



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

«Μελέτη κινητότητας σε ασύρματα αυτό- οργανούμενα δίκτυα»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΗΣ

ΛΑΜΠΡΟΥΔΗ ΑΡΓΥΡΩΣ

ΑΕΜ:137

Επιβλέποντες Καθηγητές: Δρ. Θ. Λάγκας, Δρ. Μ. Λούτα

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η μελέτη μοντέλων κινητότητας που εφαρμόζονται σε ασύρματα αυτό-οργανούμενα δίκτυα. Μελετήθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του είδους δικτύων και τα είδη αλγορίθμων δρομολόγησης που εφαρμόζονται σε κινητά ασύρματα αυτό-οργανούμενα δίκτυα, με τη συνοπτική περιγραφή κάποιων αντιπροσωπευτικών αλγορίθμων προληπτικής, αντιδραστικής και υβριδικής δρομολόγησης. Αναλύονται οι αρχές λειτουργίας του αλγορίθμου δρομολόγησης Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) και των μοντέλων κινητότητας Probabilistic Random Walk, Column Mobility και Behavioral Mobility, τα οποία προσομοιώθηκαν σε περιβάλλον Matlab. Το κινητό ασύρματο αυτό-οργανούμενο δίκτυο που προσομοιώθηκε λειτουργεί με τον αλγόριθμο αντιδραστικής δρομολόγησης AODV. Πάνω σ' αυτό μελετήθηκε η δικτυακή συμπεριφορά ανάλογα με τον τύπο κίνησης που εφαρμόζεται. Για ατομική κίνηση υλοποιήθηκαν και μελετήθηκαν τα μοντέλα Probabilistic Random Walk και το Behavioral Mobility (Individual Behavioral Mobility), και για ομαδική κίνηση τα Column Mobility και Behavioral Mobility (Behavioral Group Mobility). Στην συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση του φυσικού περιβάλλοντος στις επιδόσεις του δικτύου, προσομοιώνοντας το μοντέλο κινητότητας Behavioral Mobility, το οποίο υποστηρίζει κίνηση σε χώρο με εμπόδια και όρια. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής, συγκρίναμε τα μοντέλα ίδιου τύπου ως προς τα χαρακτηριστικά της κίνησης που δημιουργούν στις οντότητες του δικτύου αλλά και ως προς την επίδραση που έχουν στις επιδόσεις του.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Θωμά Λάγκα για την πολύτιμη βοήθειά του, τις καίριες υποδείξεις του καθώς και για τον χρόνο που μου διέθεσε. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου και με υποστήριξαν μέχρι την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1^ο - Εισαγωγή	6
1.1 Χαρακτηριστικά αυτό-οργανούμενων δικτύων.....	6
Κεφάλαιο 2^ο - Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	8
2.1 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης.....	8
2.1.1 Προληπτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	8
2.1.2 Αντιδραστικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	9
2.1.3 Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	9
2.2 Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV).....	10
2.2.1 Ανακάλυψη γειτονικών κόμβων.....	11
2.2.2 Εδραίωση δρομολογίου.....	11
2.2.3 Ανακάλυψη δρομολογίου.....	12
2.2.4 Εγκαθίδρυση αντίστροφης διαδρομής.....	12
2.2.5 Επεκτάσιμη περιοχή αναζήτησης (Expanding Ring Search).....	13
2.2.6 Εγκαθίδρυση εμπρόσθιου μονοπατιού.....	13
2.2.7 Gratuitous Route Reply.....	14
2.2.8 Μήνυμα σφάλματος δρομολογίου.....	15
2.3 Μοντέλα κίνησης.....	17
2.3.1 Ατομική Κινητικότητα - Probabilistic Random Walk.....	18
2.3.2 Ομαδική Κινητικότητα - Column Mobility.....	19
2.4 Behavioral Mobility.....	20
Κεφάλαιο 3^ο – Υλοποίηση	23
3.1 Δομές Δεδομένων.....	23
3.2 Περιγραφή υλοποίησης.....	25
3.2.1 Τοποθέτηση κόμβων.....	25
3.2.2 Event List και Events.....	25
3.2.3 Event Δρομολόγησης: Αλγόριθμος Ad hoc On-demand Distance Vector.....	26
3.2.4 Event Ενημέρωσης Θέσης.....	31
3.3 Περιβάλλον προσομοίωσης.....	40
Κεφάλαιο 4^ο - Αποτελέσματα.....	47
4.1 Παράμετροι προσομοίωσης.....	47
4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	48
4.3 Εκτίμηση αποτελεσμάτων βάσει του τύπου της κίνησης.....	50

4.3.1 Ατομική Κινητότητα	50
4.3.2 Ομαδική Κινητότητα	63
4.4 Εκτίμηση αποτελεσμάτων βάσει του φυσικού περιβάλλοντος του δικτύου	72
4.4.1 Ατομική κινητότητα με εμπόδια και περιορισμό χώρου	72
4.4.2 Ομαδική κινητότητα με εμπόδια και περιορισμό χώρου.....	81
Κεφάλαιο 5^ο- Συμπεράσματα.....	88
Βιβλιογραφία	90

Κεφάλαιο 1^ο - Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, η επέκταση του internet αλλά και η ανάγκη για μείωση του κόστους δημιούργησε την τάση όλων των συστημάτων να εξελίσσονται βασισμένα περισσότερο στο λογισμικό παρά στην ανθρώπινη επέμβαση. Έτσι δημιουργήθηκε το όραμα των αυτό-οργανούμενων δικτύων. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κινητά ασύρματα αυτό-οργανούμενα δίκτυα, Mobile Ad hoc Networks γνωστά και ως MANET είτε για προσωπική χρήση (PAN), για μικρής εμβέλειας συσκευές, είτε σε WLAN, ακόμα και σε in-house digital networks για ανταλλαγή δεδομένων εικόνας και ήχου. Με τον όρο MANET αναφερόμαστε σε ένα δίκτυο χωρίς υποδομή, πολλαπλών αλμάτων, το οποίο αποτελείται από δεκάδες έως εκατοντάδες κινητούς κόμβους. Κάθε κόμβος μπορεί να έχει μέχρι εκατό μέτρα εμβέλεια σήματος και έχει την δυνατότητα λειτουργίας ως host, αλλά και ως δρομολογητή, ο οποίος πραγματοποιεί έλεγχο του δικτύου και δρομολόγηση. Η IBM εισήγαγε τον όρο της αυτονομίας και της αυτό-διαχείρισης για τα MANET παρουσιάζοντας τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά [1]: Την αυτό-διαμόρφωση (self-configuration), αυτό-θεραπεία (self-healing), αυτό- βελτίωση (self-optimization) και την αυτό-προστασία (self-protection), χαρακτηριστικά αναφερόμενα και ως self-CHOP.

