

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

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

**Multipath Routing Protocols**  
**for Mobile Ad Hoc Networks based on AODV**

**Σαμαρά Χρυσούλα**

**E-mail: [mis1021@uom.gr](mailto:mis1021@uom.gr) / [chrsamar@gmail.com](mailto:chrsamar@gmail.com)**

**Θεσσαλονίκη**  
**Ιανουάριος 2011**

## Abstract

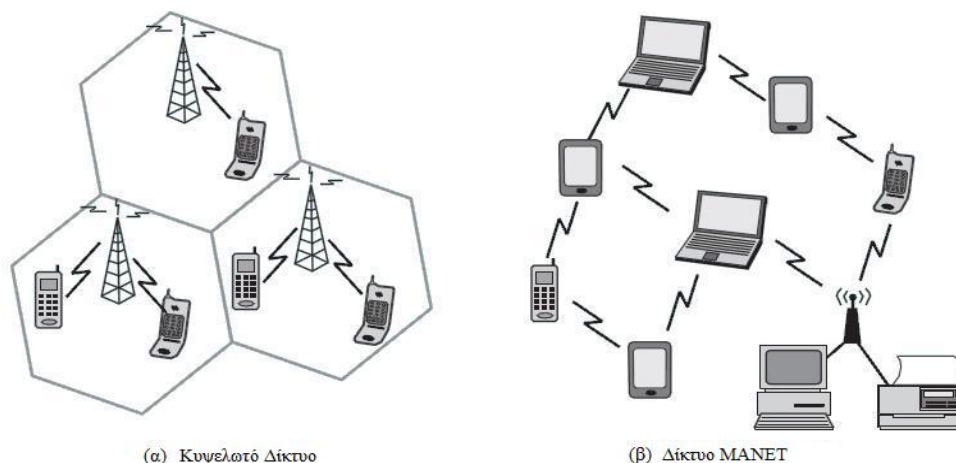
The need of today's society for continuous communication regardless where the terminals are, has led to the design and the development of wireless networks, which consist of mobile nodes and enable communication, even when there is no fixed network infrastructure. These networks are called MANETs (Mobile Ad Hoc Networks) and are currently the subject of systematic study. This paper investigates the classification of routing protocols for MANETs and especially multipath routing protocols which provide reliable communication and quality of service (QoS) in MANETs. More specifically, we analyze the protocols derived from AODV routing protocol and developed in order to exploit the advantages it offers.

## Περίληψη

Η ανάγκη της σημερινής κοινωνίας για αδιάλειπτη επικοινωνία ανεξάρτητα από την τοποθεσία των τερματικών σταθμών, έχει οδηγήσει στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων τα οποία αποτελούνται από κινητούς κόμβους και παρέχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας ακόμα και σε περιπτώσεις όπου δεν υφίσταται σταθερή δικτυακή υποδομή. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται MANETs (Mobile Ad Hoc Networks) και αποτελούν σήμερα αντικείμενο συστηματικής μελέτης. Στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε με την κατηγοριοποίηση των πρωτόκολλων δρομολόγησης που εφαρμόζονται στα MANETs και ειδικότερα με τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών (multipath routing protocols) τα οποία προσφέρουν αξιόπιστη επικοινωνία και ποιότητα υπηρεσιών (QoS) στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, αναλύονται τα πρωτόκολλα που προέρχονται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV και το εξελίσσουν με σκοπό την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που αυτό προσφέρει.

## 1. Περιγραφή των δικτύων MANET

Ένα κινητό δίκτυο Ad Hoc (mobile ad hoc network) είναι μια συλλογή ασύρματων κινητών κόμβων, οι οποίοι μπορούν δυναμικά να συνδεθούν στο δίκτυο όπου κι αν βρίσκονται και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή χωρίς να γίνει χρήση κάποιας προϋπάρχουσας υποδομής δικτύου (Εικόνα 1.(β)). Αυτή είναι και η κύρια διαφορά τους από τα ασύρματα δίκτυα που βασίζονται σε κάποια υποδομή (όπως για παράδειγμα τα κυψελωτά δίκτυα) και στα οποία κάθε χρήστης επικοινωνεί απευθείας με ένα σημείο πρόσβασης ή έναν σταθμό βάση (Εικόνα 1.(α)). Στην ουσία είναι ένα αυτόνομο δίκτυο του οποίου οι κινητοί κόμβοι συνδέονται ασύρματα, είναι ελεύθεροι να κινηθούν τυχαία προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, με αποτέλεσμα τη πιθανή και απροσδόκητη αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου. Επιπλέον, πρέπει να συνεργάζονται έτσι ώστε δυναμικά να αποκαθιστούν την επικοινωνία κάνοντας χρήση της περιορισμένης διαχείρισης δικτύου (Hoebeke, Moerman, Dhoedt, & P., 2004).



(α) Κυψελωτό Δίκτυο

(β) Δίκτυο MANET

**Εικόνα 1. Παράδειγμα κυψελωτού δικτύου και δικτύου MANET.**

Κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται στο μεταξύ τους πεδίο αποστολής μπορούν να επικοινωνούν απευθείας και είναι υπεύθυνοι για την εύρεση τους δυναμικά. Στην περίπτωση όμως που πρέπει να επιτευχτεί επικοινωνία μεταξύ κόμβων που δεν είναι άμεσα προσπελάσιμοι, ενδιάμεσοι κόμβοι δρουν σαν δρομολογητές (routers) αναμεταδίδοντας πακέτα τα οποία παράγονται από άλλους κόμβους. Για τη διαδικασία αυτή απαιτούνται αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης η κατασκευή των οποίων είναι αρκετά σύνθετη διαδικασία για τα MANETs (Sun, 2001). Πολλά πρωτόκολλα έχουν προταθεί δημιουργώντας αρκετές κατηγορίες για την κατηγοριοποίηση τους, δυο εκ των οποίων αποτελούν τις βασικότερες, η Proactive (table-driven) και η Reactive (on-demand) (Tarique, Tepe, Adibi, & Erfani, 2009).

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης της Proactive κατηγορίας, όπως για παράδειγμα το DSDV (Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector routing protocol) (Perkins

& Bhagwat, 1994), διατηρούν για κάθε κόμβο του δικτύου πίνακες δρομολόγησης τους οποίους ενημερώνουν περιοδικά ανταλλάσσοντας πληροφορίες μεταξύ των κόμβων. Για τη διαρκή ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης παράγεται μεγάλος αριθμός μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ των κόμβων με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλου αριθμού δεδομένων. Οποιαδήποτε αλλαγή στη δομή του δικτύου λόγω αποχώρησης κάποιου κόμβου δεν θα προκαλέσει άμεση αλλαγή στα δεδομένα των πινάκων δρομολόγησης με αποτέλεσμα την πρόκληση αποτυχιών στη διανομή των δεδομένων.

