-hoc τηλεπικοινωνιακών δικτύων είναι η χρήση της μεθόδου της προσομοίωσης. Η προσομοίωση παρέχει στους ερευνητές την δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς των πρωτοκόλλων κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες όπως, τα επαναλαμβανόμενα σενάρια, η απομόνωση συγκεκριμένων παραμέτρων και η εξερεύνηση ποικίλων παραμέτρων και αποτελεσμάτων. Η τοπολογία και η κίνηση των κόμβων του δικτύου είναι βασικοί παράγοντες για την μελέτη του δικτυακού συστήματος, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Οι κόμβοι αφού τοποθετηθούν σε μία αρχική θέση, αρχίζουν να κινούνται μέσα στα γεωγραφικά όρια του δικτύου, σύμφωνα με αυτά που υπαγορεύει το μοντέλο της κίνησης τους. Η κινητικότητα των κόμβων επηρεάζει άμεσα την απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης που επιτυγχάνονται με τα μη ρεαλιστικά σενάρια κίνησης μπορούν να μην απεικονίσουν σωστά την απόδοση τους. Η πλειοψηφία των υπαρχόντων προτύπων κινητικότητας για ασύρματα ad-hoc δίκτυα δεν παρέχει ρεαλιστικά σενάρια μετακίνησης. Τα περισσότερα περιορίζονται στην δημιουργία τυχαίων μονοπατιών που ακολουθούν οι κόμβοι κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Στο μέλλον είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν μοντέλα κίνησης, τα οποία θα επιτρέπουν στους ερευνητές να ορίσουν ένα ασύρματο δίκτυο, το οποίο θα αποτελείται από κόμβους που θα μπορούν να κινούνται σε ένα περιβάλλον που θα προσεγγίζει την πραγματικότητα. Με άλλα λόγια πρέπει να δημιουργηθούν ρεαλιστικά μοντέλα κίνησης, τα οποία δεν θα περιγράφουν απλά ένα χώρο μέσα στον οποίο θα μπορούν να κινούνται οι κόμβοι του δικτύου, αλλά θα περιέχουν και εμπόδια τα οποία περιορίζουν την κίνηση τους, καθώς επίσης και την εμβέλεια των ασύρματων μεταδόσεων.



Ερευνητική δουλειά στο συγκεκριμένο θέμα έχει γίνει στο [Jardosh 2003], όπου περιγράφουν μία μέθοδο δημιουργίας ενός πρωτοκόλλου μοντελοποίησης της κίνησης κόμβων ενός ad-hoc δικτύου, στο οποίο υπάρχουν εμπόδια και οι κόμβοι κινούνται σε σχέση με αυτά. Επίσης οι συγγραφείς στο συγκεκριμένο άρθρο περιγράφουν την δημιουργία μονοπατιών διαδρομών χρησιμοποιώντας γράφους Voronoi, οι οποίοι έχουν σαν κορυφές τα διάφορα εμπόδια που υπάρχουν στο δίκτυο και τον τρόπο κίνησης των κόμβων μέσω αυτών. Τέλος παρουσιάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα και την επίδραση αυτού του μοντέλου κίνησης στην απόδοση του δικτύου.

# Κεφάλαιο 9

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### 9. Παράρτημα Α – Υλοποίηση στο MATLAB.

Στο παράρτημα Α, παραθέτουμε την υλοποίηση στο MATLAB για τον υπολογισμό των ριζών του πολυωνύμου (βλέπε κεφάλαιο 7) και τον υπολογισμό των εκτιμώμενων τιμών της παραμέτρου Time-to-Live (TTL) του χρόνου ζωής των διαδρομών ενός ad-hoc δικτύου του οποίου οι κόμβοι χρησιμοποιούν αποκλειστικά δρομολόγηση πηγής (source routing).

#### 9.1. Κώδικας υλοποίηση μεθόδου bisection

```
function [root,value,steps,A] = bisect_g(a_0,b_0,tol,d)

f_test = 2*tol;
steps = 0;
A = zeros(1000,3);

while ( abs(f_test) > tol) & (steps < 1000)
% print the interval length to the screen
    b_0 - a_0
    f_left = 2*d*a_0^(d+1)-(2d+1)*a_0^d+1;
    f_right = 2*d*b_0^(d+1)-(2d+1)*b_0^d+1;
    c_0 = (a_0 + b_0)/2;
% update the counter and fill the diagnostic matrix
    steps = steps + 1;
    A(steps,1) = a_0;
    A(steps,2) = c_0;
    A(steps,3) = b_0;
    f_test = 2*d*c_0^(d+1)-(2d+1)*c_0^d+1;
    if f_left*f_test <= 0
% then there must be a zero between a_0 and c_0, so take c_0 to be
% the new right-hand endpoint
        b_0 = c_0;
    else
% then there must be a zero between c_0 and b_0, so take c_0 to be
% the new left-hand endpoint
        a_0 = c_0;
    end
end
root = c_0;
value = f_test;
```

## 9.2. Υπολογισμός εκτιμώμενων τιμών του TTL

```
%We calculate the expected TTL = -m_u*log(g(Topt))*L
d1 = 1; d2 = 2; d3 = 3; d4 = 4; d5 = 5; d6 = 6;
d7 = 7; d8 = 8; d9 = 9; d10 = 10; d11 = 11;
d12 = 12; d13 = 13; d14 = 14; d15 = 15;

tol = 0.0001;
a_0 = 0;
b_0 = 0.99;
%average delay per packet
L = 0.5;%since we use 1Mbps bandwidth, and 512bits packet size

root = zeros(1,15);
[root(1),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d1);
[root(2),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d2);
[root(3),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d3);
[root(4),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d4);
[root(5),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d5);
[root(6),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d6);
[root(7),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d7);
[root(8),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d8);
[root(9),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d9);
[root(10),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d10);
[root(11),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d11);
[root(12),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d12);
[root(13),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d13);
[root(14),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d14);
[root(15),value,steps,A] = bisect2(a_0,b_0,tol,d15);
m_u = [0.1 0.3 1 2 3 4 5 6];

TTL_opt = zeros(8,8);

for i = 0:8:63
    for j = 1:1:8
        TTL(i+j) = -m_u(j)*log(root(j))*L;
    end
end
```

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

### **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΖΩΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ**

#### **10. Αποτελέσματα μετρήσεων του χρόνου ζωής διαδρομών.**

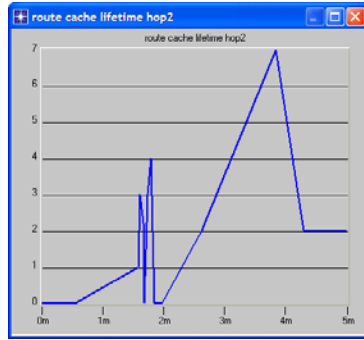
Στο παράρτημα αυτό παραθέτουμε τις γραφικές παραστάσεις από τα αποτελέσματα των πειραμάτων για την μελέτη του χρόνου ζωής των διαδρομών σε ένα ασύρματο ad-hoc δίκτυο του οποίου οι κόμβοι κινούνται.

Σε κάθε πείραμα παρουσιάζουμε τα γραφήματα για τις διαδρομές διαφορετικού μήκους, που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και για τις οποίες μπορούμε να συλλέξουμε δεδομένα για τον χρόνο ζωής τους. Εμφανίζουμε δύο γραφήματα για τον χρόνο ζωής των διαδρομών, το πρώτο προκύπτει από την αναφορά του χρόνου ζωής διαδρομών μετά από την εμφάνιση ενός Route Error το οποίο ενεργοποιεί τις αντίστοιχες διαδικασίες ελέγχου στον DSR με την μετάδοση ενός RERROR μηνύματος ελέγχου στον κόμβο πηγή της διαδρομής και την αναφορά του λάθους με σκοπό την διαγραφή της συγκεκριμένης διαδρομής από την Route Cache. Στο δεύτερο γράφημα εμφανίζουμε το χρόνο ζωής των διαδρομών μετά από μία αντικατάσταση τους από νέες πιο φρέσκιες διαδρομές. Για κάθε γράφημα δείχνουμε και την συνάρτηση κατανομής πιθανότητας των δειγμάτων του χρόνου ζωής των διαδρομών συγκεκριμένου μήκους.

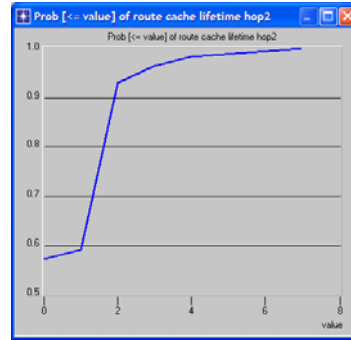
#### **10.1. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint».**

Στα πειράματα αυτά οι κόμβοι κινούνται κάθε ένα δευτερόλεπτο επιλέγοντας τυχαία μία ταχύτητα, κατά ένα διάστημα πέντε μέτρων. Η κατεύθυνση τους επιλέγεται τυχαία κάθε φορά που καλούνται να κινηθούν για το παραπάνω διάστημα. Η ταχύτητα τους επίσης επιλέγεται τυχαία από μία κατανομή αλλά περιορίζεται στην μέγιστη τιμή των 15 μέτρων το δευτερόλεπτο. Τέλος οι κόμβοι δεν κινούνται συνεχώς αλλά μετά το πέρας της πορείας τους παραμένουν για ένα χρονικό διάστημα ίσο με δύο δευτερόλεπτα ακίνητοι. Τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν ασύρματα ad-hoc δίκτυα τα οποία καταλαμβάνουν μία επιφάνεια ίση με 500x500 τετραγωνικά μέτρα.

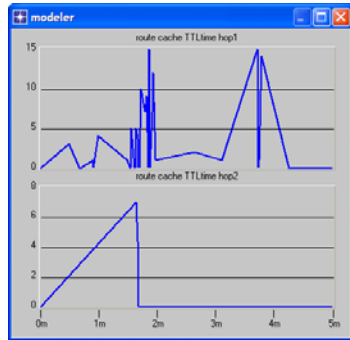
### 10.1.1. Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 16 κόμβων



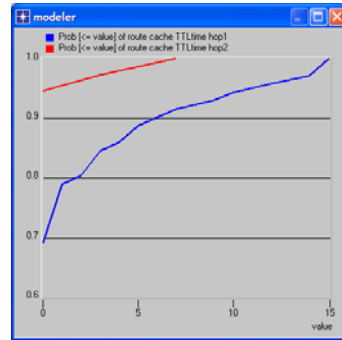
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης

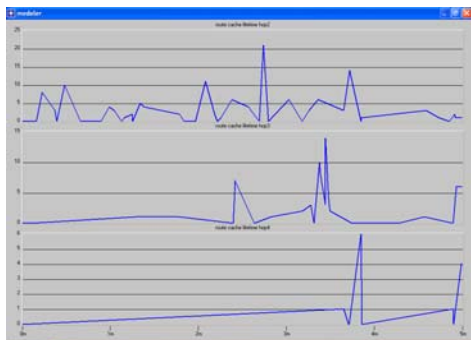


C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache



D: CDF Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

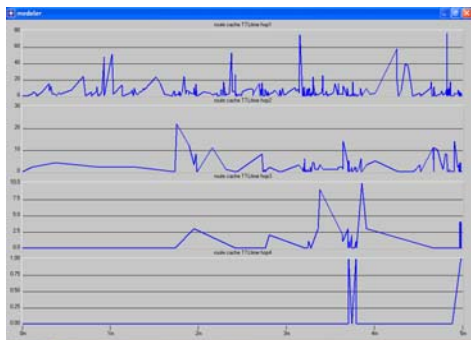
Εικόνα 25: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων



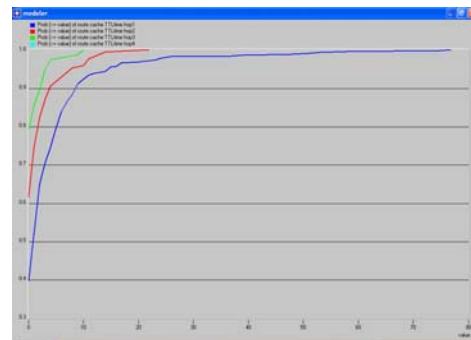
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης

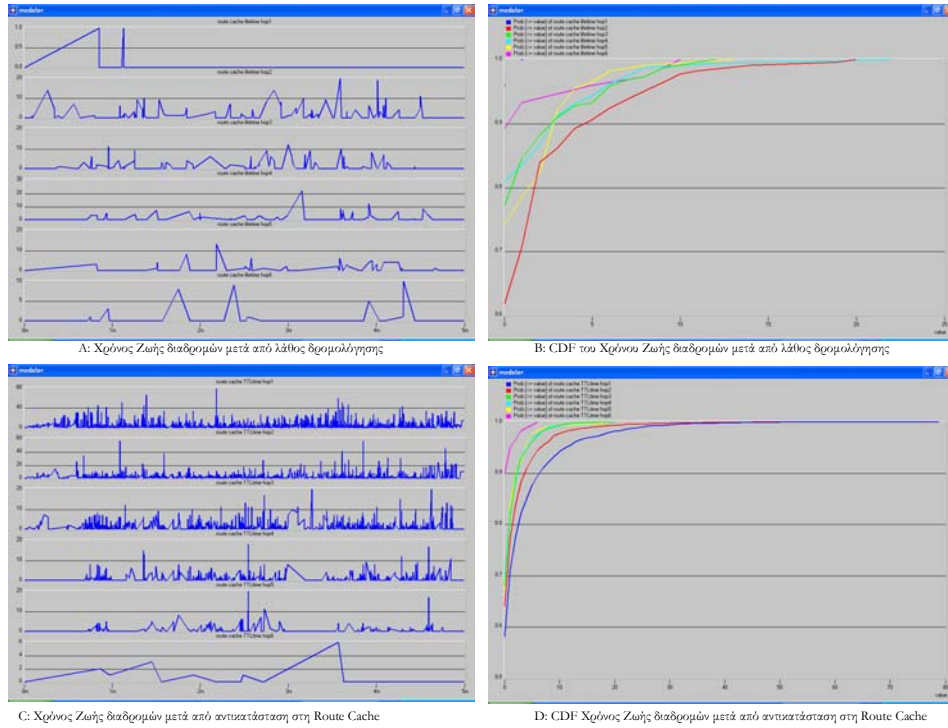


C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

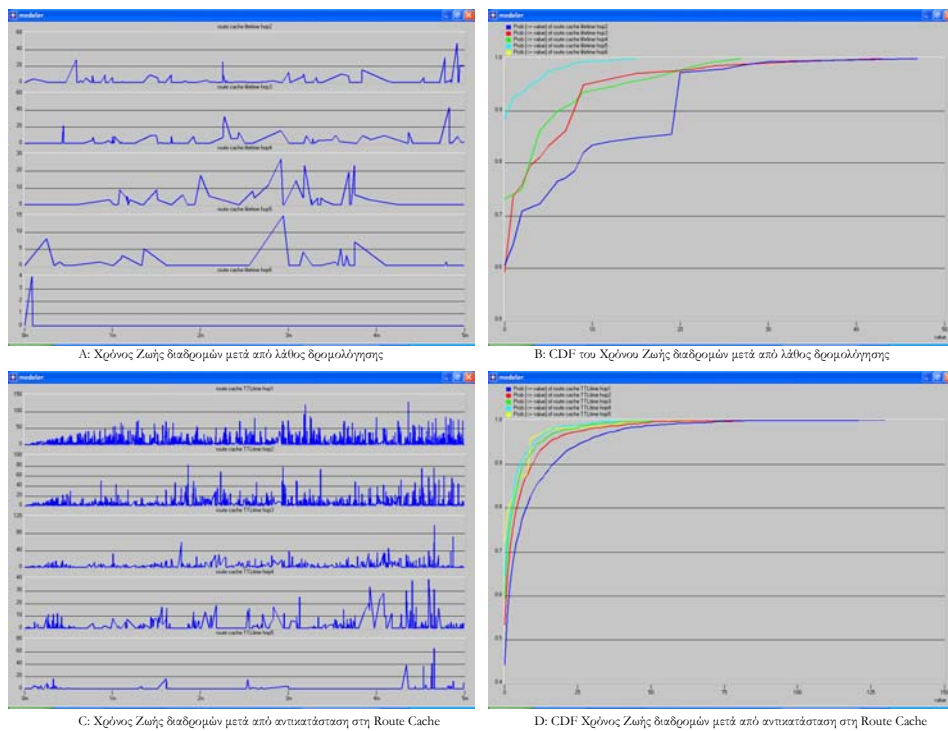


D: CDF Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

Εικόνα 26: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων

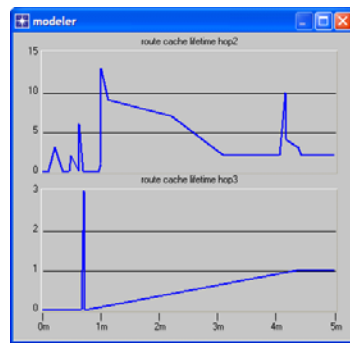


Εικόνα 27: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων

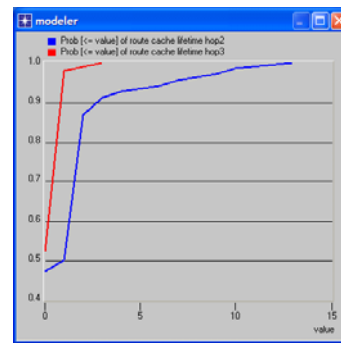


Εικόνα 28: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων

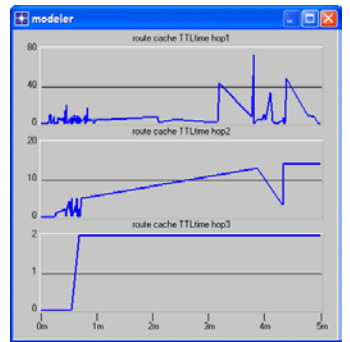
### 10.1.2. Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 20 κόμβων



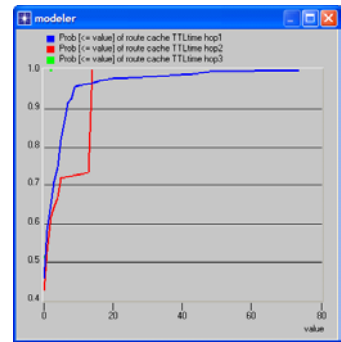
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δορομολόγησης



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δορομολόγησης

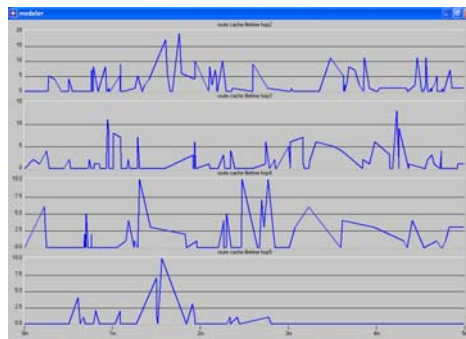


C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

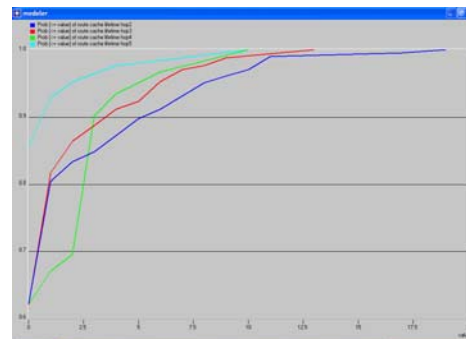


D: CDF Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

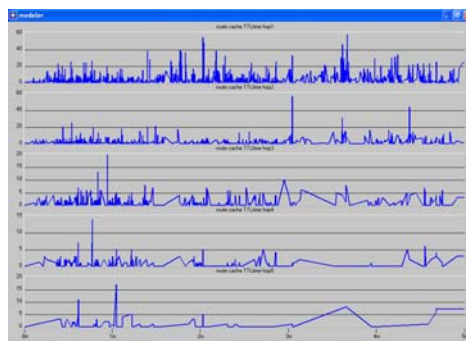
Εικόνα 29: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων



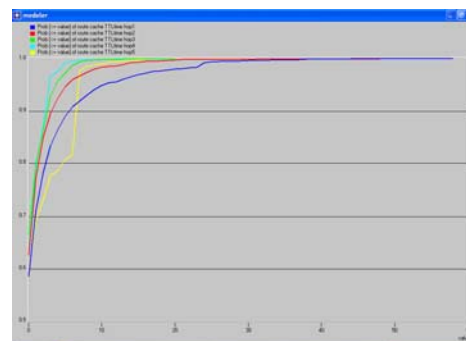
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δορομολόγησης



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δορομολόγησης

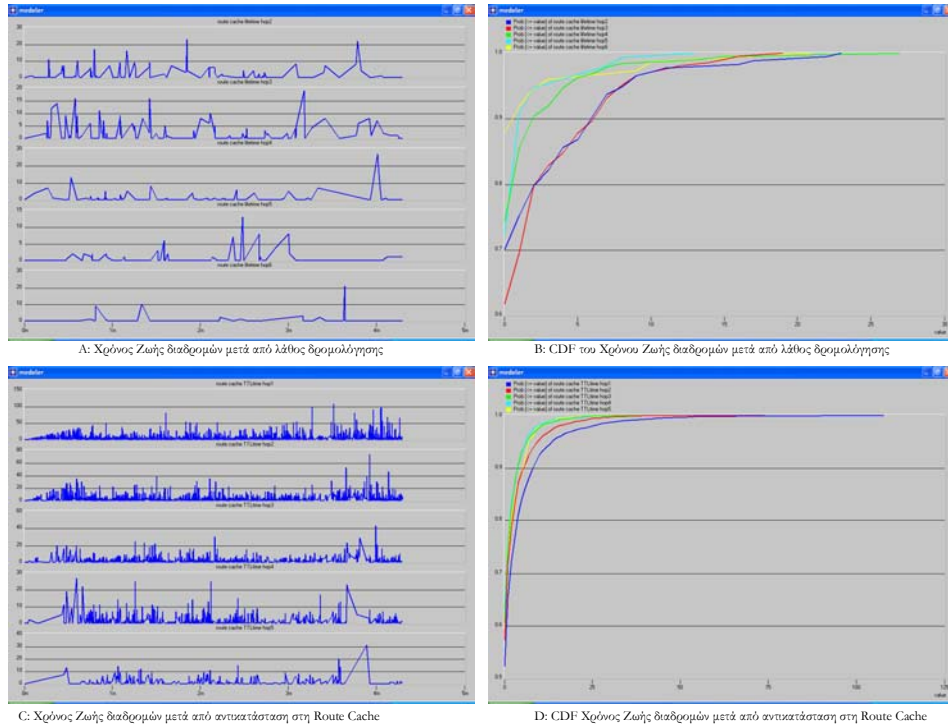


C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

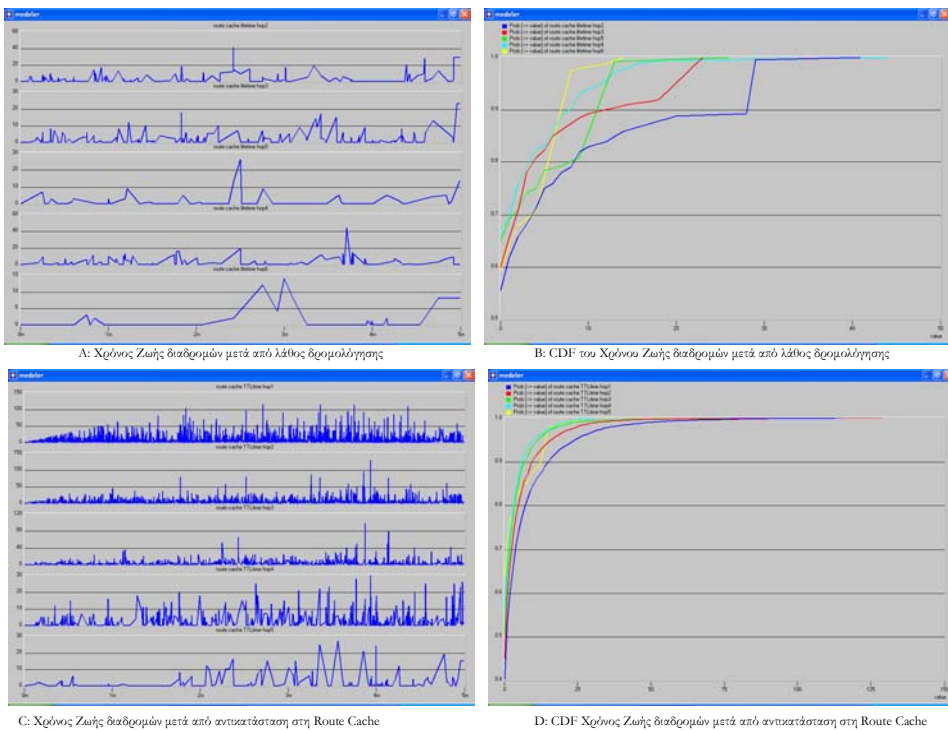


D: CDF Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

Εικόνα 30: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων



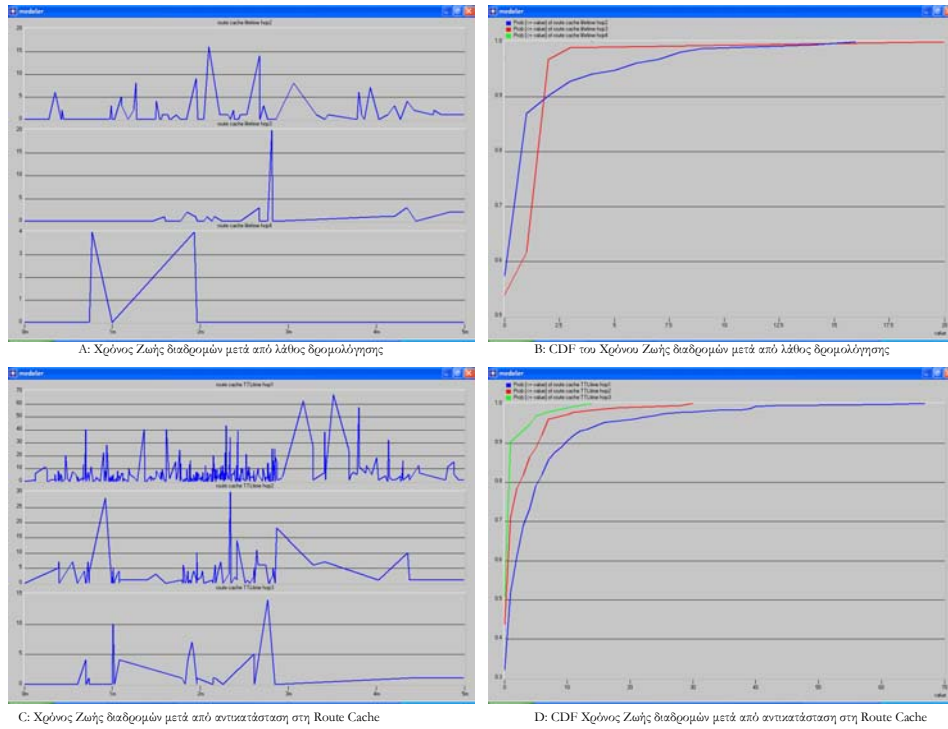
Εικόνα 31: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων



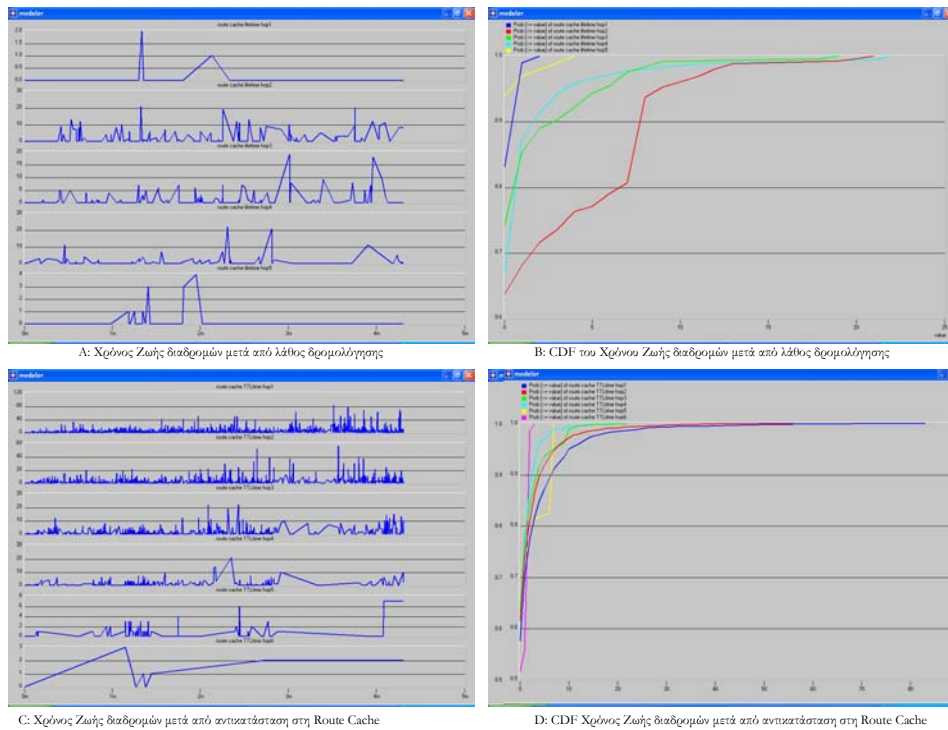
Εικόνα 32: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων



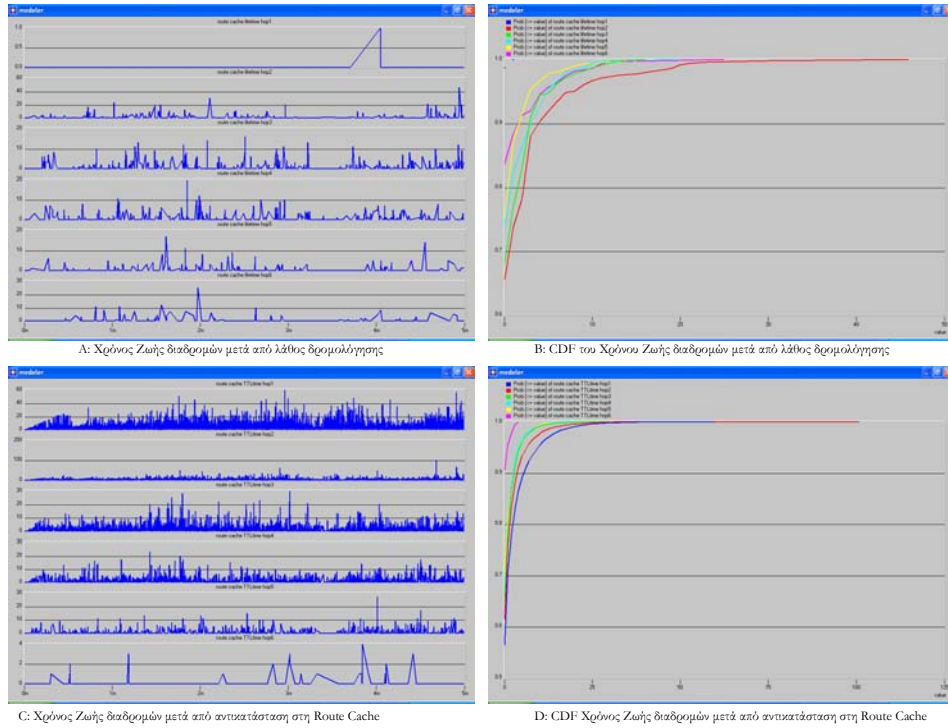
### 10.1.3. Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 30 κόμβων



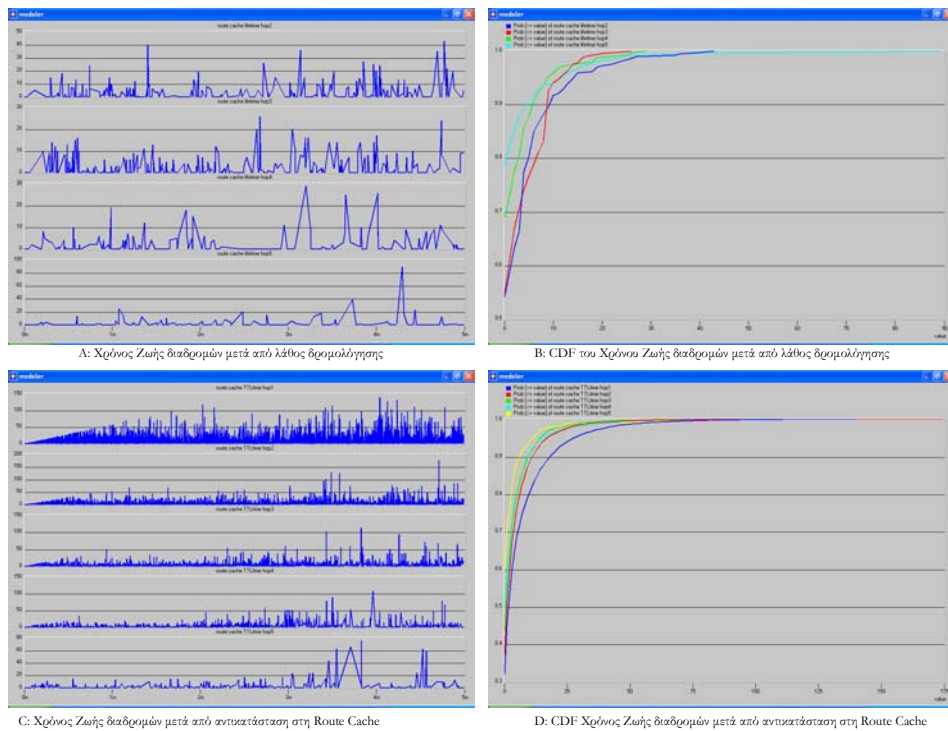
Εικόνα 33: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων



Εικόνα 34: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων



Εικόνα 35: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων

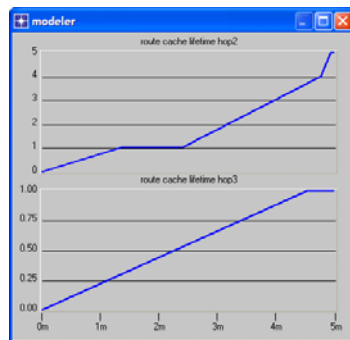


Εικόνα 36: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων

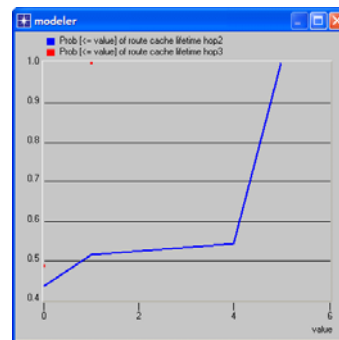
## 10.2. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».

Στα πειράματα αυτά οι κόμβοι κινούνται κάθε ένα δευτερόλεπτο επιλέγοντας τυχαία μία ταχύτητα, κατά ένα διάστημα τριών μέτρων. Η κατεύθυνση τους είναι η ίδια έως να προσεγγίσουν τα όρια του δικτύου όπου επιλέγουν τυχαία μία νέα κατεύθυνση. Τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν ασύρματα ad-hoc δίκτυα τα οποία καταλαμβάνουν μία επιφάνεια ίση με 500x500 τετραγωνικά μέτρα.

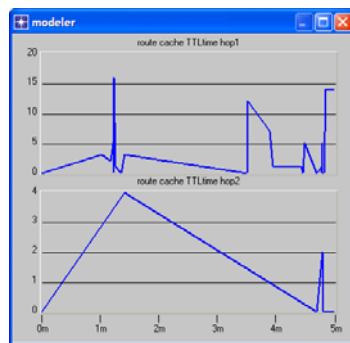
### 10.2.1. Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 16 κόμβων



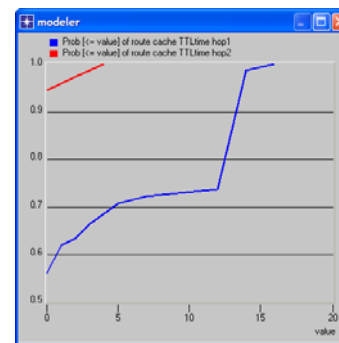
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης

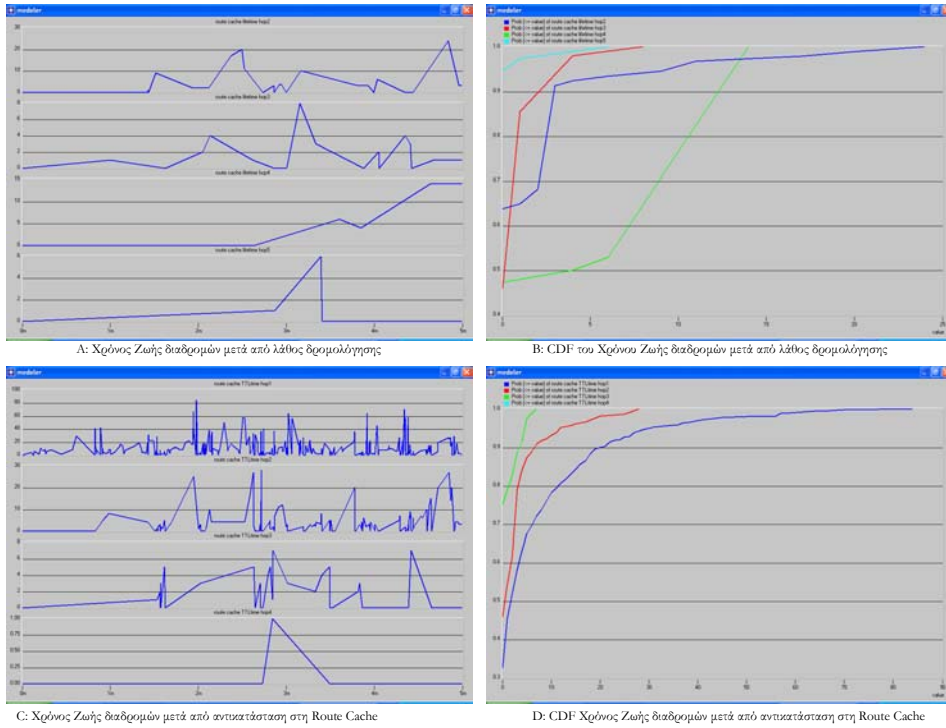


C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

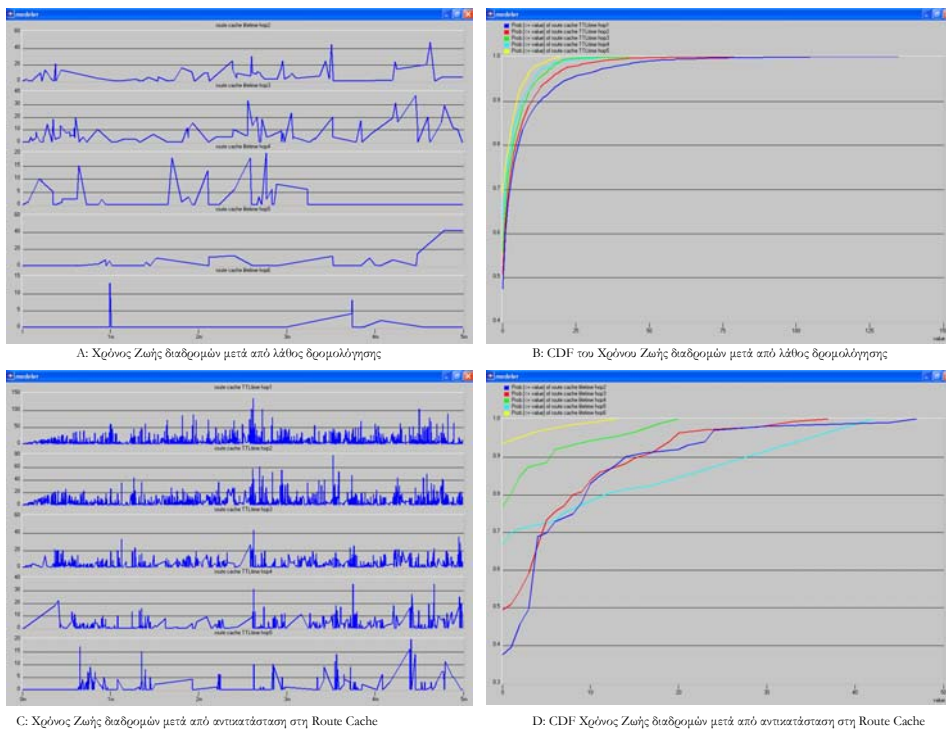


D: CDF Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

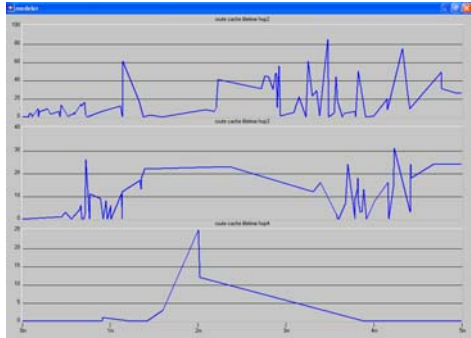
Εικόνα 37: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων



Εικόνα 38: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων



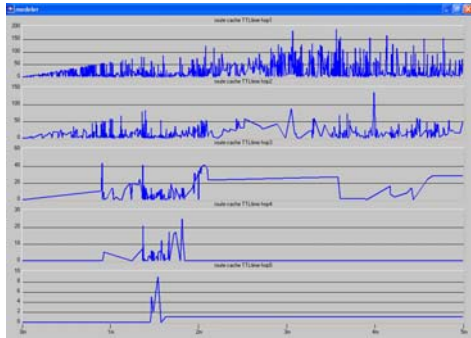
Εικόνα 39: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων



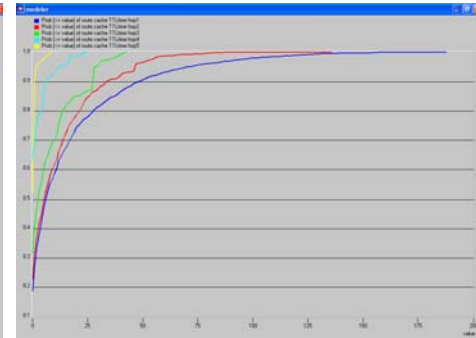
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος διαμορφώση



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος διαμορφώση



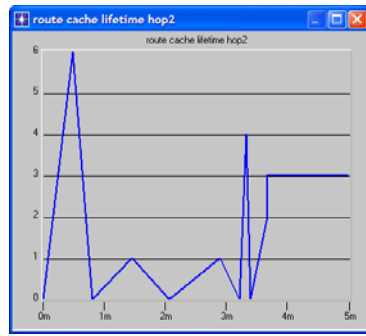
C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache



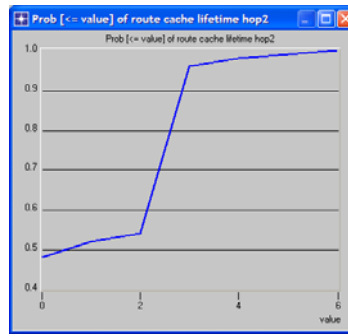
D: CDF Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

Εικόνα 40: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων

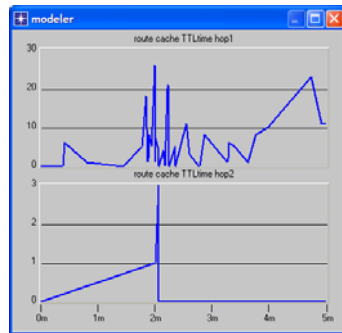
### 10.2.2. Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 20 κόμβων



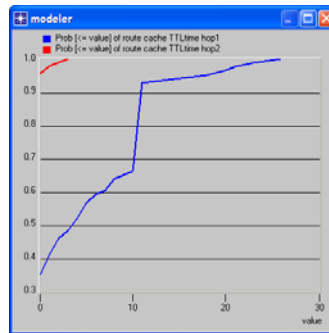
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης

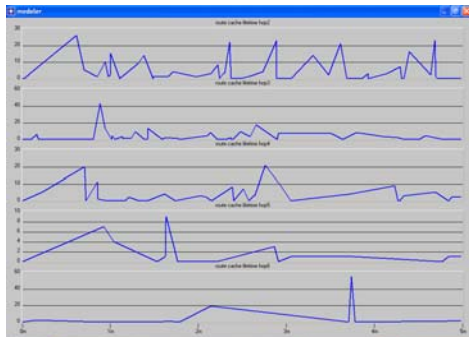


C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

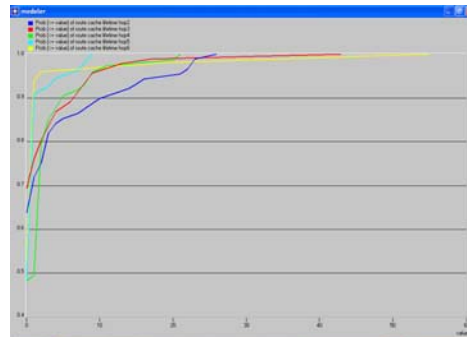


D: CDF Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

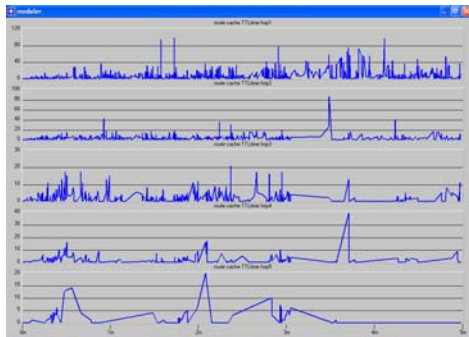
Εικόνα 41: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων



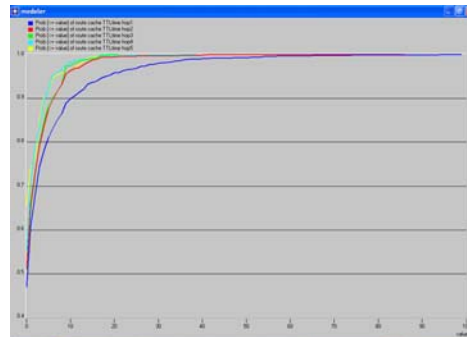
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος δρομολόγησης