1.1 Χαρακτηριστικά αυτό-οργανούμενων δικτύων

Με τον όρο αυτό-διαμόρφωση (self-configuration) ορίζεται η διεργασία κατά την οποία οι νέοι κόμβοι που πρόκειται να εγκατασταθούν στο δίκτυο, λαμβάνουν με αυτόματο τρόπο τις βασικές παραμέτρους διαμόρφωσης για την σωστή λειτουργία τους. Οι νέοι σταθμοί του δικτύου δημιουργούν αυτόματα λογικούς συσχετισμούς με το δίκτυο και εγκαθιδρύουν το κατάλληλο πλαίσιο ασφαλείας ώστε να δημιουργηθεί ένα ασφαλές κανάλι ελέγχου μεταξύ των νέων στοιχείων του δικτύου. Στην συνέχεια κάθε νέος σταθμός λαμβάνει κάποιες παραμέτρους διαμόρφωσης και αφού ενημερώσει το λογισμικό του, εγκαθίσταται ομαλά στο δίκτυο. Ουσιαστικά είναι η ιδιότητα του κάθε κόμβου να εφαρμόζει στρατηγικές, ώστε να αλλάξει τις σχέσεις του με άλλους κόμβους του δικτύου για την επιβίωσή του σε μεταβολή του περιβάλλοντός ή για να επιτύχει καλύτερες επιδόσεις. Βέβαια κάθε σταθμός μπορεί να βελτιώσει κάποιες παραμέτρους διαμόρφωσης μέσω της λειτουργίας αυτό-βελτίωσης.

Ο όρος αυτό-βελτίωση (self-optimization) σχετίζεται κυρίως με τον συντονισμό του δικτύου, όταν βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας. Οι διεπαφές όλων των σταθμών που ανήκουν στο δίκτυο συλλέγουν πληροφορίες σχετικές με τη διαμόρφωση του δικτύου, και με ένα εργαλείο αυτό-συντονισμού βελτιστοποιούν το δίκτυο. Βέβαια η λειτουργία αυτή δεν μπορεί να εκτελείται σε υπερβολικό βαθμό καθώς το δίκτυο επιβαρύνεται από τον πρόσθετο φόρτο πληροφοριών που αποστέλλονται από κόμβο σε κόμβο. Περιπτώσεις αυτό-βελτίωσης είναι η βελτίωση λίστας γειτόνων, κάλυψη, χωρητικότητα, προσαρμοστικότητα σε κίνηση και πολλές άλλες. Παρόλο όμως που υπάρχει η λειτουργία αυτό-βελτίωσης, είναι αναπόφευκτη η εμφάνιση σφαλμάτων και αποτυχιών στο δίκτυο. Το πρόβλημα αυτό λύνει η λειτουργία της αυτό-θεραπείας.

Η λειτουργία αυτό-θεραπείας (self-healing) στοχεύει στον αυτόματο εντοπισμό, πρόβλεψη, περιορισμό και επιδιόρθωση τυχόν σφαλμάτων και αποτυχιών που εμφανίζονται στο δίκτυο, εφαρμόζοντας έναν μηχανισμό αυτό-θεραπείας σε πολλά επίπεδα. Περιπτώσεις αυτό-θεραπείας αποτελούν η μείωση της ενέργειας εξόδου, σε περίπτωση που ανέβει η θερμοκρασία και η αυτόματη υποβάθμιση λογισμικού.

Η ιδιότητα της αυτό-προστασίας (self-protection) έχει κύρια λειτουργία την ανίχνευση, αναγνώριση και προστασία του εκάστοτε κόμβου του δικτύου από επιθέσεις κακόβουλων χρηστών ώστε να διατηρείται μια συνολική ακεραιότητα στο δίκτυο.

Επιπρόσθετα υπάρχουν άλλα τέσσερα δευτερεύοντα χαρακτηριστικά [1] των MANET :

- Η αυτό-επίγνωση (self-awareness), είναι ιδιότητα που έχει να κάνει κυρίως με την λεπτομερή επίγνωση των κόμβων του δικτύου σχετικά με τα στοιχεία που το αποτελούν, τους πόρους, τις σχέσεις μεταξύ κόμβων αλλά και τα όρια του.
- Η αυτό-προσαρμογή (self-adaption) αφορά στις στρατηγικές τις οποίες υιοθετεί το δίκτυο ώστε να αλληλεπιδράσει με γειτονικά συστήματα ή να προσαρμοστεί σε τυχόν αλλαγές του περιβάλλοντός του με αυτόματο τρόπο.
- Η αυτό- εξέλιξη (self-evolution) αφορά στην δημιουργία νέων στρατηγικών και την ευρεία εφαρμογή τους.
- Η αυτό-πρόβλεψη (self-anticipation) έχει να κάνει με την πρόβλεψη των απαιτήσεων πόρων για τους χρήστες χωρίς να εμπλέκονται οι ίδιοι.