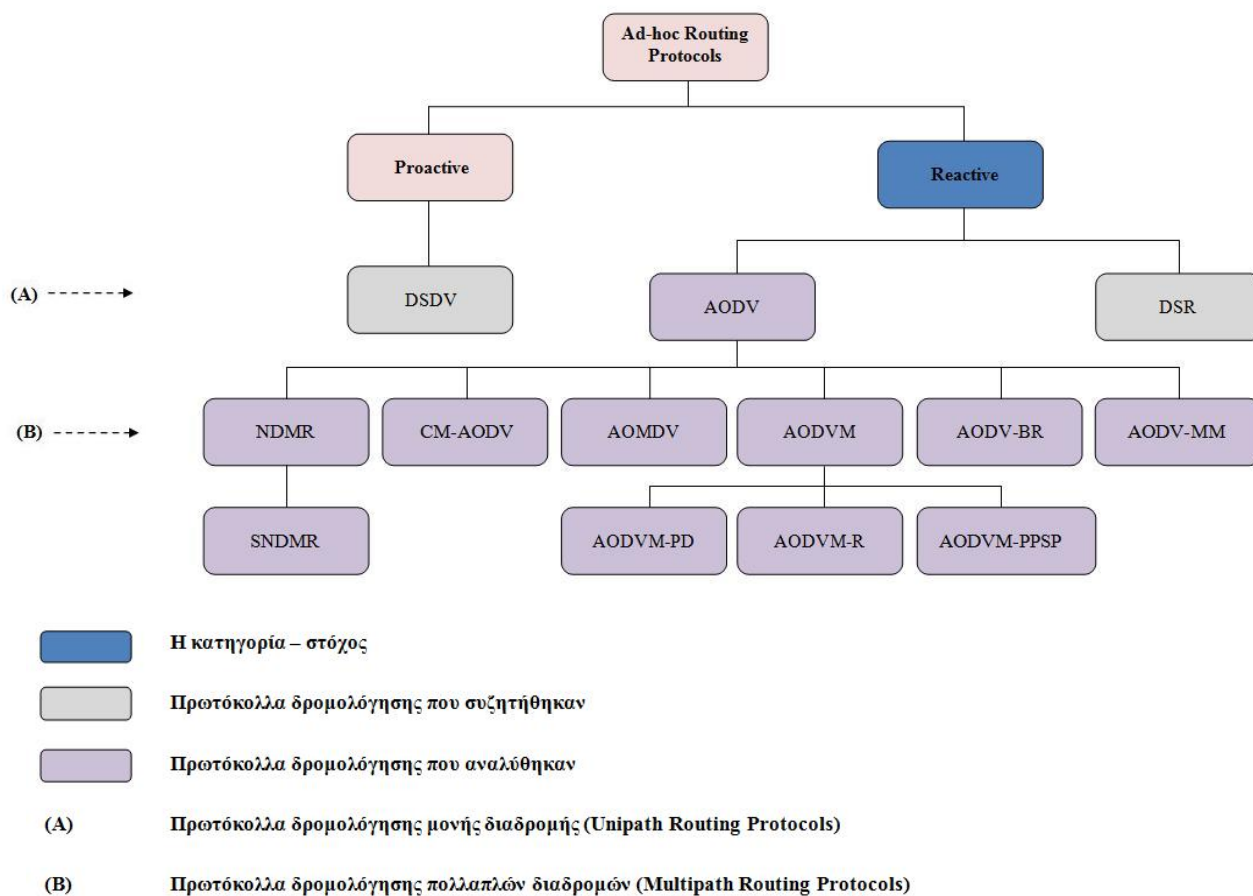
Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης της Reactive κατηγορίας, όπως για παράδειγμα το DSR (Dynamic Source routing protocol) (Johnson, Maltz, & Broch, 2001) και το AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector routing protocol) (Perkins & Royer, 1999), ξεπερνούν τους περιορισμούς των proactive πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Στα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης μια διαδρομή ανακαλύπτεται μόνο όταν απαιτείται. Δυο είναι οι κύριες φάσεις των πρωτοκόλλων αυτής της κατηγορίας: η ανακάλυψη διαδρομής και η διατήρηση διαδρομής. Ο κόμβος-πηγή ανακαλύπτει μια διαδρομή προς τον κόμβο-προορισμό χρησιμοποιώντας το μηχανισμό ανακάλυψης διαδρομής. Επιπλέον, ανιχνεύει κάθε αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου χρησιμοποιώντας το μηχανισμό διατήρησης διαδρομής. Χρησιμοποιείται διαδικασία καθολικής αναζήτησης από τον μηχανισμό αναζήτησης διαδρομής στην οποία ένας κόμβος-πηγή χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό υπερχείλισης (flooding mechanism) για την ανακάλυψη όλων των διαθέσιμων μονοπατιών προς έναν προορισμό και στη συνέχεια ο κόμβος-πηγή επιλέγει ένα μονοπάτι (το συντομότερο), χωρίς να είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος συντομότερης διαδρομής για την ανακάλυψή του.

Το βασικότερο μειονέκτημα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι ότι αν κατά τη φάση μετάδοσης υπάρξει διακοπή στη σύνδεση, τότε όλα τα επόμενα πακέτα απορρίπτονται και πρέπει να πραγματοποιηθεί εκ νέου η φάση αναζήτησης διαδρομής για την εύρεση νέας διαδρομής προς τον κόμβο-προορισμό. Το μειονέκτημα αυτό εξαλείφεται με τη χρήση πρωτοκόλλων δρομολόγησης μέσω πολλαπλών μονοπατιών (multipath routing protocols) αφού κατά τη φάση ανακάλυψης διαδρομής αποθηκεύονται και εναλλακτικά μονοπάτια.

Αν και κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης μέσω πολλαπλών μονοπατιών (multipath routing protocol) χαρακτηρίζεται από μοναδικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, υπάρχουν ορισμένα κοινά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά τους τα οποία είναι η αιτία που τα περισσότερα πρωτόκολλα, τροποποιούν και έχουν σαν βάση τους αλγορίθμους δρομολόγησης των υπαρχόντων πρωτοκόλλων δρομολόγησης μέσω μονής διαδρομής.

## 2. Ανάλυση Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης για τα δίκτυα MANET

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, για την ανάλυση πρωτοκόλλων δρομολόγησης μέσω πολλαπλών μονοπατιών επιλέχθηκαν τα πρωτόκολλα που προέρχονται από την κατηγορία των reactive πρωτοκόλλων και συγκεκριμένα του AODV. Αρχικά, περιγράφεται το βασικό πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV και στη συνέχεια, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών μονοπατιών που τροποποιούν το AODV. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα πρωτόκολλα που αναφέρονται και αναλύονται στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 2. Πρωτόκολλα δρομολόγησης των δικτύων MANET.

### 2.1. Πρωτόκολλο Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV)

Το πρωτόκολλο Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) (Perkins & Royer, 1999) βασίζεται στα πρωτόκολλα DSDV και DSR. Στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων του συστήματος για αποστολές μηνυμάτων προς όλους τους κόμβους (broadcast). Δεν διατηρούνται οι διαδρομές από κάθε κόμβο προς κάθε άλλο κόμβο του δικτύου, αλλά ανακαλύπτονται μόνο όταν χρειάζονται (on-demand πρωτόκολλο) και διατηρούνται όσο είναι απαραίτητες.

Το AODV χρησιμοποιεί τέσσερις τύπους μηνυμάτων δρομολόγησης, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια (Hassan, 2008):

- RREQ, αν ένας κόμβος θέλει να επικοινωνήσει με κάποιον άλλον κόμβο αλλά δεν υπάρχει διαθέσιμη διαδρομή, ο κόμβος-πηγή ξεκινάει τη φάση ανακάλυψης διαδρομής εκπέμποντας ένα μήνυμα Αίτησης Διαδρομής (Route REQuest - RREQ) στο δίκτυο.
- RREP, αν ένας κόμβος-προορισμός ή ένας ενδιάμεσος κόμβος έχει μια έγκυρη διαδρομή προς τον επιθυμητό προορισμό, απαντάει στο RREQ μήνυμα εκπέμποντας μόνο στον κόμβο-πηγή που το έστειλε ένα μήνυμα Απάντησης Διαδρομής (Route REPlY - RREP).
- RERR, αν υπάρξει διακοπή στη σύνδεση, δηλαδή σε κάποιο μονοπάτι, τότε ο ενδιάμεσος κόμβος που την ανίχνευσε παράγει ένα μήνυμα Λάθους Διαδρομής (Route ERRor - RERR) για την γνωστοποίηση του προβλήματος.
- HELLO, κάθε κόμβος εκπέμπει περιοδικά ένα μήνυμα με χρόνο ζωής (time to live (TTL) = 1) έτσι ώστε να δηλώνει την παρουσία του. Με αυτό τον τρόπο διατηρείται στις λίστες των γειτονικών του κόμβων.