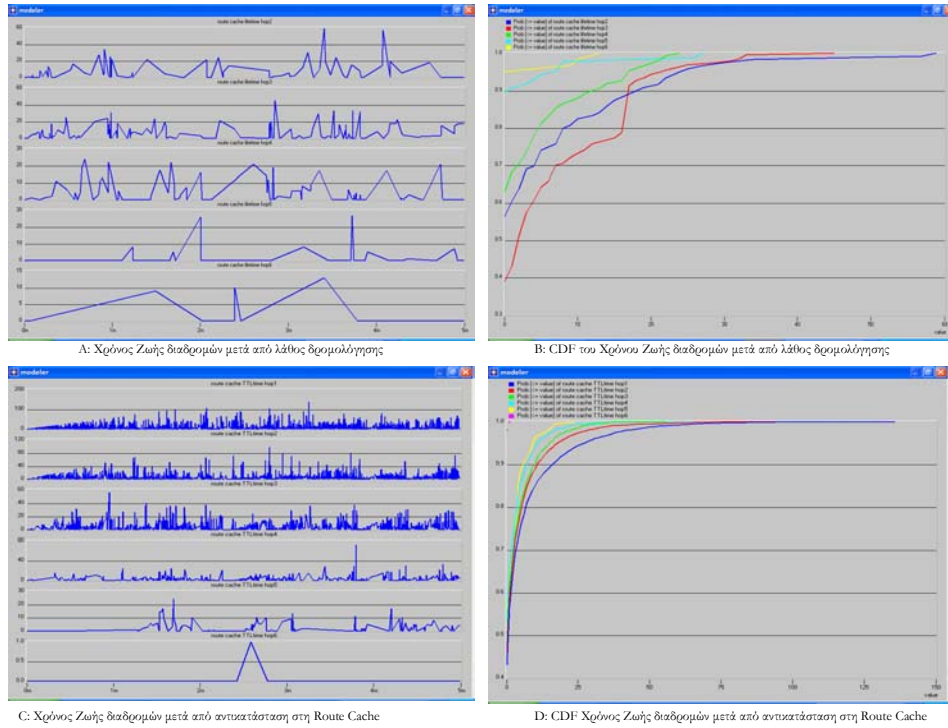


C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

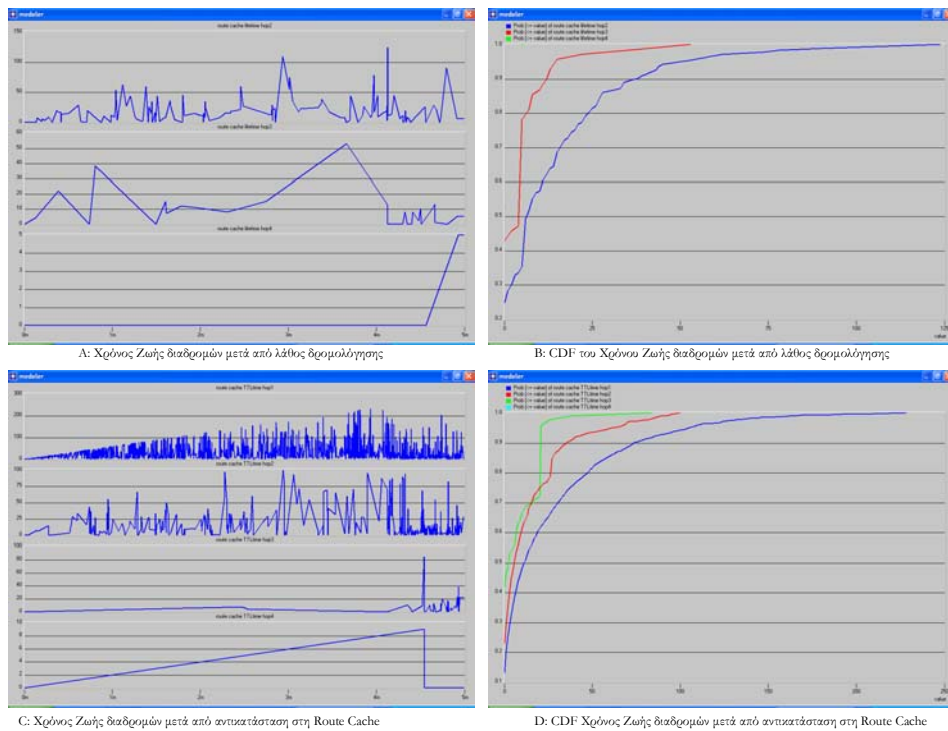


D: CDF Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

Εικόνα 42: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων

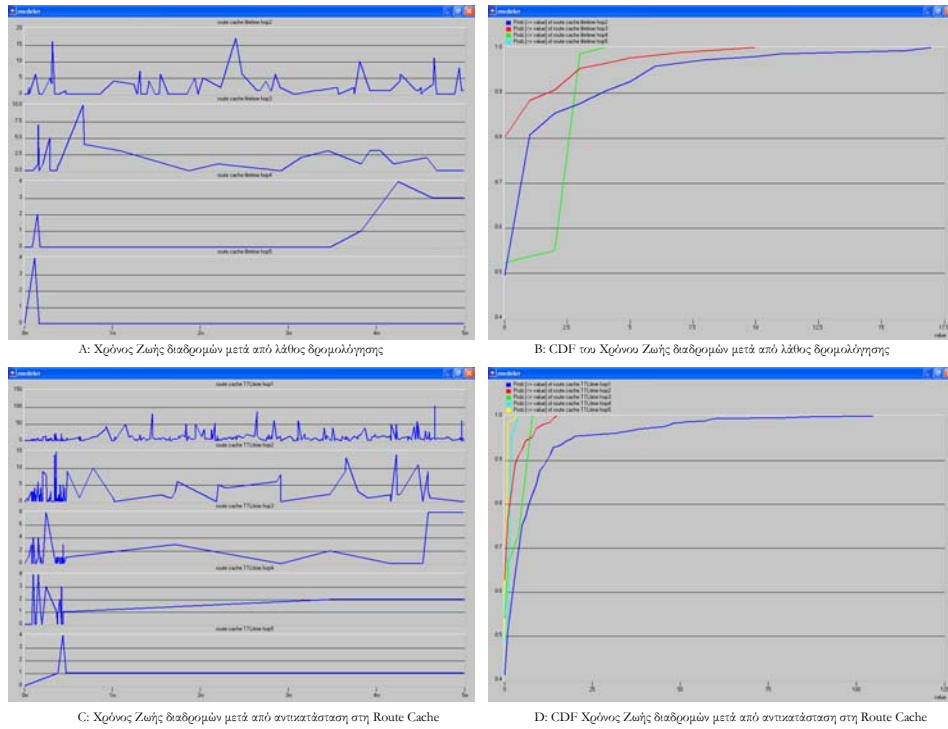


Εικόνα 43: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων

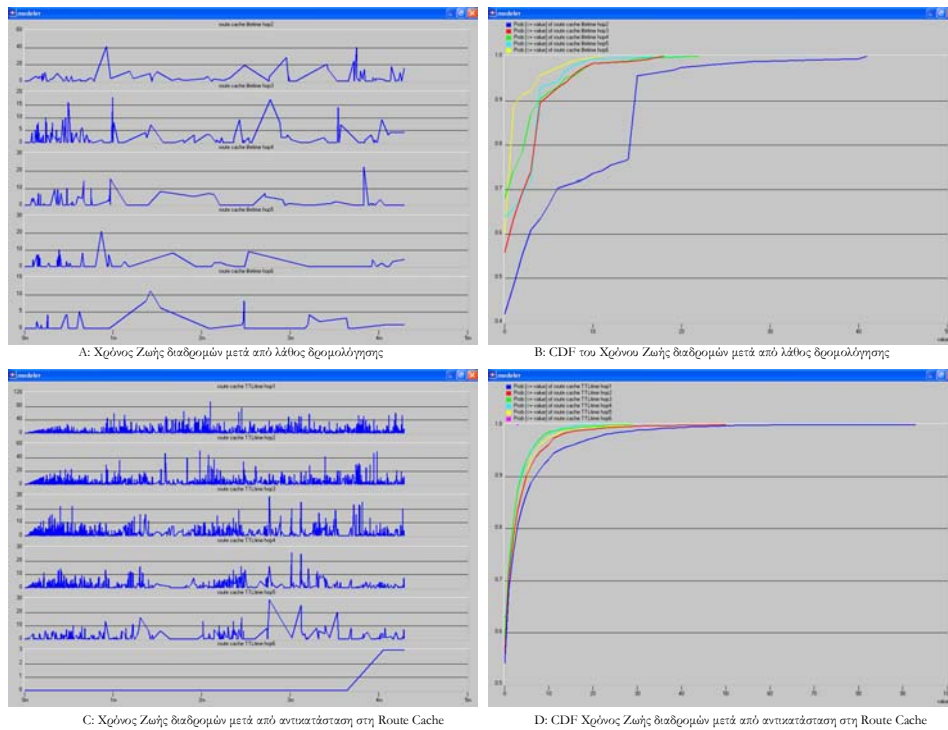


Εικόνα 44: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων

### 10.2.3. Πειράματα με ad-hoc ασύρματα δίκτυα 30 κόμβων

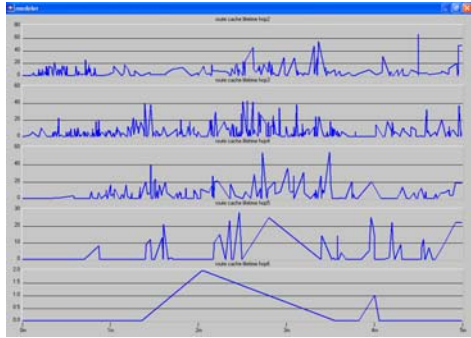


Εικόνα 45: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 50 μέτρων

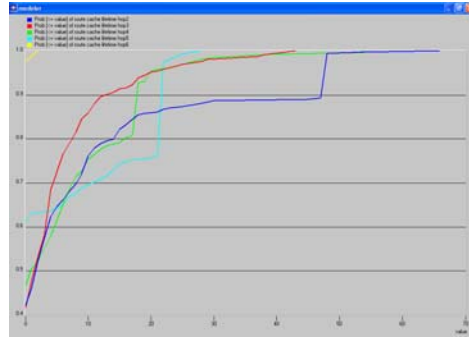


Εικόνα 46: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 100 μέτρων

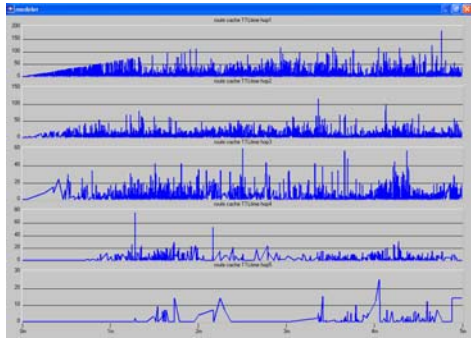




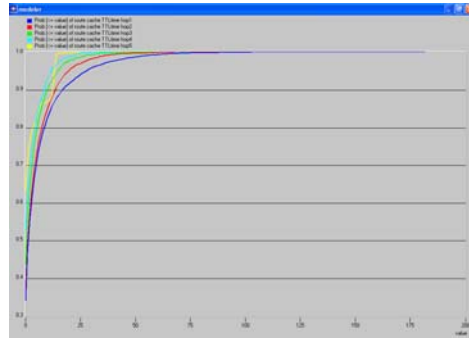
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος διαμοίησης



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος διαμοίησης

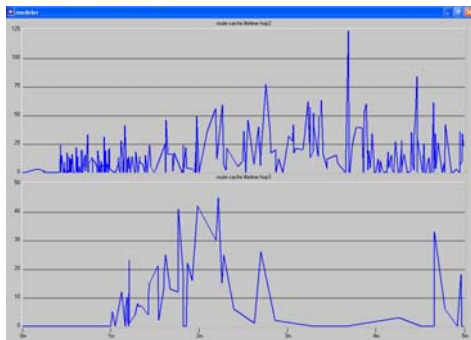


C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

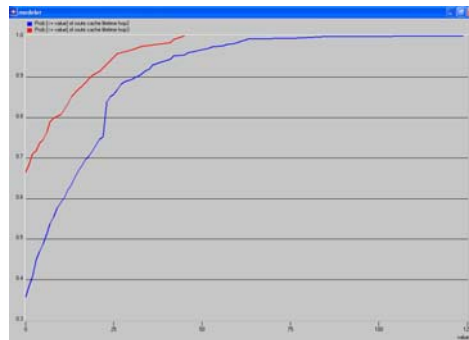


D: CDF Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

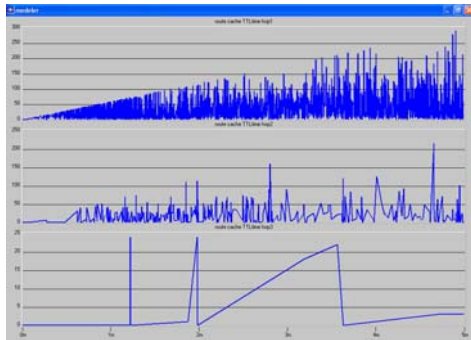
Εικόνα 47: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 200 μέτρων



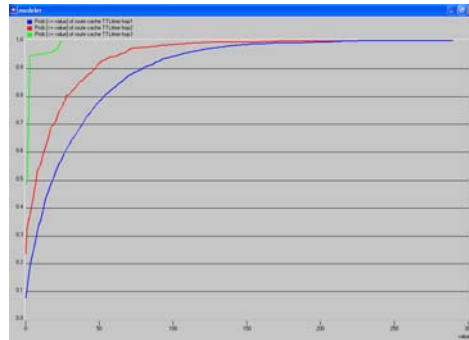
A: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από λάθος διαμοίησης



B: CDF του Χρόνου Ζωής διαδρομών μετά από λάθος διαμοίησης



C: Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache



D: CDF Χρόνος Ζωής διαδρομών μετά από αντικατάσταση στη Route Cache

Εικόνα 48: Δίκτυο κόμβων εμβέλειας 300 μέτρων

# Κεφάλαιο 11

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

### 11. Παράρτημα Γ

#### 11.1. Αποτελέσματα εφαρμογής του TTL.

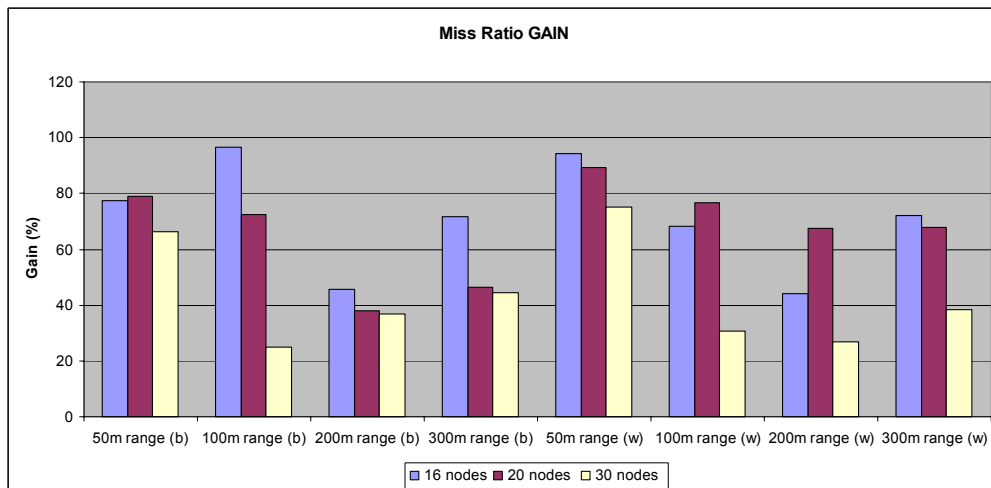
Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζουμε τις γραφικές παραστάσεις από τα πειράματα που εκτελέσαμε στο μοντέλο του DSR στο OPNET με την χρήση της παραμέτρου TTL.

Τα αποτελέσματα διαφέρουν όσο αφορά τ

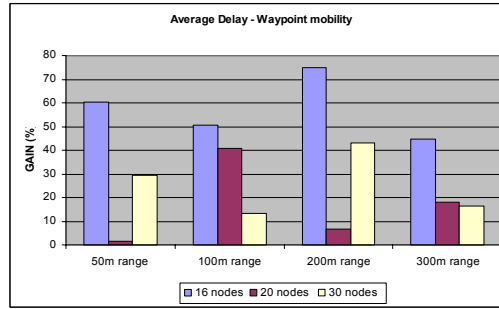
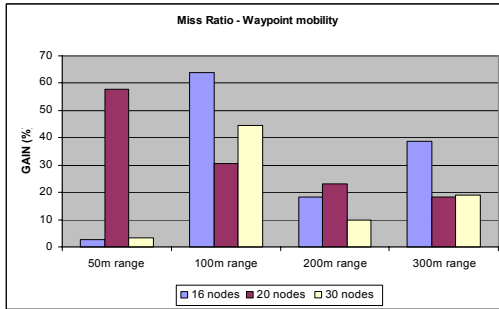
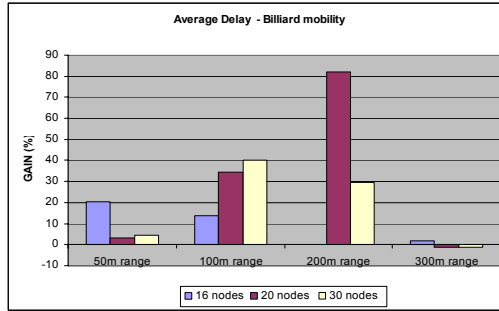
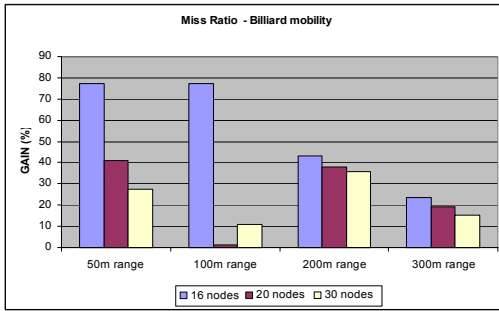
#### 11.2. Γραφικές παραστάσεις ποσοστών κέρδους από την εφαρμογή του TTL στις Route Caches των κόμβων.

Στην κάθε περίπτωση συγκρίνουμε διαφορετικές παραμέτρους της απόδοσης του πρωτοκόλλου. Έτσι στην πρώτη αναφερόμαστε στο miss ratio, στην δεύτερη στο miss ratio και στο average delay ενώ στην τρίτη στο miss ratio, average delay και throughput.