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τα δίκτυα MANET είναι να εδραιωθεί συνεχής και σταθερή επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Λόγω της κινητότητας σ' αυτόν τον τύπο δικτύων, κάθε κόμβος μεταβάλλει τις συνδέσεις επικοινωνίας με τους υπόλοιπους κόμβους και προωθεί πληροφορίες κίνησης προς όλους για να επιτύχει βέλτιστη δρομολόγηση στο δίκτυο, ανάλογα με το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιεί. Υπάρχουν τρία είδη πρωτοκόλλων δρομολόγησης, προληπτικοί, αντιδραστικοί και υβριδικοί. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα παραπάνω είδη με εκτενέστερη αναφορά στον αντιδραστικό αλγόριθμο AODV που υλοποιήθηκε και προσομοιώθηκε για τις απαιτήσεις της διπλωματικής.

Κεφάλαιο 2^ο - Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Προληπτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης (proactive routing)
- Αντιδραστικά πρωτόκολλα δρομολόγησης (reactive routing)
- Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης (hybrid routing)

2.1.1 Προληπτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Κατά την προληπτική δρομολόγηση όλοι οι κόμβοι ενημερώνονται συνεχώς με ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου για τυχόν αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου, ώστε να είναι ενήμεροι εκ των προτέρων για τα διαθέσιμα δρομολόγια προς τον προορισμό που επιθυμούν να στείλουν δεδομένα. Ακολουθούν κάποια από τα πιο γνωστά προληπτικά πρωτόκολλα με κάποια βασικά χαρακτηριστικά τους.

- **DSDV (Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector):** Όλοι οι κόμβοι διαθέτουν πίνακες δρομολόγησης που περιλαμβάνουν λίστες όλων των διαθέσιμων προορισμών. Περιοδικά κάθε κόμβος λαμβάνει ενημερώσεις για τον πίνακα δρομολόγησής του και μόνο στην περίπτωση που γίνει κάποια σημαντική αλλαγή στον πίνακα, στέλνεται άμεσα ενημέρωση στους υπόλοιπους κόμβους. Επιπλέον χρησιμοποιεί αριθμούς ακολουθίας σε κάθε μήνυμα ενημέρωσης. Κάθε φορά που δημιουργείται ένα μήνυμα ενημέρωσης αυτός ο αριθμός αυξάνεται με αποτέλεσμα η πιο πρόσφατη ενημέρωση να έχει και τον μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας. Έτσι ενημερώνεται για την πιο πρόσφατη αλλαγή στον πίνακα δρομολόγησης.
- **WRP (Wireless Routing Protocol):** Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί πίνακες απόστασης, πίνακες δρομολόγησης, πίνακες κόστους συνδέσεων και λίστες αναμετάδοσης μηνυμάτων. Περιοδικά στέλνονται ενημερώσεις μόνο προς τους γείτονες κάθε κόμβου.
- **GSR (Global State Routing):** Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι όμοιο με το DSDV, αλλά αρκετά βελτιωμένο καθώς αποτρέπει την πλημμύρα μηνυμάτων δρομολόγησης. Όλοι οι κόμβοι ανταλλάσσουν διανύσματα κατάστασης συνδέσεων με τους γειτονικούς τους, βάσει των οποίων βελτιστοποιούν τις αποφάσεις δρομολόγησης.
- **FSR (Fisheye State Routing):** Στο πρωτόκολλο αυτό τα μηνύματα ενημέρωσης περιέχουν πληροφορίες κυρίως για τους πλησιέστερους κόμβους και πιο σπάνια για τους πιο απομακρυσμένους, γι' αυτό και ονομάζεται fisheye. Κάθε κόμβος περιέχει ακριβείς πληροφορίες για τους κοντινούς του, με αποτέλεσμα κατά την προώθηση δεδομένων, καθώς πλησιάζει το πακέτο στον προορισμό, να γίνονται διαθέσιμες όλο και πιο ακριβείς πληροφορίες δρομολόγησης.

2.1.2 Αντιδραστικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Αντίθετα στα πρωτόκολλα αντιδραστικής δρομολόγησης, η διαδικασία ενημέρωσης διαδρομών ξεκινάει μόνο κατ' απαίτηση, δηλαδή μόνο εάν ένας κόμβος σκοπεύει να στείλει δεδομένα προς έναν συγκεκριμένο προορισμό. Συνήθως για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής προς τον προορισμό ανταλλάσσονται μηνύματα αίτησης και απάντησης μεταξύ των κόμβων. Μερικά από τα πιο γνωστά αντιδραστικά πρωτόκολλα είναι τα εξής:

- AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector Routing), το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.
- ABR (Associatively Based Routing): Το πρωτόκολλο ορίζει την έννοια του βαθμού σταθερότητας προσεταιρισμού, βάση του οποίου επιλέγεται η συντομότερη διαδρομή. Περιοδικά κάθε κόμβος στέλνει μήνυμα για να ανακοινώσει την ύπαρξή του. Οι γειτονικοί κόμβοι που θα το λάβουν ενημερώνουν τον πίνακα προσεταιριστικότητας, και για κάθε τέτοιο μήνυμα που λαμβάνουν η αντίστοιχη ένδειξη προσεταιρισμού του αντίστοιχου κόμβου που έστειλε το μήνυμα αυξάνεται. Όταν ένας κόμβος απομακρυνθεί τότε η ένδειξη προσεταιρισμού μηδενίζεται. Με ευρεία εκπομπή γίνεται ανακάλυψη διαδρομής και με κριτήριο τον βαθμό προσεταιρισμού επιλέγεται η διαδρομή με τις υψηλότερες ενδείξεις. Η διαδρομή αυτή ανακατασκευάζεται ανάλογα με τις μετακινήσεις και τις αλλαγές που γίνονται στην τοπολογία.
- TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm): Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο αυτό, κατασκευάζει έναν κατευθυντικό άκυκλο γράφο για την εγκαθίδρυση διαδρομής. Χρησιμοποιεί την παράμετρο του ύψους, την απόσταση δηλαδή του ενδιάμεσου κόμβου που αποκρίνεται στο ερώτημα ανακάλυψης διαδρομής από τον τελικό προορισμό των δεδομένων. Έτσι βρίσκει από τις τιμές των παραμέτρων που λαμβάνει απ' όλους τους κόμβους, την βέλτιστη διαδρομή.
- DSR (Dynamic Source Routing): Όλοι οι κόμβοι του δικτύου διατηρούν στη μνήμη τους όλες τις γνωστές διαδρομές. Για την αποστολή ενός πακέτου, γίνεται έλεγχος της μνήμης του κόμβου. Έτσι στην περίπτωση που υπάρχει γνωστή διαδρομή, το πακέτο στέλνεται κανονικά, διαφορετικά εκπέμπεται αίτηση διαδρομής. Την αντίστοιχη διαδικασία θα επαναλάβει ο κόμβος που θα παραλάβει την αίτηση διαδρομής. Στην περίπτωση που βρεθεί γνωστή διαδρομή απαντά στον κόμβο που έστειλε την αίτηση με το γνωστό δρομολόγιο.