Για την ανακάλυψη μιας έγκυρης διαδρομής αρχικά εκπέμπεται ένα RREQ μήνυμα στο δίκτυο. Το RREQ διαδίδεται μέσα στο δίκτυο μέχρι να φτάσει στον κόμβο-προορισμό ή σε κάποιον κόμβο με μια πρόσφατη διαδρομή προς τον προορισμό. Όταν η διαδρομή ανακαλυφθεί γίνεται διαθέσιμη με την εκπομπή ενός μηνύματος RREP πίσω στον κόμβο-πηγή. Όσο οι κόμβοι της διαδρομής αυτής εκπέμπουν HELLO μηνύματα η διαδρομή θεωρείται έγκυρη. Αν κάποιος κόμβος σταματήσει να λαμβάνει HELLO από κάποιον γειτονικό του κόμβο που ανήκει στη διαδρομή τότε θεωρεί ότι απομακρύνθηκε και ότι η διαδρομή είναι άκυρη επομένως, εκπέμπει ένα RERR μήνυμα.

Το AODV ανήκει στην Reactive κατηγορία πρωτοκόλλων και επομένως αντιδρά σχετικά γρήγορα σε τοπολογικές αλλαγές του δικτύου ανανεώνοντας μόνο εκείνους τους κόμβους που μπορεί να επηρεαστούν από τις αλλαγές. Ωστόσο, τείνει να προκαλεί επιβαρύνσεις στο δίκτυο λόγω του μηχανισμού υπερχειλίσης που χρησιμοποιεί και των αποτυχημένων συνδέσεων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συνοψίζονται στη συνέχεια (Cipron, Jan, Mateusz, Błażej, & Paweł, 2010).

#### **Πλεονεκτήματα:**

- Ο αλγόριθμος δεν είναι υπολογιστικός ή πολύπλοκος στη διαχείριση μνήμης.
- Η μεταφορά μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων δεν παράγει επιπρόσθετη κίνηση στο δίκτυο.

- Δεν εξαρτάται από τη μεταβολή των κόμβων του δικτύου (scalable), κατάλληλο για κινητά δίκτυα.
- Υποστηρίζει την πολλαπλή μετάδοση (multicasting).
- Ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των αναγκαίων μαζικών αποστολών (broadcast).

#### **Μειονεκτήματα:**

- Απαιτεί περιοδικές ανανεώσεις.
- Ο προσδιορισμός των διαδρομών είναι χρονοβόρα διαδικασία.
- Στη διαδικασία εύρεσης διαδρομής στέλνονται επιπρόσθετα πακέτα(π.χ. RREQ, RREP)

## **2.2. Πρωτόκολλο AODV with Backup Routes (AODV-BR)**

Το πρωτόκολλο AODV-BR (Lee & Gerla, 2000) τροποποιεί το AODV δημιουργώντας μία δομή πλέγματος μεταξύ των κόμβων του δικτύου και χρησιμοποιώντας πίνακες εναλλακτικών διαδρομών με σκοπό την χρήση τους σε περίπτωση διακοπής της κύριας σύνδεσης. Το AODV-BR δεν απαιτεί καμία αλλαγή στη διαδικασία μετάδοσης RREQ μηνυμάτων που ακολουθεί το πρωτόκολλο AODV. Μετατροπή του πρωτοκόλλου AODV παρουσιάζεται στη φάση απάντησης στον κόμβο-πηγή, όπου και δημιουργείται η δομή πλέγματος και τα εναλλακτικά μονοπάτια.

Οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου εκμεταλλεζόμενοι τη μαζική αποστολή πακέτων (broadcast), μπορούν να “δουν” τα πακέτα που στέλνονται από τους γειτονικούς τους κόμβους. Μέσω αυτών των πακέτων, ένας κόμβος συλλέγει πληροφορίες εναλλακτικών μονοπατιών και γίνεται μέρος του πλέγματος. Όταν ένας κόμβος, ο οποίος δεν είναι μέρος της κύριας διαδρομής που ακολουθείται για τη μετάδοση, δεχτεί ένα RREP πακέτο το οποίο δεν απευθύνεται σε αυτόν και το οποίο μεταδίδεται από έναν γειτονικό του κόμβο που ανήκει στην κύρια διαδρομή, καταγράφει τον γείτονα αυτό σαν το επόμενο βήμα (hop) προς τον προορισμό στον πίνακα εναλλακτικών διαδρομών που διατηρεί. Ένας κόμβος μπορεί να δεχτεί πλήθος RREP πακέτων για την ίδια διαδρομή αν βρίσκεται στην ακτίνα μετάδοσης περισσότερων του ενός κόμβων της κύριας διαδρομής. Σε αυτή τη περίπτωση, ο κόμβος επιλέγει την καλύτερη διαδρομή και την εισάγει στον πίνακα εναλλακτικών διαδρομών του. Όταν το πακέτο RREP φτάσει στον κόμβο-πηγή, η κύρια διαδρομή μεταξύ της πηγής και του προορισμού κατοχυρώνεται και είναι έτοιμη για χρήση. Οι κόμβοι που έχουν μια εγγραφή προς τον κόμβο-προορισμό στον πίνακα εναλλακτικών διαδρομών τους είναι μέρος του πλέγματος. Η κύρια διαδρομή και οι εναλλακτικές διαδρομές συνολικά αποτελούν μια δομή πλέγματος και έχουν το χαρακτηριστικό σχήμα του ψαροκόκαλου.

Τα πακέτα δεδομένων μεταδίδονται μέσω της κύριας διαδρομής, εκτός και αν υπάρξει κάποια διακοπή στη σύνδεση. Όταν ένας κόμβος της κύριας διαδρομής ανιχνεύσει μια διακοπή σύνδεσης (link break), τότε πραγματοποιεί μαζική μετάδοση του πακέτου δεδομένων που είναι στη σειρά για να μεταδοθεί στους άμεσους γείτονές του. Ο κόμβος καθιστά σαφές στην κεφαλίδα του πακέτου ότι υπάρχει διακοπή στη σύνδεση και ότι το πακέτο είναι υποψήφιο για εναλλακτική δρομολόγηση. Με την άφιξη του πακέτου, οι γειτονικοί κόμβοι, οι οποίοι έχουν μια καταχώρηση για τον προορισμό στον πίνακα εναλλακτικών διαδρομών που ο καθένας διατηρεί, μεταδίδουν το πακέτο μόνο στον άμεσα γειτονικό τους κόμβο. Επομένως, τα πακέτα δεδομένων μπορούν να μεταδοθούν μέσω ενός ή περισσότερων εναλλακτικών διαδρομών και δεν απορρίπτονται. Για να αποφευχθεί η δημιουργία βρόγχων από τα πακέτα δεδομένων, ένας κόμβος του πλέγματος προωθεί τα πακέτα δεδομένων μόνο αν το πακέτο δεν έχει ληφθεί από τον επόμενο από αυτόν κόμβο και αν δεν είναι αντίγραφο. Ο κόμβος που ανίχνευσε την διακοπή στη διαδρομή στέλνει ένα RERR μήνυμα στον κόμβο-πηγή για να προβεί σε ανακάλυψη νέας διαδρομής. Ο λόγος που πραγματοποιείται εύρεση νέας διαδρομής αντί να γίνεται διαρκής χρήση των εναλλακτικών μονοπατιών είναι για να δημιουργηθεί μια νέα, βέλτιστη διαδρομή που να αντικατοπτρίζει την τρέχουσα κατάσταση και τοπολογία του δικτύου.