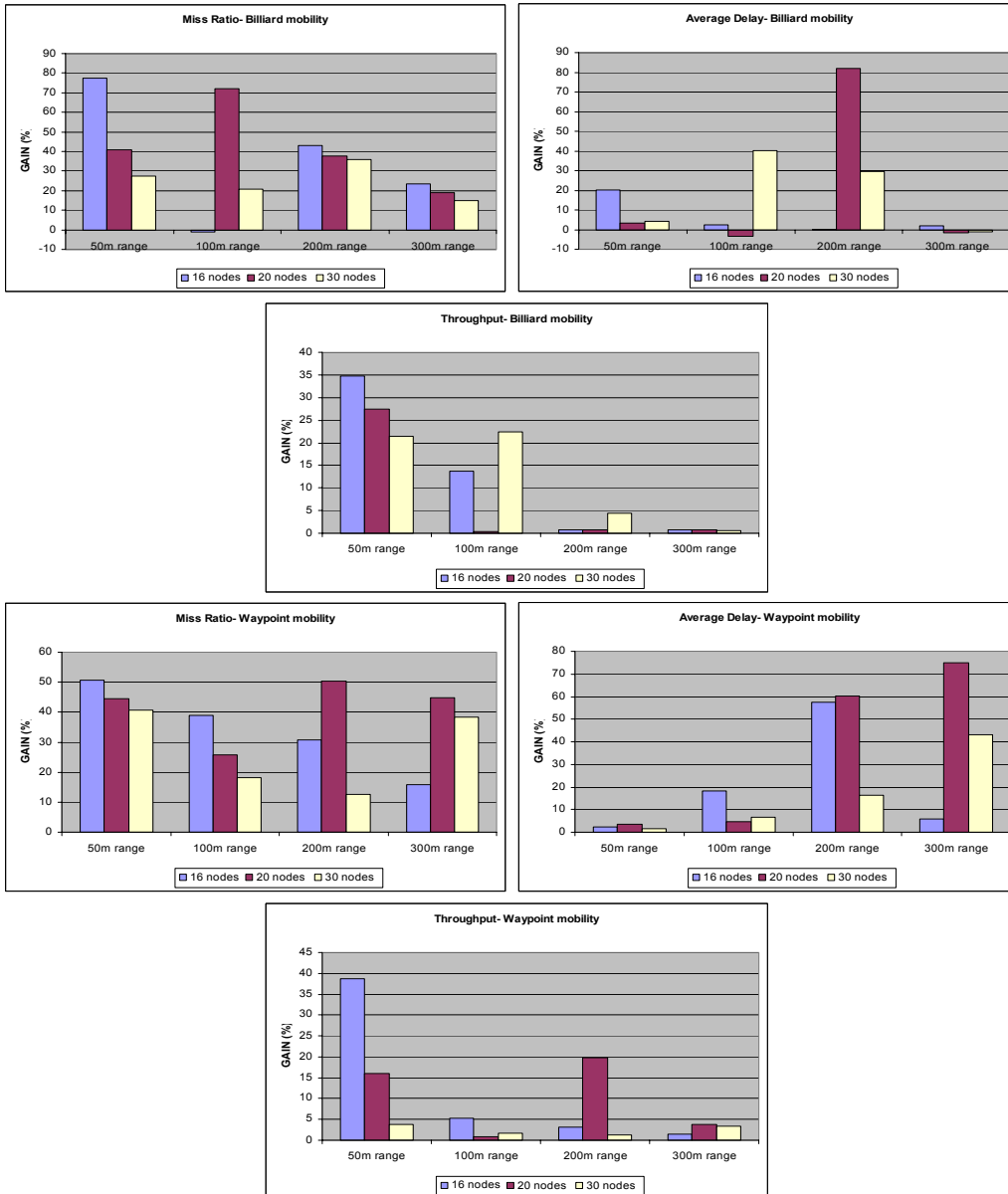
##### 11.2.1. Κέρδος του Miss Ratio



### 11.2.2. Κέρδος του Miss Ratio και του average delay



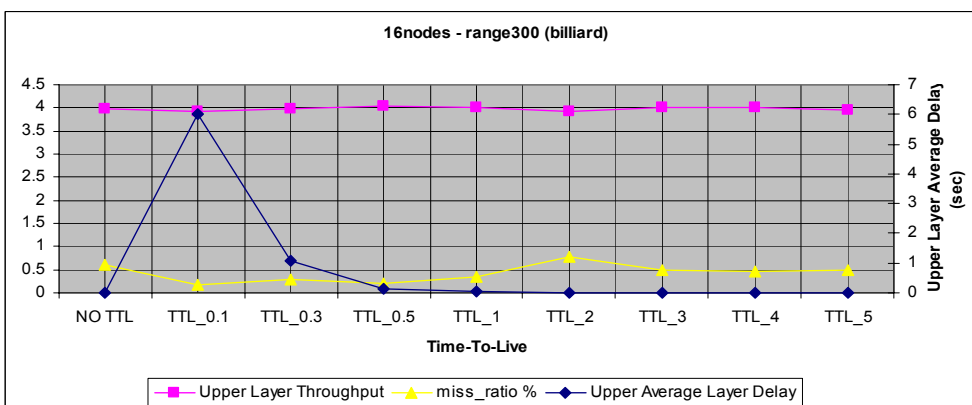
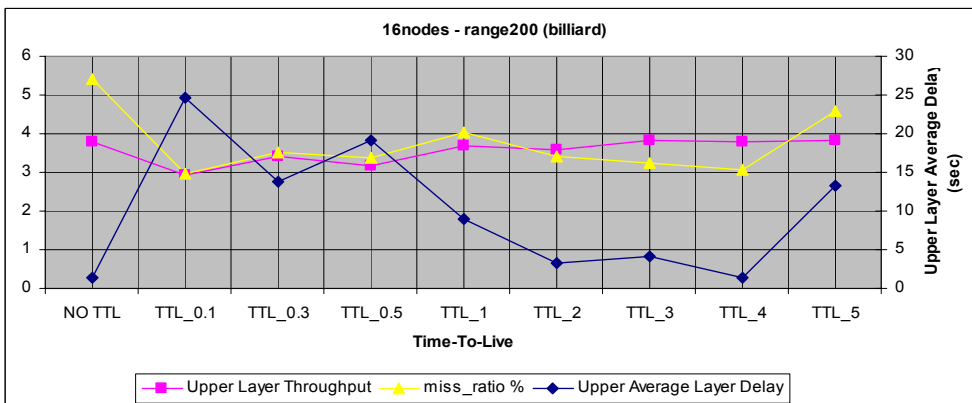
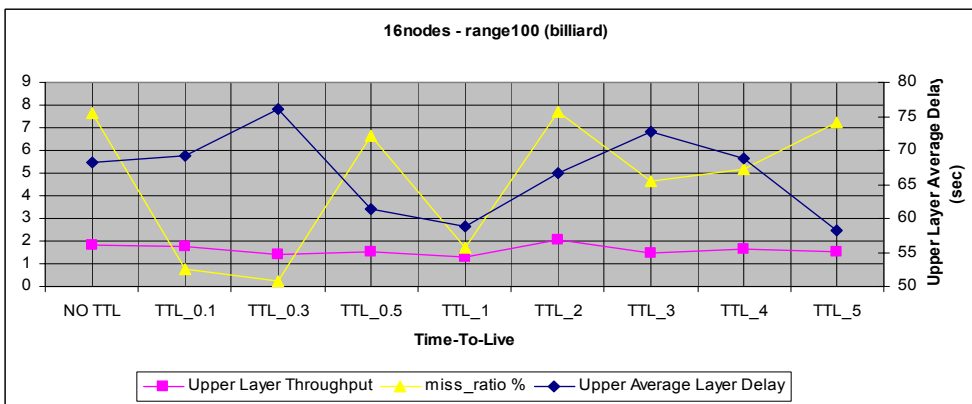
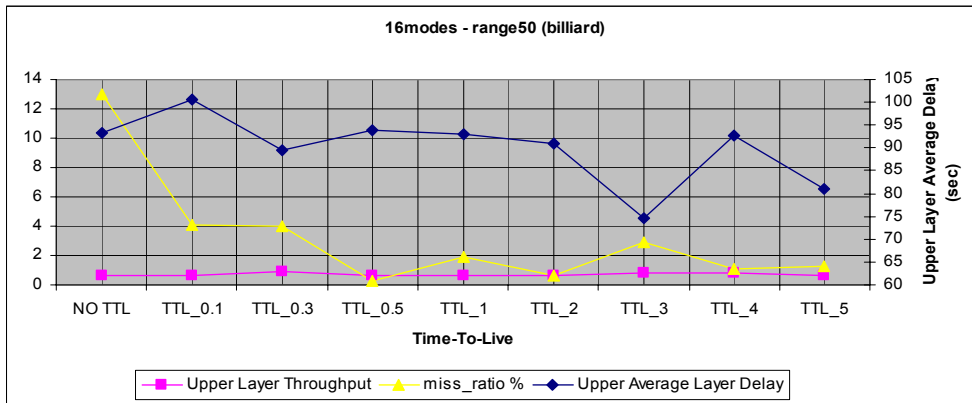
### 11.2.3. Κέρδος του Miss Ratio και του average delay και του Throughput



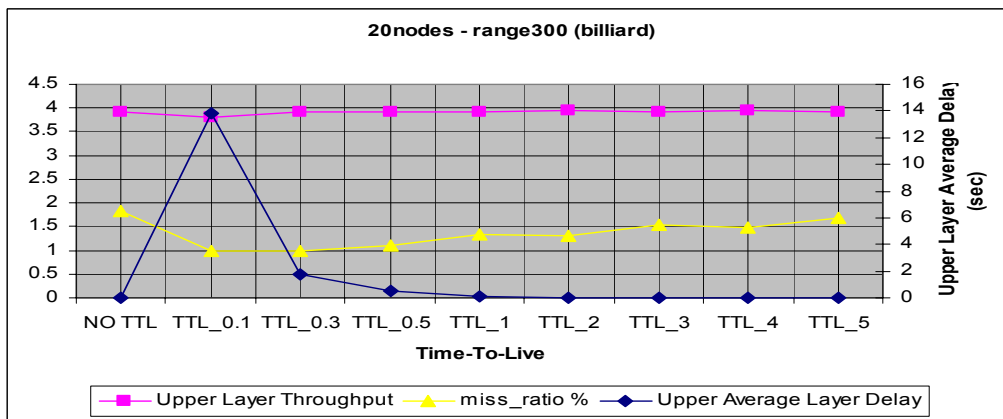
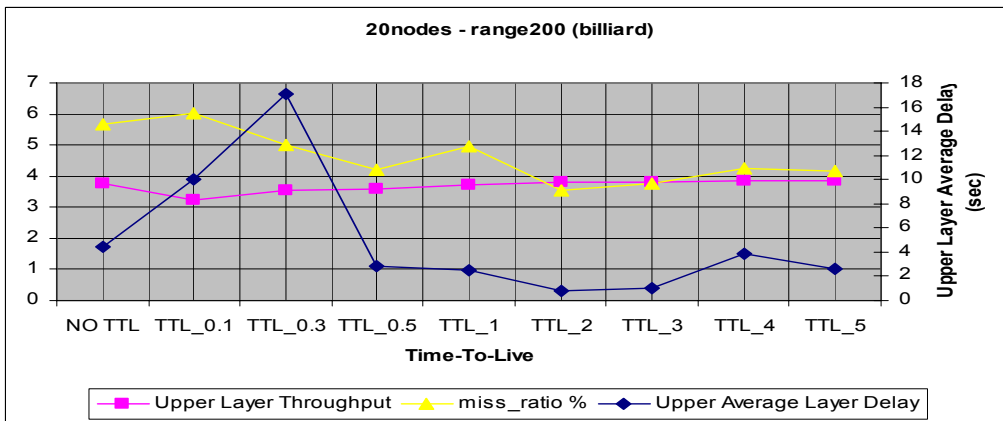
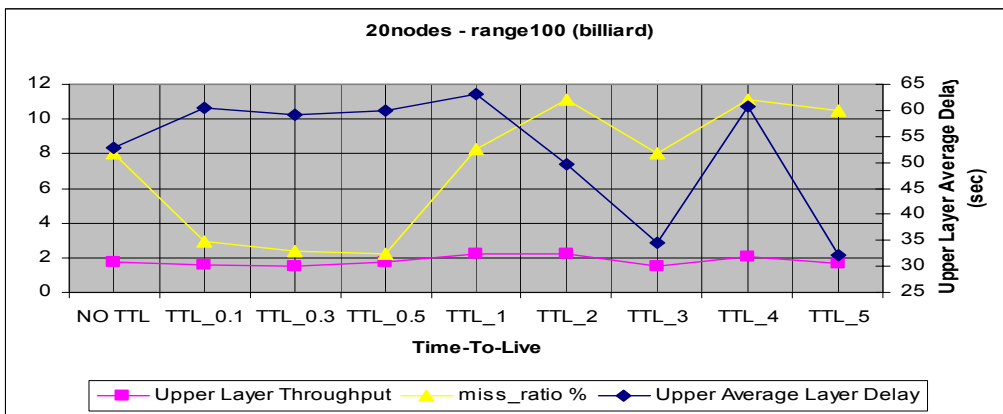
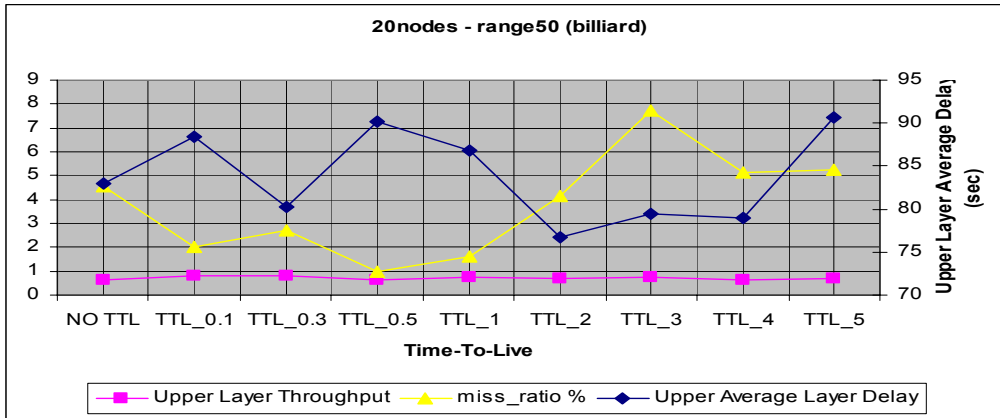
11.3. Γραφικές παραστάσεις εφαρμογής του TTL στις Route Caches των κόμβων.