2.1.3 Υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Τα υβριδικά πρωτόκολλα έχουν μια ενδιάμεση δράση. Ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου υιοθετούν χαρακτηριστικά και από τις δύο κατηγορίες με αποτέλεσμα κάποιοι κόμβοι του δικτύου να χρησιμοποιούν προληπτική δρομολόγηση και κάποιοι άλλοι αντιδραστική. Μερικά από τα πιο γνωστά πρωτόκολλα αυτού του τύπου είναι τα εξής:

- **DHAR (Dual-Hybrid Adaptive Routing):** Χρησιμοποιείται στην περίπτωση που έχουμε συστάδες. Ο εκπρόσωπος συστάδας στέλνει μηνύματα ενημέρωσης εκ μέρους της συστάδας του, σε όλους τους κόμβους κάθε γειτονικής συστάδας. Οι εκπρόσωποι συστάδας είναι αυτοί με το μικρότερο id στην συστάδα τους. Γίνεται ουσιαστικά μια παρόμοια διαδικασία με την αντιδραστική ανακάλυψη διαδρομής.
- **ADV (Adaptive Distance Vector):** Χρησιμοποιεί τα βασικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου διανύσματος απόστασης, με περισσότερα αντιδραστικά χαρακτηριστικά, αξιοποιώντας ουσιαστικά τα πλεονεκτήματα και των δύο κατηγοριών δρομολόγησης.
- **SHARP (Sharp Hybrid Adaptive Routing Protocol):** Περιλαμβάνει τόσο αντιδραστικά όσο και προληπτικά χαρακτηριστικά καθώς μεταβάλλει τον όγκο των πληροφοριών δρομολόγησης οι οποίες διαμοιράζονται προληπτικά. Ορίζει ζώνες κόμβων και ανάλογα με την ακτίνα της ζώνης ορίζεται και το πλήθος των κόμβων που ανήκουν σ' αυτή. Για δρομολόγηση εντός των ζωνών χρησιμοποιείται προληπτική δρομολόγηση ενώ για δρομολόγηση εκτός των ζωνών χρησιμοποιείται αντιδραστική.
- **NAMP (Neighbor Aware Multicast Routing Protocol):** Η δρομολόγηση βασίζεται σε δένδρο που χρησιμοποιεί πληροφορίες γειτονικών κόμβων. Εάν ο παραλήπτης των δεδομένων απέχει μέχρι και δύο άλματα μακριά, γίνεται απευθείας αποστολή χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες γειτονικών κόμβων. Αν δεν βρίσκεται στην εμβέλεια αυτή αναζητεί μέσω δένδρου πολυδιανομής την κατάλληλη διαδρομή βάσει των απαντήσεων αντίστροφης διαδρομής που θα λάβει.

2.2 Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV)

Το πρωτόκολλο Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing θεωρείται ένα κατεξοχήν αντιδραστικό πρωτόκολλο δρομολόγησης. Βασικό αντικείμενο του είναι η παροχή μονής εκπομπής (unicast), πολυδιανομής (multicast) και ευρείας εκπομπής (broadcast) σε όλους τους κόμβους ενός ad-hoc δικτύου [2][3], μειώνοντας την μετάδοση μηνυμάτων ελέγχου, αλλά ταυτόχρονα μεταδίδοντας πληροφορίες σχετικά με διακοπές συνδέσεων σε όσους κόμβους απαιτείται για την εξασφάλιση συνεχούς επικοινωνίας. Στην συγκεκριμένη μελέτη ασχοληθήκαμε με την unicast επικοινωνία.

Πιο συγκεκριμένα ένας κόμβος που χρησιμοποιεί τον AODV δεν πραγματοποιεί αναζήτηση δρομολογίου προς έναν άλλον κόμβο σε περιοδικά χρονικά διαστήματα, αλλά μόνο την στιγμή που αυτοί θέλουν να επικοινωνήσουν. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση στην οποία ένας κόμβος λειτουργεί ως ενδιάμεσος σταθμός προώθησης μηνυμάτων για την διατήρηση επικοινωνίας μεταξύ άλλων κόμβων. Χρησιμοποιεί μηχανισμούς ανακάλυψης διαδρομής με ευρεία εκπομπή και βασίζεται κυρίως στην δυναμική εγγραφή δρομολογίων στους ενδιάμεσους κόμβους επικοινωνίας. Επιπλέον για να ενημερώνονται οι εγγραφές στους πίνακες δρομολόγησης με την πιο πρόσφατη πληροφορία δρομολόγησης, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί αριθμούς ακολουθίας προορισμού. Κάθε αριθμός ακολουθίας ενός προορισμού αυξάνεται μονοτονικά ώστε να αποφευχθεί η λανθασμένη ενημέρωση διαδρομής με μία παλαιότερη. Μ' αυτούς τους μηχανισμούς ο αλγόριθμος αξιοποιεί αποτελεσματικά το εύρος ζώνης, μειώνοντας τον φόρτο του δικτύου από κυκλοφορία ελέγχου και δεδομένων, με αποτέλεσμα να ανταποκρίνεται άμεσα σε αλλαγές της τοπολογίας.