Μετά από πειράματα προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη της απόδοσης του AODV-BR (GloMoSim)<sup>1</sup>, αποδεικνύεται ότι το πρωτόκολλο αυτό βελτιώνει τη συνολική απόδοση του AODV. Τα αποτελέσματα αναλύονται στη συνέχεια:

- Ποσοστό μετάδοσης πακέτων

Το AODV-BR έχει υψηλότερα ποσοστά μετάδοσης πακέτων συγκριτικά με το AODV.

- Καθυστερήση μετάδοσης

Το AODV-BR έχει μεγαλύτερες καθυστερήσεις από το AODV. Αυτό συμβαίνει λόγω των πακέτων που επιβιώνουν μετά την διακοπή κάποιας σύνδεσης και ακολουθούν κάποια εναλλακτική και ενδεχομένως μεγαλύτερη σε απόσταση διαδρομή.

- Ρυθμός μετάδοσης πακέτων

Το AODV-BR μεταδίδει ελαφρώς περισσότερα πακέτα δεδομένων από το AODV, λόγω χρήσης εναλλακτικών διαδρομών.

- Ποσοστό μετάδοσης πακέτων ανά μετάδοση

Όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταδόσεων, τόσο πέφτει η απόδοση του AODV-BR συγκριτικά με το AODV.

---

<sup>1</sup> <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/domains/glomosim.html>



Η απόδοση και των δύο πρωτοκόλλων πέφτει λόγω αυξημένης κυκλοφορίας και άρα της αύξησης του αριθμού συγκρούσεων. Ωστόσο σε αυτή τη περίπτωση το πρωτόκολλο AODV-BR έχει χειρότερη απόδοση από το AODV λόγω των αυξανόμενων εναλλακτικών διαδρομών. Όταν ο ρυθμός κινητικότητας είναι υψηλός δημιουργούνται πολλές διακοπές σύνδεσης ενώ ένας μεγάλος αριθμός κόμβων του πλέγματος μεταδίδουν πακέτα δεδομένων. Αυτές οι μεταδώσεις προκαλούν συγκρούσεις μεταξύ των πακέτων που χρησιμοποιούν αυτούς τους κόμβους για την κύρια διαδρομή και αυτών που τους χρησιμοποιούν σαν εναλλακτική και άρα το πρωτόκολλο χάνει την αποδοτικότητά του.

### **2.3. Πρωτόκολλο Ad hoc on-demand multipath distance vector (AOMDV)**

Το πρωτόκολλο AOMDV (Marina & Das, 2006) (Das, Roy, & Das, 2008) (Sangi, Liu, & Liu, 2010) επεκτείνει το AODV πρωτόκολλο με στόχο τον υπολογισμό πολλαπλών, ασύνδετων και άκυκλων μονοπατιών κατά τη διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής. Για να επιτευχθούν αυτές οι επιθυμητές ιδιότητες των μονοπατιών, το πρωτόκολλο AOMDV μεταβάλλει το AODV ως προς τους κανόνες που εφαρμόζονται τοπικά σε κάθε κόμβο για την εύρεση μονοπατιών και πιο συγκεκριμένα τους κανόνες που περιορίζουν τον κάθε κόμβο στο να έχει μόνο ένα μονοπάτι προς κάθε προορισμό.

Για τον υπολογισμό μόνο άκυκλων μονοπατιών εφαρμόζεται ένα σύνολο κανόνων. Οι κανόνες αυτοί χρησιμοποιούν δύο μετρικές για την αξιολόγηση των διαδρομών που ανακαλύπτονται. Η πρώτη μετρική είναι ο ακολουθιακός αριθμός προορισμού (destination sequence number) που αποθηκεύεται σε κάθε κόμβο για κάθε διαδρομή. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός τόσο πιο πρόσφατα ανακαλύφθηκε το μονοπάτι που χαρακτηρίζει. Η δεύτερη μετρική ονομάζεται γνωστοποιημένος μετρητής βημάτων (advertised hop count) και δείχνει πόσο μεγάλο είναι ένα μονοπάτι με βάση τα βήματά του (hops). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κανόνες για τη διατήρηση άκυκλων μονοπατιών.

#### 1. Κανόνας ακολουθιακού αριθμού προορισμού

Τα πολλαπλά μονοπάτια που αποθηκεύονται σε κάθε κόμβο πρέπει να έχουν τον ίδιο ακολουθιακό αριθμό προορισμού. Σε περίπτωση που ανακαλυφθεί μία διαδρομή με μεγαλύτερο ακολουθιακό αριθμό προορισμού, όλες οι υπόλοιπες απορρίπτονται.

#### 2. Κανόνες για μονοπάτια ίδιου ακολουθιακού αριθμού προορισμού:

- i. Ποτέ δεν γνωστοποιείται μια διαδρομή με μικρότερο αριθμό βημάτων από μία ήδη γνωστή.

- ii. Ποτέ δεν γίνεται δεκτή μια διαδρομή με μεγαλύτερο αριθμό βημάτων από μία ήδη γνωστή.

Ο σκοπός διατήρησης ασύνδετων μονοπατιών είναι τα μικρότερα ποσοστά αποτυχίας τους. Δυο είναι οι τύποι ασύνδετων μονοπατιών: ασύνδετα ως προς τη σύνδεση (μεταξύ δύο κόμβων) και ασύνδετα ως προς τους κόμβους. Στην πρώτη περίπτωση δεν υπάρχει καμία κοινή σύνδεση μεταξύ τους και στην δεύτερη κανένας κοινός κόμβος. Η βασική ιδέα για τον μηχανισμό ανακάλυψης ασύνδετων μονοπατιών είναι η εξής: αν δυο μονοπάτια από έναν κόμβο P προς έναν προορισμό D είναι ασύνδετα ως προς τη σύνδεση, πρέπει να έχουν μοναδικά επόμενα βήματα από τον κόμβο P και επιπλέον μοναδικά τελικά βήματα. Για την υλοποίηση αυτού του μηχανισμού πρέπει να διατηρείται επιπλέον η πληροφορία για το τελικό βήμα (last hop) για κάθε μονοπάτι στον πίνακα δρομολόγησης και να μεταφέρεται μέσω των RREQ και RREP μηνυμάτων. Πέρα από την εφαρμογή αυτών των κανόνων η υλοποίηση του πρωτοκόλλου AOMDV δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή του AODV. Η σημαντικότερη διαφορά είναι ότι εξετάζονται όλα τα μηνύματα για την εύρεση πιθανών εναλλακτικών μονοπατιών. Η επιλογή του εναλλακτικού μονοπατιού στην περίπτωση που υπάρξει κάποια διακοπή στη σύνδεση είναι αρκετά απλή αφού το κριτήριο επιλογής είναι η σειρά δημιουργίας των μονοπατιών.

Το πρωτόκολλο AOMDV αξιολογήθηκε συγκριτικά με το AODV με μελέτες προσομοίωσης τύπου ns-2<sup>2</sup> (Fal & Varadhan, 2002) που πραγματοποιήθηκαν υπό διάφορες συνθήκες κινητικότητας των κόμβων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Ποσοστό απώλειας πακέτων

Η απώλεια των πακέτων με τη χρήση του πρωτοκόλλου AOMDV είναι μικρότερη κατά 40% συγκριτικά με το AODV. Αυτό συμβαίνει λόγω των διαθέσιμων εναλλακτικών μονοπατιών για την προώθηση των πακέτων μετά τη διακοπή κάποιας σύνδεσης. Το ποσοστό απώλειας των πακέτων μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας.