### 11.3.1. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «billiard».

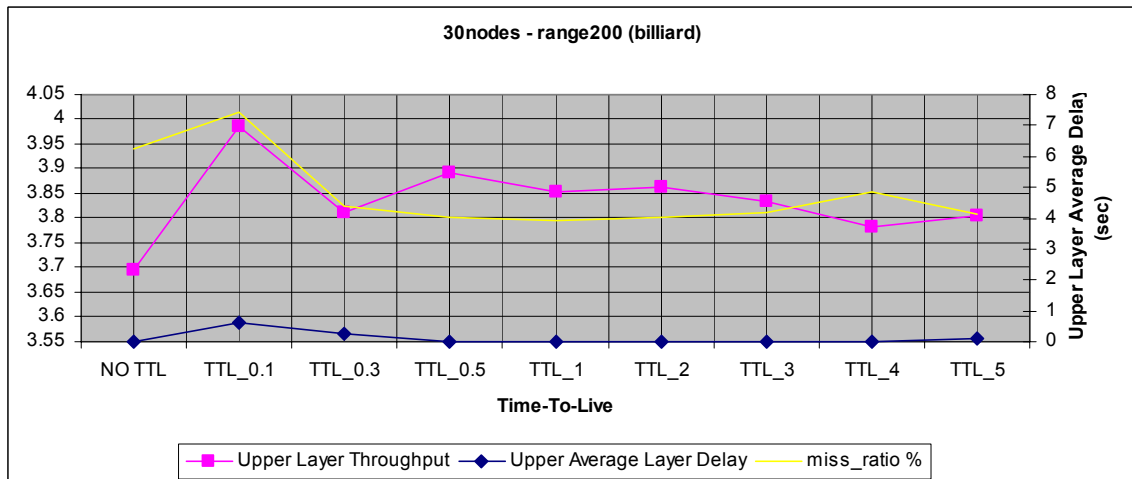
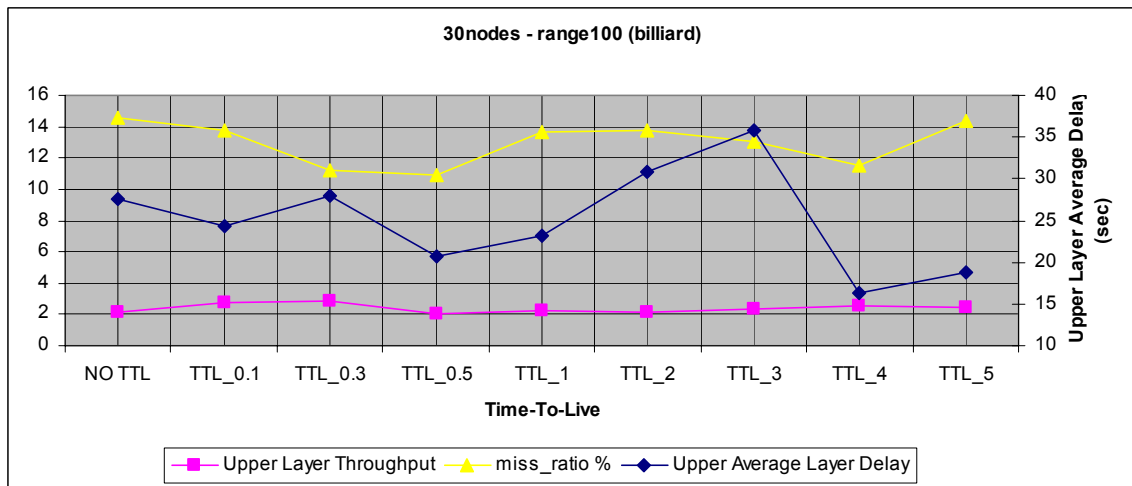
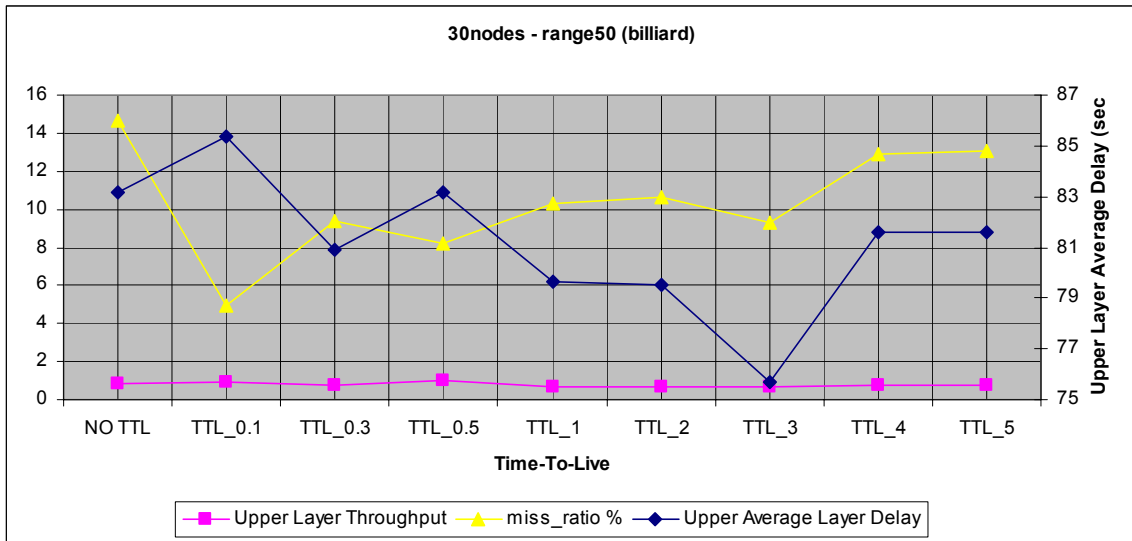
#### 11.3.1.1. Δίκτυο 16 κόμβων



11.3.1.1.1. Δίκτυο 20 κόμβων



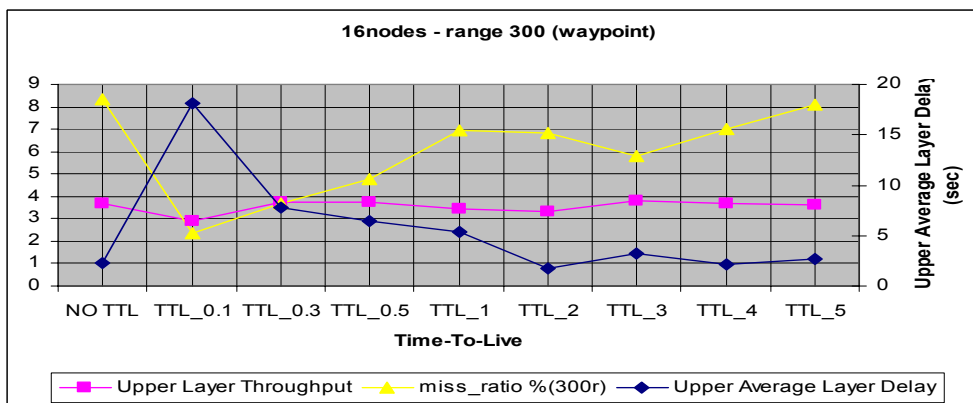
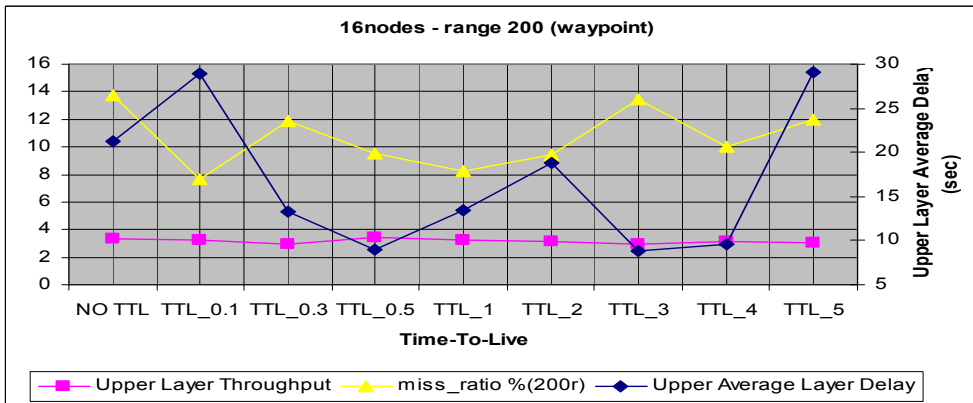
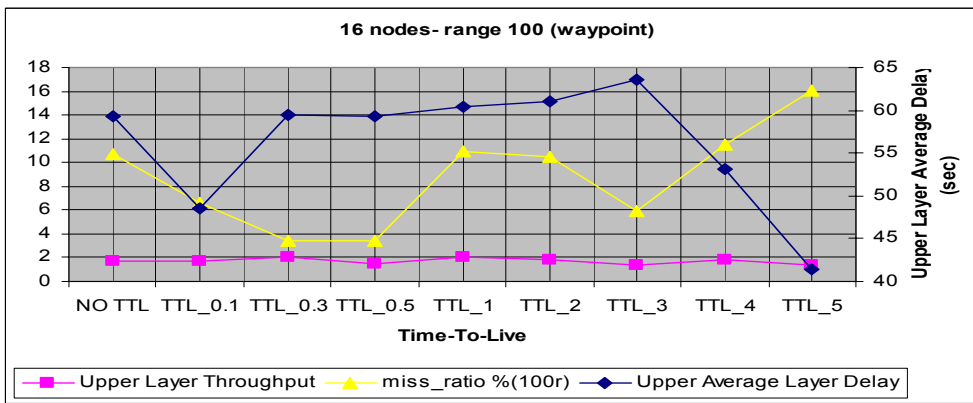
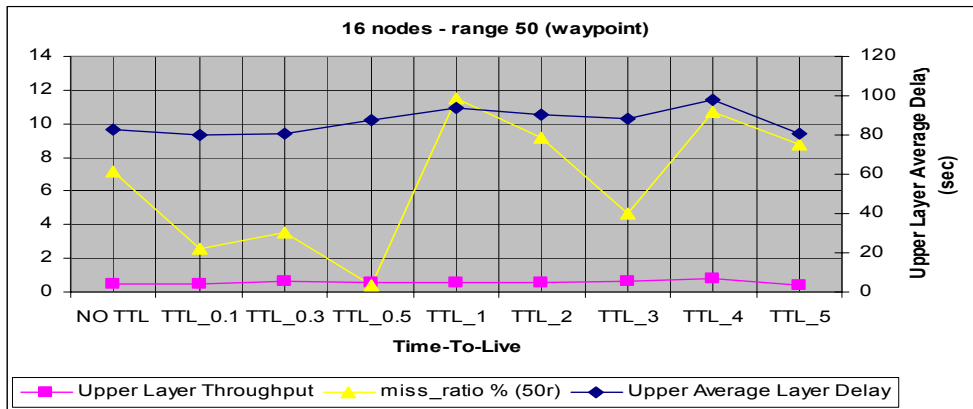
11.3.1.1.2. Δίκτυο 30 κόμβων



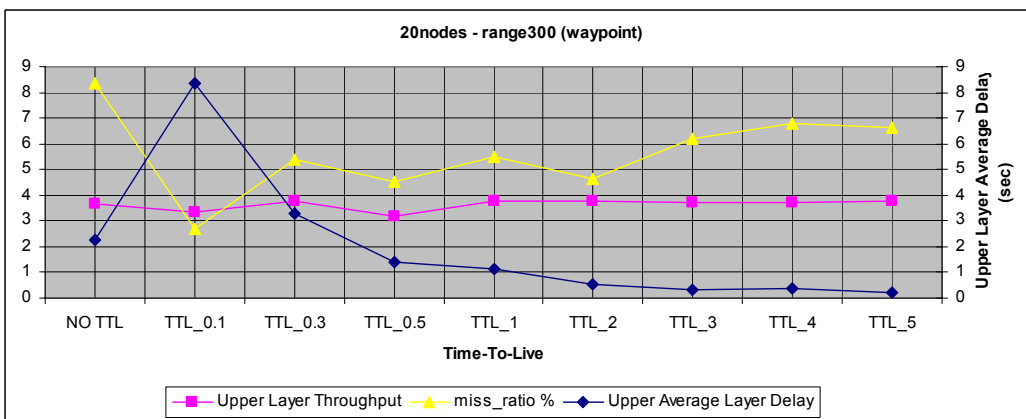
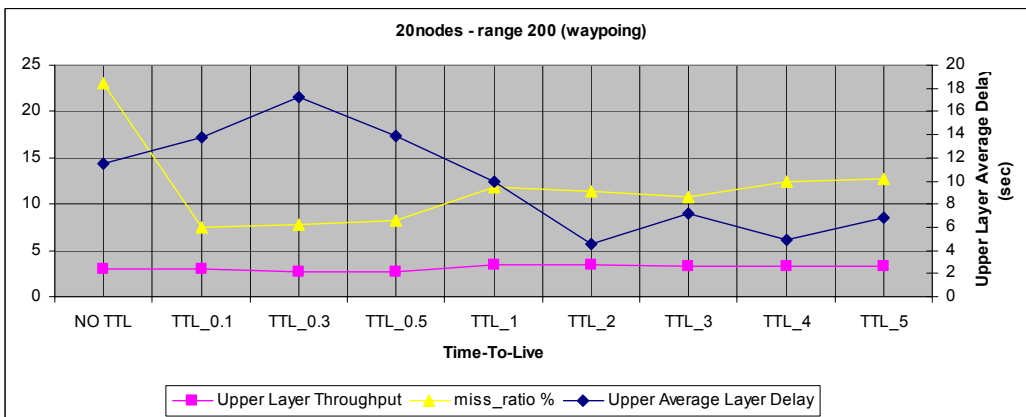
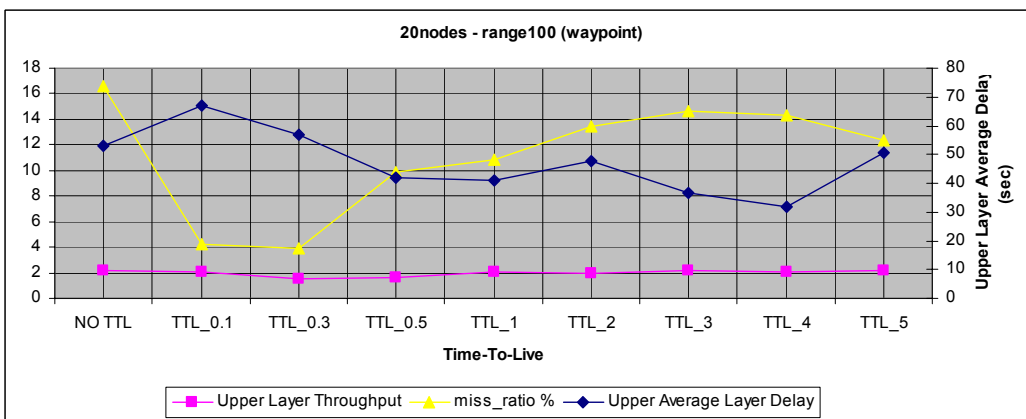
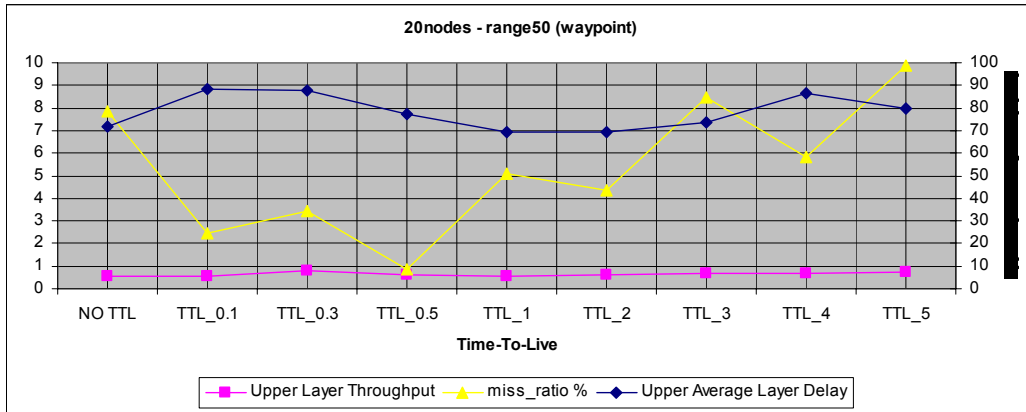