2.2.1 Ανακάλυψη γειτονικών κόμβων

Κάθε κόμβος γνωρίζει τους γειτονικούς του, μέσω της μετάδοσης μηνυμάτων. Κάθε φορά που ένας κόμβος στέλνει ένα μήνυμα, οι γειτονικοί του κόμβοι «ακούνε» την μετάδοση και ενημερώνουν τις τοπικές πληροφορίες συνδεσιμότητας ώστε να επιβεβαιώσουν ότι περιλαμβάνονται όλοι οι ενεργοί γείτονες τους. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένα αξιόπιστο πρωτόκολλο δεύτερου επιπέδου, όπως το 802.11, οι κόμβοι βασίζονται στην ανταπόκριση του MAC επιπέδου για την ανίχνευση διακοπής συνδέσεων με γειτονικούς κόμβους. Διαφορετικά εάν δεν είναι διαθέσιμο πρωτόκολλο δεύτερου επιπέδου, χρησιμοποιείται η προληπτική μέθοδος αποστολής μηνυμάτων χαιρετισμού (Hello messages).

2.2.2 Εδραίωση δρομολογίου

Κατά την διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής οι κόμβοι ανταλλάσσουν μηνύματα αίτησης (RREQ) και απάντησης διαδρομής (RREP) ώστε να βρεθεί η βέλτιστη συντομότερη διαδρομή επικοινωνίας τους. Από τη στιγμή λοιπόν που κάθε κόμβος έχει επίγνωση των γειτονικών του κόμβων μπορεί να ξεκινήσει η αναζήτηση δρομολογίου.

Πίνακας δρομολόγησης

Κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης τον οποίο χρησιμοποιεί για να καταγράψει ποιοι κόμβοι αποτελούν επόμενα άλματα για δρομολόγια προς συγκεκριμένους προορισμούς. Κάθε εγγραφή του πίνακα δρομολόγησης σύμφωνα με τον C.Perkins [2] έχει τα εξής πεδία:

- Διεύθυνση IP προορισμού
- Αριθμός ακολουθίας προορισμού (destination sequence number)
- Διεύθυνση IP επόμενου άλματος
- Μετρητής αλμάτων μέχρι τον προορισμό
- Τελευταία μέτρηση αλμάτων (last hop count)
- Λίστα προηγούμενων κόμβων
- Χρόνος ζωής
- Σημαίες δρομολόγησης
- Διεπαφές

Οι νέες εγγραφές του πίνακα δρομολόγησης καταγράφονται με τη σειρά που λαμβάνονται τα μηνύματα αίτησης (RREQ) και απάντησης (RREP) από τους κόμβους. Κάθε φορά που ένας κόμβος λάβει κάποιο από τα παραπάνω μηνύματα ελέγχει εάν έχει κάποια εγγραφή δρομολογίου προς τον συγκεκριμένο προορισμό. Στην περίπτωση που δεν έχει, δημιουργεί μια νέα εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης με τα στοιχεία που του υποδεικνύει το αντίστοιχο μήνυμα. Στην περίπτωση που υπάρχει εγγραφή δρομολογίου προς τον συγκεκριμένο προορισμό, ο κόμβος συγκρίνει τους αριθμούς ακολουθίας της ήδη υπάρχουσας εγγραφής με του μηνύματος που έλαβε. Στην περίπτωση που το μήνυμα ελέγχου περιέχει μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας προορισμού (destination sequence number), γίνεται ενημέρωση των πεδίων της ήδη υπάρχουσας εγγραφής με αποτέλεσμα να έχει ο πίνακας

δρομολόγησης την πιο πρόσφατη πληροφορία δρομολόγησης. Έτσι ο αλγόριθμος δεν δημιουργεί βρόγχους δρομολόγησης ακόμα και στις περιπτώσεις που λάβει ετεροχρονισμένα μηνύματα ελέγχου ή σε περιπτώσεις υψηλής κινητότητας. Επιπλέον κάθε εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης έχει έναν συγκεκριμένο χρόνο ζωής. Στην περίπτωση που παρέλθει αυτός ο χρόνος, τότε η εγγραφή δεν θεωρείται έγκυρη και διαγράφεται. Κάθε φορά που λήγει μια εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης, η τιμή του μετρητή αλμάτων καταγράφεται στο πεδίο Last Hop. Έτσι η τιμή του μετρητή γίνεται άπειρη και ο αριθμός ακολουθίας προορισμού αυξάνεται. Η λίστα των πρόδρομων κόμβων χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που στέλνονται μηνύματα σφάλματος RRER όταν λήγει ένα δρομολόγιο.

2.2.3 Ανακάλυψη δρομολογίου

Η ανακάλυψη δρομολογίου γίνεται μόνο κατ' απαίτηση, στην περίπτωση που ένας κόμβος θέλει να βρει δρομολόγιο προς έναν συγκεκριμένο προορισμό. Ο κόμβος αυτός ξεκινάει την διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής, στέλνοντας προς όλους τους γειτονικούς του κόμβους ένα μήνυμα αίτησης δρομολογίου (RREQ) προς τον συγκεκριμένο προορισμό. Το μήνυμα έχει την εξής μορφή.