- Μέση καθυστέρηση πακέτων

Το πρωτόκολλο AOMDV προσφέρει σημαντική μείωση στην καθυστέρηση (συχνά περισσότερο κατά έναν ή δύο παράγοντες).

- Συχνότητα ανακάλυψης διαδρομής

Το πρωτόκολλο AOMDV έχει μικρότερη συχνότητα ανακάλυψης διαδρομής λόγω χρήσης των διαθέσιμων εναλλακτικών μονοπατιών.

- Φόρτο δρομολόγησης

---

<sup>2</sup> <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>

Με τη χρήση του πρωτοκόλλου AOMDV βελτιώνεται ο ρυθμός μετάδοσης πακέτων κατά 30% λόγω της μείωσης της συχνότητας ανακάλυψης νέων διαδρομών.

#### **2.4. Πρωτόκολλο AODV-Multipath (AODVM)**

Το πρωτόκολλο AODVM (Ye, Krishnamurthy, & Tripathi, 2003) είναι μια προέκταση του AODV για την εύρεση πολλαπλών μονοπατιών ασύνδετων ως προς τους κόμβους. Σε αντίθεση με το AODV, στο AODVM όλα τα RREQ πακέτα που λαμβάνονται από τους ενδιαμέσους κόμβους επεξεργάζονται και οι πληροφορίες που περιέχονται σε αυτά αποθηκεύονται στον RREQ πίνακα που δημιουργείται για αυτό το σκοπό. Για κάθε πακέτο RREQ που λαμβάνεται, ο ενδιαμέσος κόμβος αποθηκεύει τον κόμβο που παρήγαγε το RREQ, τον προορισμό του, το γειτονικό κόμβο ο οποίος το μετέδωσε και άλλες πληροφορίες. Οι ενδιαμέσοι κόμβοι δεν επιτρέπεται να στέλνουν RREP μηνύματα απευθείας στον κόμβο-πηγή. Όταν ο κόμβος-προορισμός λάβει το πρώτο RREQ πακέτο από κάποιον από τους γειτονικούς του κόμβους, ανανεώνει τον ακολουθιακό του αριθμό και παράγει ένα RREP πακέτο. Το ίδιο συμβαίνει για όλα τα επόμενα RREQ πακέτα που λαμβάνει. Το RREP πακέτο περιέχει ένα επιπλέον πεδίο για τον προσδιορισμό του γειτονικού του κόμβου από το οποίο το RREQ πακέτο προήλθε. Το RREP πακέτο στέλνεται στον κόμβο-πηγή ακολουθώντας την αντίστροφη διαδρομή από αυτή που ακολούθησε το RREQ πακέτο.

Όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος λάβει ένα RREP πακέτο διαγράφει την καταχώρηση που αναφέρεται στον γειτονικό του κόμβο από τον οποίο πήρε το RREP πακέτο από τον RREQ πίνακα και προσθέτει μια καταχώρηση διαδρομής στον πίνακα δρομολόγησης του για να δηλώσει την διαδρομή που ανακαλύφθηκε από τον κόμβο που παρήγαγε το RREP πακέτο δηλαδή τον κόμβο-προορισμό. Στη συνέχεια, ο κόμβος αναγνωρίζει τον κόμβο γείτονα στον RREQ πίνακα μέσω του οποίου το μονοπάτι προς τον κόμβο-πηγή είναι το συντομότερο και προωθεί το RREP μήνυμα σε αυτό το κόμβο γείτονα. Η καταχώρηση που αφορά τον κόμβο γείτονα που προωθεί το RREP μήνυμα διαγράφεται από τον RREQ πίνακα με σκοπό να διασφαλιστεί ότι ένας κόμβος δεν θα συμμετάσχει σε πολλαπλά μονοπάτια. Όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος λάβει ένα RREP μήνυμα το οποίο δεν μπορεί να προωθήσει περαιτέρω (γιατί ο RREQ πίνακας του είναι κενός), παράγει ένα RDER (Route Discovery Error Message) μήνυμα και το στέλνει στον κόμβο-γείτονα από τον οποίο προωθήθηκε το RREP μήνυμα με σκοπό να βρει κάποιον άλλο κόμβο μέσω του οποίου να προωθήσει το RREP μήνυμα. Τέλος, είναι απαραίτητο ο κόμβος-πηγή να επιβεβαιώνει κάθε RREP μήνυμα που λαμβάνει με ένα RRCM (Route Confirmation Message) μήνυμα.

Το μήνυμα αυτό στην πραγματικότητα προσαρτάται στο πρώτο πακέτο δεδομένων που θα σταλεί και θα περιέχει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό βημάτων της διαδρομής, το πρώτο και το τελευταίο βήμα της.

Για την αξιολόγηση του πρωτοκόλλου AODVM έγινε χρήση μοντέλου προσομοίωσης τύπου ns-2<sup>3</sup> (Fal & Varadhan, 2002) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την ιδανική περίπτωση όπου η τοπολογία του δικτύου είναι γνωστή στον κόμβο-πηγή και χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος αναζήτησης συντομότερης διαδρομής. Οι μετρικές απόδοσης και τα αποτελέσματα της αξιολόγησης παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Μέσος αριθμός ασύνδετων μονοπατιών (ως προς τους κόμβους)  
Ο αριθμός των ασύνδετων μονοπατιών που ανακαλύπτονται είναι ανάλογος της πυκνότητας των κόμβων. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων, τόσο αυξάνεται το ποσοστό των μονοπατιών που ανακαλύπτονται συγκριτικά με αυτών της ιδανικής περίπτωσης. Αυτό οφείλεται στη αυξημένη πιθανότητα να υπάρχουν πολλαπλά μονοπάτια μεταξύ της πηγής και του προορισμού όταν είναι μεγάλη η πυκνότητα των κόμβων.
- Η πιθανότητα ο αριθμός των ασύνδετων μονοπατιών (ως προς τους κόμβους) που ανακαλύπτονται σε κάθε αναζήτηση διαδρομής να μην είναι μικρότερος από ένα συγκεκριμένο κατώφλι.  
Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων (τον αριθμό των βημάτων-hops) και συγκεκριμένα είναι αντιστρόφως ανάλογη. Η πιθανότητα μειώνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των κόμβων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρία πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών μονοπατιών που βασίζονται και εξελίσσουν το AODVM.

Το πρωτόκολλο AODVM/PD (AODVM with Path Diversity) (Mueller & Ghosal, 2005) έχει σαν κύριο στόχο την ελαχιστοποίηση του παράγοντα συσχέτισης των ανακαλυφθέντων μονοπατιών, ο οποίος προσδιορίζεται από τον αριθμό των κόμβων κατά μήκος δυο μονοπατιών, με σκοπό την εύρεση ασύνδετων ως προς τους κόμβους μονοπατιών με μικρή συσχέτιση. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποστολή μηνυμάτων Συσχέτισης (CORR) τα οποία περιέχουν τον τοπικό παράγοντα συσχέτισης των κόμβων και έχουν σαν αποτέλεσμα την εκκαθάριση των κόμβων με έναν σχετικά υψηλό παράγοντα συσχέτισης περιοχής από τους RREQ πίνακες στη φάση επιβεβαίωσης της διαδρομής. Βασική είναι η επιλογή του κατάλληλου κατωφλίου συσχέτισης. Η αξιολόγηση του πρωτοκόλλου

---

<sup>3</sup> <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html/>

AODVM/PD με τη χρήση του εργαλείου GloMoSim<sup>4</sup> (Zeng, Bagrodia, & Gerla, 1998)) έδειξε πως το AODVM/PD ανακαλύπτει πιο μακριά μονοπάτια συγκριτικά με το AOMDV, επειδή το AOMDV αναζητά τα συντομότερα μονοπάτια ενώ το AODVM/PD μονοπάτια φυσικά διαχωριζόμενα. Ως αναφορά την καθυστέρηση, η χρήση μονοπατιών με χαμηλότερη συσχέτιση την βελτιώνει, όμως σε περιπτώσεις έντονης κινητικότητας η χρήση του AODVM/PD έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της καθυστέρησης. Γενικά το πρωτόκολλο AODVM/PD είναι καταλληλότερο για στατικά δίκτυα ή για δίκτυα μειωμένης κινητικότητας.