11.3.1.2. Πειράματα με την χρήση του μοντέλου κίνησης «waypoint»

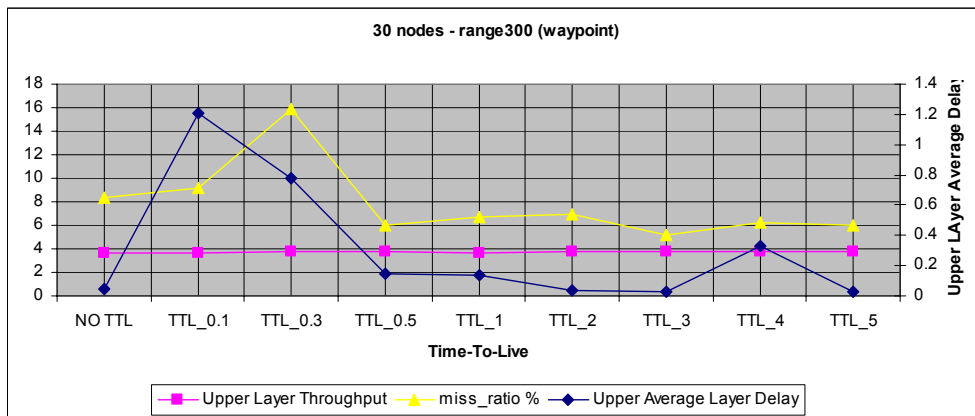
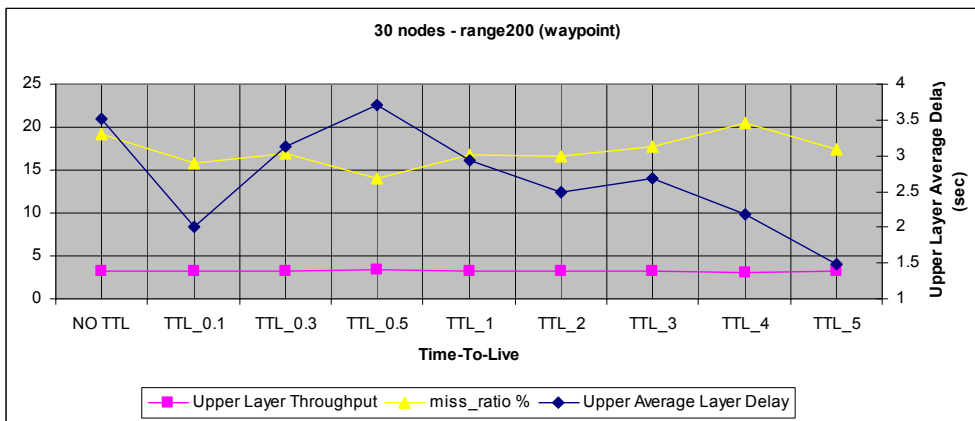
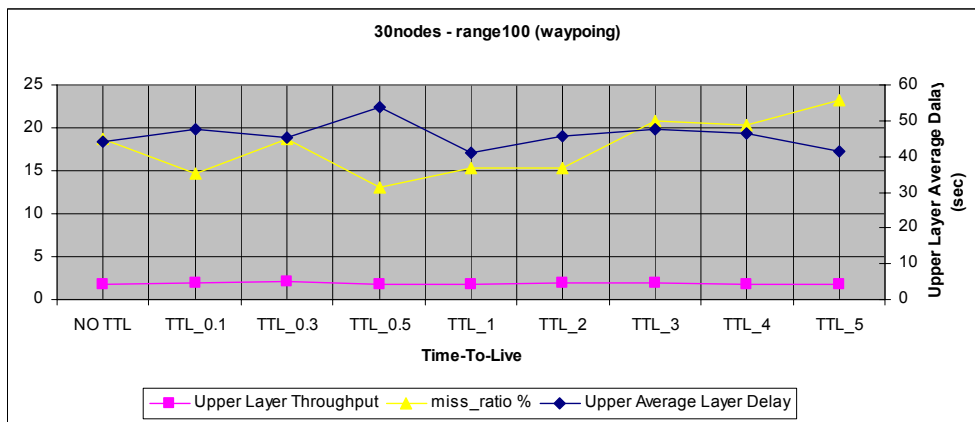
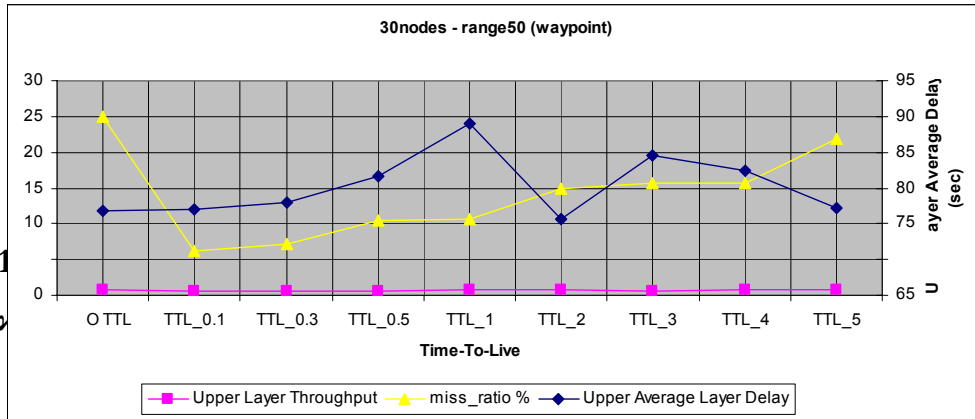
11.3.1.2.1. Δίκτυο 16 κόμβων



11.3.1.2.2. Δίκτυο 20 κόμβων



11.3.1.2.3. Δίκτυο 30 κόμβων



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## 12. Βιβλιογραφία

- [Aggelou 1999] G. Aggelou and R. Tafazolli, “RDMAR: A bandwidth-efficient routing protocol formobile ad hoc networks,” in ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WoWMoM), August 1999.
- [Bae 2000] S.H. Bae, S.-J. Lee, W. Su, and M. Gerla, “The design, implementation, and performance evaluation of the on-demand multicast routing protocol in multihop wireless networks,” *IEEE Network*, vol. 14, January 2000, 70-77.
- [Bantz 1994] David F. Bantz and F. J. Bauchot. Wireless LAN Design Alternatives. *IEEE Network*, 8(2):43–53, March/April 1994.
- [Basagni 1998] S. Basagni, I. Chlamtac, V.R. Syrotiuk, and B.A. Woodward, “A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM),” in ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, October 1998, 76-84.
- [Braden 1989] Robert T. Braden, editor. Requirements for Internet Hosts—Communication Layers. RFC 1122, October 1989.
- [Broch 1999a] Josh Broch, David B. Johnson, and David A. Maltz. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. Internet-Draft, draft-ietf-manet-dsr-03.txt, October 1999. Work in progress. Earlier revisions published June 1999, December 1998, and March 1998.
- [Broch 1999b] Josh Broch, David A. Maltz, and David B. Johnson. Supporting Hierarchy and Heterogeneous Interfaces in Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks. In *Proceedings of The International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (ISPAN'99)*, Workshop on Mobile Computing, Perth, Western Australia, June 1999. IEEE Computer Society.
- [Chiang 1998] C.-C. Chiang, M. Gerla, and L. Zhang, “Forwarding Group Multicast Protocol (FGMP) for Multihop, Mobile Wireless Networks,” *Baltzer Cluster Computing*, special Issue on Mobile Computing, vol. 1, no. 2, 1998, 187-196.
- [Chlamtac 1986] L. Chlamtac and A. Lerner, “Link allocation in mobile radio networks with noisy channel,” In Proc. of the IEEE INFOCOM, April 1986.
- [Corson 1996] M.S. Corson, J. Macker, and S. Batsell, “Architectural Considerations for Mobile Mesh Networking,” In Proceedings of the IEEE MILCOM, October 1996.
- [Corson 1997] M.S. Corson and V.D. Park, “An Internet MANET Encapsulation Protocol (IMEP) Specification,” Internet-Draft, Nov. 1997.
- [Dan 2002] Dan C. Marinescu, Gabriela M. Marinescu, Yongchang Ji, and Ladislau Boloni, “Ad Hoc Grids: Communication and Computing in a Power Constrained Environment”, 2002.
- [Droms 1997] Ralph Droms, Dynamic Host Configuration Protocol. RFC 2131, March 1997.
- [Dube 1997] R. Dube, “Signal stability based adaptive routing for ad hoc mobile networks,” In Proc. of IEEE Personal Communications, February 1997, 36-45.

- [Haarsten 1998] J. Haarsten, “Bluetooth – The Universal Radio Interface for Ad Hoc Wireless Connectivity,” *Ericsson Review* (3), 1998.
- [Haas 1998] Z. Haas et al, “The performance of query control schemes for the zone routing protocol,” in *ACM SIGCOMM*, 1998.
- [Hu 2003] Yih.Chun Hu and David B. Johnson, Ensuring Cache Freshness in On Demand Ad Hoc Network Routing Protocols, in *IEEE INFOCOM 2003*
- [IEEE 1997] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Std 802.11-1997. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, New York, 1997.
- [IETF] Internet Engineering Task Force (IETF), <http://www.ietf.org/>.
- [Iwata 1999] A. Iwata, C.-C. Chiang, G. Pei, M. Gerla, and T.-W. Chen, “Scalable Routing Strategies for Ad Hoc Wireless Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, August 1999, 1369-1379.
- [Jardosh 2003] Amit Jardosh, Elizabeth M. BeldingRoyer, Kevin C. Almeroth, Subhash Suri, “Towards Realistic Mobility Models For Mobile Ad hoc Networks”, *MobiCom* September 2003.
- [Jin 2000] K.T. Jin and D.H. Cho, “A MAC Algorithm for Energy-limited Ad Hoc Networks,” In *Proceedings of Fall VTC 2000*, September 2000, 219-222.
- [Johnson 1994] David B. Johnson. Routing in Ad Hoc Networks of Mobile Hosts. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pages 158–163. IEEE Computer Society, December 1994.
- [Johnson 1995] David B. Johnson. Scalable Support for Transparent Mobile Host Internetworking. *Wireless Networks*, 1(3):311–321, October 1995.
- [Johnson 1996a] David B. Johnson and David A. Maltz. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In *Mobile Computing*, edited by Tomasz Imielinski and Hank Korth, chapter 5, pages 153–181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [Jubin 1987] J. Jubin and T. Truong, “Distributed Algorithm for Efficient and Interference free Broadcasting in Radio Networks,” in *Proceedings of INFOCOM*, January 1987, 21-32.
- [Katz 1996] Randy H. Katz and Eric A. Brewer. The Case for Wireless Overlay Networks. In *Proceedings of the SPIE Multimedia and Networking Conference (MMNC’96)*, San Jose, CA, January 1996. SPIE.
- [Ko 1998] Y.-B. Ko and N.H. Vaidya, “Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks,” in *ACM MOBICOM*, November 1998.
- [Lauer 1995] Gregory S. Lauer. Packet-Radio Routing. In *Routing in Communications Networks*, edited by Martha E. Steenstrup, chapter 11, pages 351–396. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- [Liang 2003] Ben Liang and Zygmunt J. Haas, Optimizing Route-Cache Lifetime in Ad Hoc Networks, in *IEEE INFOCOM 2003*

- [MANET] IETF MANET Working Group,  
<http://www.ietf.org/html.charters/manetcharter.html>.
- [Murthy 1996] S. Murthy and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "An efficient routing protocol for wireless networks," In ACM Mobile Networks and Applications Journal, October 1996, 183-197.
- [Pei 2000] G. Pei, M. Gerla, and X. Hong, "Lanmar: Landmark routing for large scale wireless ad hoc networks with group mobility," In ACM MobiHoc, August 2000.
- [Park 1997] V.D. Park and M.S. Corson, "A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile and wireless networks," In Proceeding of IEEE INFOCOM, April 1997, 103-112.
- [Perkins 1994] C.E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers," In Computer Comm. Review, October 1994, 234-244.
- [Perkins 1996] Charles Perkins, editor. IP Mobility Support. RFC 2002, October 1996.
- [Perkins 1999] C.E. Perkins and E. Royer, "Ad hoc on-demand distance vector routing," IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, February 1999, 90-100.
- [Pietro 2002] Pietro Michiardi and Refik Molva, "Simulation-based Analysis of Security Exposures in Mobile Ad Hoc Networks" European Wireless Conference, 2002.
- [Royer 1999] E.M. Royer and C.E. Perkins, "Multicast operation of the ad-hoc on-demand distance vector routing protocol," in ACM MOBICOM, August 1999, 207-218.
- [Rüdiger 2002] Rüdiger Schollmeier, Ingo Gruber and Michael Finkenzeller, "Routing in Mobile Ad Hoc and Peer-to-Peer Networks. A Comparison" in International Workshop on Peer-to-Peer Computing, May 2002.
- [Singh 1998] S. Singh, M. Woo, and C.S. Raghavendra, "Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks," In Proceedings of Mobihoc, 1998, 181-190.
- [Seung 2001] Seung Yi Prasad Naldurg Robin Kravets, "Security-Aware Ad-Hoc Routing for Wireless Networks", August, 2001.
- [Toh 1997] C.-K. Toh, "Associativity based routing for ad hoc mobile networks," Wireless Personal Communications, March 1997.
- [Tsuchiya 1988] P.F. Tsuchiya, "The Landmark Hierarchy: a new hierarchy for routing in very large networks," In Computer Communication Review, vol.18, no.4, Aug. 1988, 35-42.