Σημαίες (flags)	Μετρητής αλμάτων (hop count)	Broadcast ID	Διεύθυνση κόμβου-πηγής (source address)	Διεύθυνση κόμβου-προορισμού (destination address)	Αριθμός ακολουθίας πηγής (source sequence number)	Αριθμός ακολουθίας προορισμού (destination sequence number)

Η μόνη σημαία που χρησιμοποιείται σ' αυτού του είδους τα μηνύματα είναι η Gratuitous RREP σημαία, όπως επισημαίνει η E.Royer [3]. Η πηγή θέτει τη σημαία σε εφαρμογή σε περίπτωση που επιθυμεί να στείλει στον προορισμό μήνυμα gratuitous RREP, η χρήση του οποίου εξηγείται στην συνέχεια. Ο μετρητής αλμάτων μηδενίζεται και κάθε φορά που το μήνυμα αίτησης προωθείται, αυξάνεται κατά ένα. Το broadcast id σε συνδυασμό με τον αριθμό ακολουθίας, εξασφαλίζει την μοναδικότητα του μηνύματος αίτησης διαδρομής. Ο αριθμός ακολουθίας αυξάνεται κατά ένα κάθε φορά που ο κόμβος αποκτά νέες πληροφορίες και το broadcast id αυξάνεται κατά ένα για κάθε νέο μήνυμα αίτησης που δημιουργεί ο κόμβος. Έτσι ο κόμβος τοποθετεί την διεύθυνσή του στο πεδίο διεύθυνση πηγής, το broadcast id στο αντίστοιχο πεδίο και τον αριθμό ακολουθίας του στο πεδίο αριθμό ακολουθίας πηγής. Τέλος τοποθετεί την διεύθυνση του προορισμού και τον πιο πρόσφατο αριθμό ακολουθίας προορισμού που γνωρίζει στα πεδία διεύθυνση κόμβου-προορισμού και αριθμό ακολουθίας προορισμού αντίστοιχα.

2.2.4 Εγκαθίδρυση αντίστροφης διαδρομής

Ο κόμβος που θα λάβει το μήνυμα αίτησης αρχικά είτε δημιουργεί εγγραφή αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή, εάν δεν υπάρχει διαθέσιμη διαδρομή προς αυτή, ή αντίστοιχα ενημερώνει την ήδη υπάρχουσα στον πίνακα δρομολόγησής του, καταγράφοντας τον νέο αριθμό ακολουθίας της πηγής και τις πληροφορίες επόμενου άλματος στην αντίστοιχη εγγραφή. Έπειτα ο κόμβος ελέγχει εάν υπάρχει κάποια γνωστή διαδρομή προς τον προορισμό στον πίνακα δρομολόγησής του. Ο κόμβος θα απαντήσει με μήνυμα απάντησης (RREP) είτε στην περίπτωση που είναι ο ίδιος ο προορισμός, είτε στην περίπτωση που έχει κάποια έγκυρη διαδρομή προς τον προορισμό με αριθμό ακολουθίας προορισμού μεγαλύτερο από αυτόν που υποδεικνύει το αντίστοιχο πεδίο στο μήνυμα αίτησης. Στην περίπτωση που δεν ισχύει τίποτε από τα παραπάνω, προωθεί το μήνυμα αίτησης στους γείτονές του. Είτε στείλει μήνυμα απάντησης είτε όχι, υποχρεούται να αυξήσει κατά ένα τον αριθμό ακολουθίας του προορισμού στο μήνυμα αίτησης που θα προωθήσει στους γείτονές του. Έτσι εξασφαλίζεται ότι το μήνυμα αίτησης που προωθεί θα έχει τον μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας προορισμού.

2.2.5 Επεκτάσιμη περιοχή αναζήτησης (Expanding Ring Search)

Κάθε φορά που ξεκινάει αναζήτηση δρομολογίου προς έναν προορισμό, η πηγή εκπέμπει μηνύματα αίτησης δρομολογίου προς όλο το δίκτυο. Σε περιπτώσεις που το δίκτυο είναι μικρό, οι επιπτώσεις της πλημμύρας είναι μηδαμινές. Στην περίπτωση όμως που έχουμε μεγάλο δίκτυο, οι επιπτώσεις μπορεί να είναι πολύ επιβλαβείς. Για να αποφευχθεί μια τέτοια κατάσταση, η πηγή χρησιμοποιεί την τεχνική επεκτάσιμης περιοχής αναζήτησης [3] (expanding ring search), στην οποία θέτει σε μια αρχική τιμή την παράμετρο Time To Live στο μήνυμα αίτησης δρομολογίου προς τον προορισμό. Εάν η πηγή δεν λάβει κάποια απάντηση μέσα στην περίοδο ανακάλυψης δρομολογίου, εκπέμπει ξανά το ίδιο μήνυμα, αλλά αυτή τη φορά με μεγαλύτερη τιμή στην παράμετρο Time To Live. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι η τιμή της παραμέτρου αυτής να φτάσει ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Πέρα από αυτό το κατώφλι, το μήνυμα αίτησης διαδρομής εκπέμπεται προς όλο το δίκτυο για συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών. Όταν εδραιωθεί ένα δρομολόγιο προς τον συγκεκριμένο προορισμό, καταγράφεται το πλήθος των αλμάτων που απέχει από την πηγή στο πεδίο Last Hop Count. Έτσι στην περίπτωση που ξεκινήσει νέα αναζήτηση δρομολογίου προς τον ίδιο προορισμό, η παράμετρος TTL παίρνει την τιμή του Last Hop Count. Έτσι επιτρέπεται στην πηγή να ελέγξει την περιοχή στην οποία ήταν πριν ο προορισμός, στην οποία μπορεί να βρίσκεται ακόμα. Στην περίπτωση που δεν βρεθεί εκεί ο προορισμός, η διαδικασία επαναλαμβάνεται όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου δρομολόγησης στην συγκεκριμένη μελέτη δεν εφαρμόστηκε η τεχνική αυτή, διότι καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ο αρχικός αποστολέας και ο τελικός παραλήπτης των πακέτων δεδομένων παρέμεναν οι ίδιοι.