Το πρωτόκολλο AODVM-PPSP (AODVM with Path Preferential Selection Probabilities) (Jing, Bhuvaneshwaran, Katayama, & Takahashi, 2006) βασίζεται στο AODVM και διαχωρίζεται από αυτό καθώς προσαρμόζει την προτίμησή του σε διαδρομές με τη μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης με κριτήριο την κίνηση κατά τη μετάδοση πακέτων των κόμβων και το οποίο επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας νέας μετρικής για τον προσδιορισμό του χρόνου καθυστέρησης μετάδοσης. Με την αξιολόγηση του AODVM-PPSP (με χρήση του προσομοιωτή Omnet<sup>5</sup>) διαπιστώθηκε ότι το ποσοστό φόρτου δρομολόγησης του πρωτοκόλλου AODVM-PPSP είναι μικρότερο συγκριτικά με τα πρωτόκολλα AODV και AODVM σε κάθε περίπτωση και πως το ποσοστό μετάδοσης πακέτων του πρωτοκόλλου AODVM-PPSP είναι τα μεγαλύτερα συγκριτικά με τα πρωτόκολλα AODV και AODVM.

Τέλος, το πρωτόκολλο AODVM-R (AODV Multipath Router approach) (Miller & So, 2005), (Patil, Biradar, Mudholkar, & Sawant, 2010) διατηρεί πολλαπλές διαδρομές προς τον προορισμό όπως και στο πρωτόκολλο AODVM και για να διασφαλιστεί ότι οι πολλαπλές αυτές διαδρομές είναι μη-κυκλικές, περιλαμβάνονται πληροφορίες για το μονοπάτι και συγκεκριμένα τον αριθμό ακολουθίας του στα RREQ πακέτα. Η αξιολόγηση του AODVM-R έδειξε πως έχει μεγαλύτερα ποσοστά μετάδοσης πακέτων, μικρότερη μέση καθυστέρηση συγκριτικά με το AODV και πως το φόρτο δρομολόγησης είναι μικρότερο απ' ότι στο AODV.

## 2.5. Πρωτόκολλο Cross-layered multipath AODV (CM-AODV)

Το πρωτόκολλο CM-AODV (Park, Moh, & Chung, 2008), για την επιλογή των πολλαπλών διαδρομών βασίζεται στη μετρική SINR (signal-to-interference plus noise ratio) η οποία υπολογίζεται στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer). Ο λόγος χρήσης αυτής της μετρικής είναι ο υπολογισμός της ποιότητας της κάθε διαδρομής που ανακαλύπτεται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα MANETs η κινητικότητα των κόμβων είναι μεγάλη και ανά πάσα στιγμή

<sup>4</sup> <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/domains/glomosim.html>

<sup>5</sup> <http://www.omnetpp.org/>

κάποιος κόμβος μπορεί να τεθεί εκτός δικτύου. Επομένως, δημιουργούνται αρκετές διαδρομές όχι αρκετά ισχυρές. Σε πολλά πρωτόκολλα πραγματοποιείται η επιλογή των συντομότερων διαδρομών η οποία όμως δεν είναι πάντα η βέλτιστη λύση καθώς δημιουργούνται πολλές ασθενής και μη-αξιόπιστες διαδρομές. Στο πρωτόκολλο CM-AODV, υπολογίζεται η ποιότητα της διαδρομής (ορίζεται ως η μικρότερη τιμή που παίρνει η SINR σε μια διαδρομή), περιέχεται στην κεφαλίδα των RREQ πακέτων και βάση αυτής γίνεται η επιλογή των πιο ισχυρών διαδρομών.

Η φάση ανακάλυψης διαδρομής στο πρωτόκολλο CM-AODV είναι παρόμοια με αυτή του πρωτοκόλλου AODV με διαφορά το επιπλέον πεδίο στη κεφαλίδα των RREQ πακέτων που περιέχει την τιμή της ποιότητας της διαδρομής. Στο AODV επιλέγεται το πρώτο RREQ πακέτο που θα φτάσει. Αντιθέτως, στο CM-AODV επιλέγεται το RREQ πακέτο με την υψηλότερη ποιότητα διαδρομής. Η φάση μετάδοσης πακέτων και διατήρησης διαδρομής του πρωτοκόλλου CM-AODV λειτουργούν κατά βάση με τον ίδιο τρόπο όπως στο πρωτόκολλο AODV με τη διαφορά ότι γίνεται χρήση των πολλαπλών διαδρομών.

Για την αξιολόγηση του πρωτοκόλλου CM-AODV έγινε χρήση του προσομοιωτή ns-2<sup>6,7</sup> και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των AODV και AODVM για τρεις βασικές μετρικές απόδοσης.

- Μετάδοση πακέτων

Το CM-AODV συγκριτικά με το AODVM, παρουσιάζει μεγαλύτερο ποσοστό μετάδοσης πακέτων καθώς, μειώνει την απώλεια πακέτων μέχρι και 70%. Τα CM-AODV και AODVM πάντα έχουν καλύτερη απόδοση συγκριτικά με το AODV. Αυξάνεται η απώλεια των πακέτων καθώς η κινητικότητα των κόμβων αυξάνεται.

- Μέση καθυστέρηση

Το CM-AODV παρουσιάζει μικρότερη καθυστέρηση έως και 30% συγκριτικά με το AODVM. Και σε αυτή την περίπτωση τα CM-AODV και AODVM έχουν πάντα καλύτερη απόδοση συγκριτικά με το AODV. Όσο η κινητικότητα των κόμβων αυξάνεται η καθυστέρηση αυξάνεται σε όλα τα πρωτόκολλα.

- Φόρτο δρομολόγησης

Σαν φόρτο δρομολόγησης ορίζεται ο αριθμός των πακέτων (HELLO, RREQ, RREP και RERR) που μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο. Το CM-AODV μειώνει το φόρτο δρομολόγησης έως και 45% συγκριτικά με το AODVM. Τα CM-AODV και AODVM έχουν μικρότερο φόρτο δρομολόγησης συγκριτικά με το AODV.

---

<sup>6</sup> <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

<sup>7</sup> <http://www.monarch.cs.rice.edu/cmu-ns.html>

## 2.6. Πρωτόκολλο Node-Disjoint Multipath Routing (NDMR)

Το πρωτόκολλο NDMR (Li & Cuthbert, 2004) (Liu & Cuthbert, 2007) έχει σαν βασικό στόχο την εύρεση πολλαπλών ασύνδετων (ως προς τους κόμβους) μονοπατιών με μικρό φόρτο στη δρομολόγηση. Δύο είναι τα νέα στοιχεία του πρωτοκόλλου τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια, η συσσώρευση μονοπατιών και ο πίνακας αντίστροφης διαδρομής.

Καθώς ένα πακέτο RREQ προωθείται από τους κόμβους του δικτύου, κάθε κόμβος προσθέτει σε αυτό την διεύθυνσή του (ID). Με αυτό τον τρόπο, όταν το RREQ πακέτο φτάνει στον προορισμό του, ο κόμβος-προορισμός είναι υπεύθυνος να κρίνει αν το μονοπάτι από το οποίο προήλθε είναι ασύνδετο ως προς τους κόμβους. Όταν ένας ενδιαμέσος κόμβος λάβει για πρώτη φορά ένα RREQ πακέτο, ελέγχει τη λίστα συσσώρευσης μονοπατιών (τη λίστα δηλαδή με τα ID των κόμβων από τα οποία έχει προέλθει), υπολογίζει τον αριθμό των βημάτων από τον κόμβο-πηγή μέχρι αυτόν και καταγράφει την τιμή αυτή σαν το μικρότερο αριθμό βημάτων στον πίνακα αντίστροφης διαδρομής που διατηρεί. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε επόμενο RREQ πακέτο. Αν ο αριθμός των βημάτων είναι μεγαλύτερος από αυτόν που υπάρχει ήδη στον πίνακα τότε το πακέτο απορρίπτεται, διαφορετικά προσθέτει το ID του στο πακέτο και το προωθεί.

Όταν ο κόμβος-προορισμός λάβει το πρώτο RREQ πακέτο, καταγράφει τη λίστα των ID των κόμβων από τους οποίους προήλθε στον πίνακα αντίστροφης διαδρομής και στέλνει ένα RREP πακέτο το οποίο περιλαμβάνει το μονοπάτι από την πηγή μέχρι τον προορισμό. Όταν ο κόμβος-προορισμός λάβει κι άλλο RREQ πακέτο, συγκρίνει όλο το μονοπάτι από τα ID των κόμβων με τις υπάρχουσες ασύνδετες ως προς τους κόμβους διαδρομές στον πίνακα δρομολόγησης. Αν δεν υπάρχει κοινός κόμβος (εκτός της πηγής και του προορισμού) τότε το μονοπάτι καταγράφεται στον πίνακα αντίστροφης διαδρομής του προορισμού. Στην αντίθετη περίπτωση το μονοπάτι και το RREQ πακέτο απορρίπτονται.

Το πρωτόκολλο αξιολογήθηκε μετά από προσομοιώσεις και τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στη συνέχεια συγκριτικά με τα δύο βασικά πρωτόκολλα δρομολόγησης μονής διαδρομής, το AODV και το DSR:

- Μετάδοση πακέτων

Το NDMR έχει μεγαλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων στον προορισμό τους από ότι το AODV και το DSR. Περισσότερα από 95% των πακέτων παραδίδονται με το NDMR στους προορισμούς τους ανεξαρτήτως των συνθηκών κινητικότητας.

- Μέση καθυστέρηση

Ενώ στα πρωτόκολλα AODV και DSR η καθυστέρηση αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας κίνησης των κόμβων, η καθυστέρηση στο NDMR παραμένει η ίδια σε όλες τις ταχύτητες. Όταν η ταχύτητα κίνησης των κόμβων ξεπερνάει τα 10m/s, η καθυστέρηση στο NDMR είναι σχεδόν η μισή από αυτή των AODV και DSR.

- Φόρτο δρομολόγησης

Καθώς η ταχύτητα κίνησης των κόμβων αυξάνεται το φόρτο δρομολόγησης αυξάνεται πολύ ταχύτερα στα πρωτόκολλα AODV και DSR, απ' ό τι στο NDMR.

Παραλλαγή του πρωτοκόλλου NDMR αποτελεί το SNDMR (Xu, Yan, & Xia, 2005) το οποίο τροποποιεί το NDMR έτσι ώστε να γίνεται επιλογή των ασύνδετων ως προς τους κόμβους μονοπατιών λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το μονοπάτι από τον κόμβο-πηγή μέχρι τον κόμβο-προορισμό αλλά και την ομοιότητα μεταξύ του τρέχοντος και του συντομότερου μονοπατιού.

## 2.7. Πρωτόκολλο AODV with meshed Multipath (AODV-MM)

Στο πρωτόκολλο AODV-MM (Abdule & Hassan, 2008) (Kuo & Liang, 2006) η φάση ανακάλυψης διαδρομής είναι ουσιαστικά η ίδια όπως στο AODV, με μόνη διαφορά την πρόσθεση πληροφοριών στα RREQ και RREP πακέτα. Κάθε φορά που κάποιος ενδιαμέσος κόμβος δέχεται ένα RREQ πακέτο ελέγχει αν το έχει λάβει ξανά ή όχι. Αν το έχει λάβει ξανά τότε το απορρίπτει, διαφορετικά θα εισάγει ο κόμβος στον πίνακα δρομολόγησης του το μονοπάτι από τον κόμβο-πηγή που ακολούθησε το πακέτο και θα προσθέσει το ID του στο πακέτο πριν το προωθήσει. Με αυτό τον τρόπο ο κόμβος-πηγή θα γνωρίζει τη διαδρομή από τον κόμβο-πηγή μέχρι αυτόν. Η διαδικασία μετάδοσης των RREP μηνυμάτων διαφέρει καθώς τα πακέτα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα κύρια και τα εναλλασσόμενα, ανάλογα με το αν οι κόμβοι μέσω των οποίων προωθούνται είναι στην κύρια διαδρομή ή όχι. Όταν κάποιος κόμβος ανιχνεύσει κάποια διακοπή στη σύνδεση τότε αν στον πίνακα δρομολόγησης του υπάρχει εναλλακτική διαδρομή την καθιστά κύρια, διαφορετικά εκπέμπει ένα RERR πακέτο για την γνωστοποίηση της διακοπής στη σύνδεση.

Για την αξιολόγηση του πρωτοκόλλου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο προσομοίωσης ns-2<sup>8</sup> (Fal & Varadhan, 1999) σε καταστάσεις υψηλής κινητικότητας των κόμβων και αυξημένου αριθμού συνδέσεων μεταξύ των κόμβων και τα αποτελέσματα συγκριτικά με το AODV παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Μετάδοση πακέτων

Το AODV-MM έχει μεγαλύτερα ποσοστά μετάδοσης πακέτων.

---

<sup>8</sup> <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



- Μέση καθυστέρηση  
Το AODV-MM έχει μικρότερη μέση καθυστέρηση συγκριτικά με το AODV.
- Φόρτο δρομολόγησης  
Το φόρτο δρομολόγησης στο AODV-MM είναι μικρότερο απ' ό,τι στο AODV.

Ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει μια σύνοψη των βασικών χαρακτηριστικών των πρωτοκόλλων δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών που αναλύθηκαν σε αυτή την ενότητα.

Πίνακας 1. Σύνοψη πρωτοκόλλων δρομολόγησης μέσω πολλαπλών μονοπατιών

Πρωτόκολλο	Βασιζόμενο Πρωτόκολλο	Απόφαση Δρομολόγησης	Ανακάλυψη Διαδρομών	Χαρακτηριστικά απόδοσης
AODV-BR	AODV	Στους ενδιάμεσους κόμβους	Ασύνδετα ως προς τη σύνδεση μονοπάτια	Παρέχει ευρωστία στην κινητικότητα και ενισχύει την απόδοση του πρωτοκόλλου
AOMDV	AODV	Στον κόμβο πηγή	Ασύνδετα ως προς τη σύνδεση μονοπάτια	Μείωση καθυστέρησης, φόρτου δρομολόγησης, συχνότητας ανακαλύψεων διαδρομής
AODVM	AODV	Στον κόμβο πηγή	Ασύνδετα ως προς τους κόμβους μονοπάτια	Σε δίκτυα χαμηλής κινητικότητας ξεπερνά την απόδοση του AODV
AODVM/PD	AODVM	Στον κόμβο πηγή	Ασύνδετα ως προς τους κόμβους μονοπάτια	Εύρεση μεγαλύτερων μονοπατιών σε σχέση με το AODVM
AODVM-PPSP	AODVM	Στον κόμβο πηγή	Ασύνδετα ως προς τους κόμβους μονοπάτια	Επιλογή διαδρομών με μικρή καθυστέρηση μετάδοσης
AODVM-R	AODVM	Στους ενδιάμεσους κόμβους	Ασύνδετα ως προς τη σύνδεση μονοπάτια	Μείωση αριθμού ανακαλύψεων διαδρομών
CM-AODV	AODV	Στον κόμβο προορισμό	---	Επιλογή των μονοπατιών με βάση την ποιότητα τους
NDMR	AODV	Στους ενδιάμεσους κόμβους	Ασύνδετα ως προς τους κόμβους μονοπάτια	Μειώνει το φόρτο δρομολόγησης
SNDMR	NDMR	Στους ενδιάμεσους κόμβους	Ασύνδετα ως προς τους κόμβους μονοπάτια	Επιλογή των μονοπατιών με βάση την ομοιότητα μεταξύ του τρέχοντος και του συντομότερου μονοπατιού
AODV-MM	AODV	Στους ενδιάμεσους κόμβους	Ασύνδετα ως προς τη σύνδεση μονοπάτια	Σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας και φόρτου δικτύου ξεπερνά την απόδοση του AODV