2.2.6 Εγκαθίδρυση εμπρόσθιου μονοπατιού

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένας κόμβος μπορεί να απαντήσει με μήνυμα απάντησης διαδρομής (RREP) στην πηγή είτε στην περίπτωση που γνωρίζει κάποιο έγκυρο δρομολόγιο προς τον τελικό προορισμό, είτε είναι ο ίδιος ο προορισμός. Ένα μήνυμα απάντησης διαδρομής (RREP) είναι της εξής μορφής:

Σημαίες (flags)	Μετρητής αλμάτων	Διεύθυνση κόμβου-πηγής (source address)	Διεύθυνση προορισμού (destination address)	Αριθμός ακολουθίας προορισμού (destination sequence number)	Χρόνος ζωής εγγραφής (lifetime)
-----------------	------------------	---	--	---	---------------------------------

Η μόνη σημαία που χρησιμοποιείται στην αποστολή μηνύματος απάντησης είναι η acknowledgment flag η οποία χρησιμοποιείται στην περίπτωση που το κανάλι επικοινωνίας είναι αναξιόπιστο. Ο κόμβος που στέλνει το μήνυμα απάντησης υποδεικνύει στον παραλήπτη του, να στείλει μήνυμα επιβεβαίωσης ότι παρέλαβε το μήνυμα απάντησης δρομολογίου (RREP-ACK). Την σημαία αυτή μπορεί να ενεργοποιήσει οποιοσδήποτε κόμβος σε όλο το δίκτυο, μόνο εφόσον θεωρεί ότι η σύνδεση μπορεί να παρουσιάσει σφάλματα. Στο πεδίο διεύθυνση προορισμού του μηνύματος απάντησης εγγράφεται η διεύθυνση του προορισμού, ενώ στο πεδίο αριθμού ακολουθίας εγγράφεται ο αριθμός ακολουθίας του προορισμού, με την τιμή της εγγραφής του πίνακα δρομολόγησής του. Ο μετρητής αλμάτων παίρνει την τιμή μηδέν εάν ο κόμβος που απαντά είναι ο ίδιος ο προορισμός, διαφορετικά την αντίστοιχη εγγραφή από τον πίνακα δρομολόγησης. Έτσι λοιπόν ο κόμβος που απαντά, στέλνει στον κόμβο που του έστειλε πρώτος το μήνυμα αίτησης δρομολογίου το μήνυμα απάντησης. Ο κόμβος που θα παραλάβει το μήνυμα απάντησης, εάν διαθέτει κάποια εγγραφή την ενημερώνει, διαφορετικά δημιουργεί μια νέα εγγραφή, εγκαθιδρύοντας νέο μονοπάτι προς τον προορισμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν ενημερωθεί ο πίνακας δρομολόγησης, αυξάνεται κατά ένα ο μετρητής αλμάτων. Στην συνέχεια ο κόμβος αυτός δημιουργεί μήνυμα απάντησης δρομολογίου προς τον προηγούμενο κόμβο επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία, η οποία συνεχίζεται μέχρι να παραλάβει το μήνυμα απάντησης η πηγή. Όσοι κόμβοι δεν λάβουν κάποια απάντηση δρομολογίου, διαγράφουν τις εγγραφές αντίστροφης διαδρομής με την περάτωση του χρόνου ζωής τους. Όταν η πηγή λάβει μήνυμα απάντησης μπορεί να χρησιμοποιήσει το μονοπάτι για την αποστολή πακέτων δεδομένων στον προορισμό. Στην περίπτωση κατά την οποία η πηγή λάβει μήνυμα απάντησης με μεγαλύτερο ή ίσο αριθμό ακολουθίας προορισμού αλλά μικρότερο πλήθος αλμάτων, ενημερώνει τις πληροφορίες του πίνακα δρομολόγησης και χρησιμοποιεί το νέο δρομολόγιο. Αντίστοιχα οι ενδιάμεσοι κόμβοι είναι δυνατό να παραλάβουν πολλές φορές μηνύματα απάντησης για συγκεκριμένο ζευγάρι πηγής προορισμού. Στην περίπτωση αυτή ο κόμβος ελέγχει τα πεδία του αριθμού ακολουθίας και του μετρητή αλμάτων. Εάν ο αριθμός ακολουθίας προορισμού του μηνύματος είναι μεγαλύτερος από αυτόν της εγγραφής στον πίνακα δρομολόγησης ή εάν ο αριθμός ακολουθίας είναι ίδιος αλλά έχουμε μικρότερο πλήθος αλμάτων, ο κόμβος ενημερώνει την αντίστοιχη εγγραφή προς τον προορισμό και προωθεί το μήνυμα απάντησης προς την πηγή. Στην αντίθετη περίπτωση, οι πληροφορίες που περιλαμβάνει το μήνυμα απάντησης δεν είναι οι βέλτιστες συγκριτικά με αυτές που ήδη γνωρίζει, οπότε απορρίπτει το μήνυμα απάντησης χωρίς να το προωθήσει.

2.2.7 Gratuitous Route Reply

Όταν ένας κόμβος παραλάβει ένα μήνυμα απάντησης δρομολογίου, δεν προωθεί άλλα μηνύματα αίτησης διαδρομής. Στην περίπτωση που ένας ενδιάμεσος κόμβος γνωρίζει

δρομολόγιο προς τον προορισμό και απαντήσει με RREP στην πηγή, ο προορισμός δεν θα λάβει ποτέ μήνυμα αίτησης διαδρομής με αποτέλεσμα να μη δημιουργήσει εγγραφή αντίστροφου δρομολογίου προς την πηγή. Ως συνέπεια η πηγή δεν θα μπορεί να εγκαθιδρύσει TCP session με τον προορισμό. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα η πηγή χρησιμοποιεί την σημαία gratuitous flag [3] στα μηνύματα αίτησης διαδρομής. Στην περίπτωση αυτή ένας κόμβος που θα στείλει μήνυμα απάντησης με γνωστό δρομολόγιο στην πηγή, θα στείλει και μήνυμα απάντησης RREP στον προορισμό. Στο μήνυμα αυτό το πεδίο διεύθυνση προορισμού θα αναγράφει την διεύθυνση της πηγής ενώ η διεύθυνση του προορισμού θα αναγράφεται στο πεδίο διεύθυνση πηγής. Ο κόμβος που θα ξεκινήσει την αποστολή του gratuitous RREP συμπληρώνει τον μετρητή αλμάτων με την απόστασή του από την πηγή και στην συνέχεια προωθεί το μήνυμα στο επόμενο άλμα προς τον προορισμό.