### 3. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών που εξελίσσουν το πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV στα δίκτυα τύπου MANET. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά καθώς στα MANETs, λόγω της αυξημένης κινητικότητας των κόμβων, παρουσιάζονται διακοπές στη σύνδεση και είναι απαραίτητη η χρήση νέων διαδρομών.

Σε αντίθεση με το AODV, τα πρωτόκολλα που μελετήσαμε μπορούν να ανακαλύψουν περισσότερες από μια διαδρομές σε κάθε φάση ανακάλυψης διαδρομής. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να προσφέρει έως και 30% μείωση της συχνότητας της φάσης ανακάλυψης διαδρομής, καθώς όταν πραγματοποιείται μια διακοπή στη σύνδεση, επιλέγεται κάποιο από τα εναλλακτικά μονοπάτια για την δρομολόγηση των υπολοίπων πακέτων δεδομένων σε αντίθεση με το AODV που όλα τα υπόλοιπα απορρίπτονται και ανακαλύπτεται εκ νέου μια διαδρομή. Ορισμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών μπορούν να παρέχουν δυο διαφορετικούς τύπους ασύνδετων μονοπατιών, ασύνδετα ως προς τους κόμβους και ασύνδετα ως προς τη σύνδεση.

Μέσω της ανάλυσης των προσομοιώσεων που έγιναν σε ένα εύρος διαφορετικών περιπτώσεων κινητικότητας των κόμβων και κίνησης του δικτύου, διαπιστώνεται πως τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα απόδοσης συγκριτικά με το AODV. Οι βασικοί τομείς στους οποίους τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μέσω πολλαπλών διαδρομών είναι πιο αποδοτικά είναι το ποσοστό μετάδοσης πακέτων, η μέση καθυστέρηση, η συχνότητα ανακάλυψης διαδρομής και το φόρτο δρομολόγησης. Ωστόσο, κανένα πρωτόκολλο δεν μπορεί να βελτιώσει όλες αυτές τις παραμέτρους απόδοσης εξίσου ικανοποιητικά. Γι αυτό και η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου πρέπει να γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά του δικτύου και τις παραμέτρους απόδοσης που είναι σημαντικές για την εκάστοτε εφαρμογή.

Σαν μελλοντική έρευνα, προτείνεται αρχικά η εφαρμογή των πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε καταστάσεις πραγματικού κόσμου και επιπλέον, η εύρεση ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης που να συνδυάζει με τον αποδοτικότερο τρόπο τις παραμέτρους απόδοσης που αναφέρθηκαν παραπάνω και το οποίο θα παρέχει αξιοπιστία και ενεργειακή αποδοτικότητα, στοιχεία βασικά για τη λειτουργία των δικτύων MANETs.

## Βιβλιογραφία

- Abdule, S., & Hassan, S. (2008). A New Routing Protocol for Wireless Ad-Hoc Networks.
- Cipov, V., Jan, P., Mateusz, N., Błazej, S., & Paweł, L. (2010). *Layer analysis, MANET Routing Protocol Analysis, MANET Self Positioning algorithms analysis*. Dańda, Jacek .
- Das, S., Roy, R., & Das, K. (2008). Optimizations To Multipath Routing Protocols In Mobile Ad hoc Networks.
- Fal, K., & Varadhan, K. (1999). *ns notes and documentation*.
- Fal, I. K., & Varadhan, K. (2002). *The ns Manual*.
- Hassan, A. (2008). *Simulations on Multipath Routing Based on Source Routing*.
- Hoebeke, J., Moerman, I., Dhoedt, B., & P., D. (2004). An Overview of Mobile Ad Hoc Networks: Applications and Challenges.
- Jing, F., Bhuvaneshwaran, R., Katayama, Y., & Takahashi, N. (2006). On-Demand Multipath Routing Protocol with Preferential Path Selection Probabilities for MANET.
- Johnson, D. B., Maltz, D. A., & Broch, J. (2001). DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks.
- Kuo, C.-T., & Liang, C.-K. (2006). A Meshed Multipath Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks.
- Lee, S.-J., & Gerla, M. (2000). AODV-BR: Backup Routing in Ad hoc Networks.
- Li, X., & Cuthbert, L. (2004). On-demand Node-Disjoint Multipath Routing in Wireless Ad hoc Networks.
- Liu, L., & Cuthbert, L. (2007). QoS in Node-Disjoint Routing for Ad Hoc Networks.
- Marina, M., & Das, S. (2006). Ad hoc on-demand multipath distance vector routing.
- Miller, M., & So, J. (2005). Improving Fault Tolerance in AODV.
- Mueller, S., & Ghosal, D. (2005). Analysis of a Distributed Algorithm to Determine Multiple Routes with Path Diversity in Ad Hoc Networks.
- Park, J., Moh, S., & Chung, I. (2008). A Multipath AODV Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks with SINR-Based Route Selection.

Patil, V., Biradar, R., Mudholkar, R., & Sawant, S. (2010). On-Demand Multipath Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks Issues and Comparison.

Perkins, C. E., & Bhagwat, P. (1994). Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers.

Perkins, C., & Royer, E. (1999). Ad-hoc on-demand distance vector routing.

Sangi, A., Liu, J., & Liu, Z. (2010). Performance Comparison of Single and Multi-Path Routing Protocol in MANET with Selfish Behaviors.

Sun, Z. (2001). Mobile Ad Hoc Networking: An Essential Technology for Pervasive Computing.

Tarique, M., Tepe, K., Adibi, S., & Erfani, S. (2009). Survey of multipath routing protocols for mobile ad hoc networks.

Xu, W., Yan, P., & Xia, D. (2005). Similar Node-Disjoint Multi-paths Routing in Wireless Ad hoc Networks.

Ye, Z., Krishnamurthy, S., & Tripathi, S. (2003). A Framework for Reliable Routing in Mobile Ad Hoc Networks.

Zeng, X., Bagrodia, R., & Gerla, M. (1998, May 26-29). GloMoSim: a Library for Parallel Simulation of Large-Scale Wireless Networks.

## **Ηλεκτρονικές Πηγές**

University of California Los Angeles Computer Science Department Parallel Computing Laboratory and Wireless Adaptive Mobility Laboratory, GloMoSim: A Scalable Simulation Environment for Wireless and Wired Network Systems, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/domains/gloimosim.html>.

OMNET++, 2.3b distribution, <http://www.omnetpp.org/filemgmt/viewcat.php?cid=2>.

The Network Simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2008.

CMU Monarch Project, <http://www.monarch.cs.cmu.edu/cmu-ns.html>, 2008.

Kevin Fall and Kannan Varadhan, editors. ns notes and documentation, The VINT Project, UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, November 1999. Available from: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.