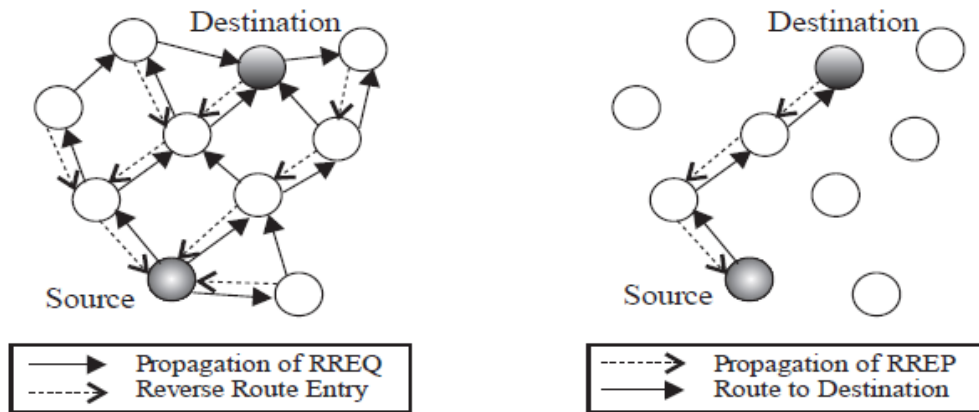
2.2.8 Μήνυμα σφάλματος δρομολογίου

Στην περίπτωση που ένας κόμβος εντοπίσει διακοπή μιας σύνδεσης με έναν γειτονικό του κόμβο, αντιγράφει την παλιά απόσταση προς τον προορισμό στο πεδίο του πίνακα δρομολόγησης Last Hop Count. Στην συνέχεια θεωρεί την σύνδεση ως μη έγκυρη, θέτοντας την απόσταση προς τον συγκεκριμένο προορισμό στο άπειρο και αυξάνει τον αριθμό ακολουθίας κατά ένα. Έπειτα ελέγχει στον πίνακα δρομολόγησης του εάν υπάρχει κάποια εγγραφή ενεργού δρομολογίου με τον συγκεκριμένο κόμβο ως επόμενο άλμα. Ενεργό θεωρείται το δρομολόγιο το οποίο έχει πρόσφατα χρησιμοποιηθεί για την αποστολή πακέτων δεδομένων. Εάν λοιπόν υπάρχει κάποιο ενεργό δρομολόγιο και εάν διαθέτει έναν ή παραπάνω πρόδρομους κόμβους, ο κόμβος δημιουργεί μηνύματα σφάλματος της εξής μορφής:

Μετρητής προορισμού (Destination Count)	Διεύθυνση προορισμού που δεν μπορεί να προσεγγιστεί (Unreach destination address)	Αριθμός ακολουθίας προορισμού που δεν μπορεί να προσεγγιστεί (Unreach destination sequence number)
---	---	--

Το μήνυμα σφάλματος περιέχει ένα πεδίο για κάθε προορισμό που χάθηκε λόγω της διακοπής σύνδεσης. Κάθε αριθμός ακολουθίας, κάθε προορισμού αυξάνεται κατά ένα. Το πεδίο destination count υποδεικνύει πόσοι είναι οι προορισμοί αυτοί. Στην περίπτωση που ένας γειτονικός κόμβος λάβει ένα μήνυμα σφάλματος ακυρώνει τα δρομολόγια που υποδεικνύει το μήνυμα εάν χρησιμοποιούν τον κόμβο που δημιούργησε το RERR ως επόμενο άλμα. Εάν ένα ή παραπάνω δρομολόγια τον περιέχουν ως εγγραφή προηγούμενου κόμβου, τότε ο κόμβος που έλαβε το μήνυμα εκπέμπει το δικό του μήνυμα σφάλματος με τους χαμένους προορισμούς. Όταν η πηγή παραλάβει ένα μήνυμα σφάλματος ακυρώνει τα δρομολόγια που υποδεικνύει το μήνυμα και στην περίπτωση που ακόμα χρειάζεται δρομολόγιο προς τον συγκεκριμένο προορισμό, ξεκινάει νέα αναζήτηση δρομολογίου. Μια άλλη περίπτωση στην οποία δημιουργείται μήνυμα σφάλματος είναι όταν ένας κόμβος

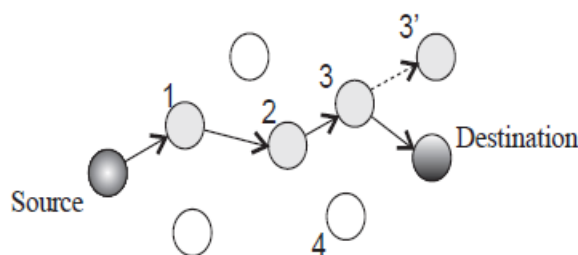
παραλάβει πακέτα δεδομένων για τα οποία δεν γνωρίζει κάποιο δρομολόγιο. Τοποθετεί την διεύθυνση του προορισμού στο μήνυμα σφάλματος και το εκπέμπει σε όλους τους κόμβους. Έτσι στέλνει ένα μήνυμα σφάλματος για κάθε πακέτο δεδομένων που λαμβάνει για κάθε προορισμό που δεν μπορεί να προσεγγιστεί. Ακολουθεί η απεικόνιση ενός τυπικού παραδείγματος δρομολόγησης χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο AODV.



Εικόνα 1~ Αριστερά απεικονίζεται η διαδικασία αποστολής μηνυμάτων αίτησης διαδρομής και δεξιά η διαδικασία αποστολής μηνυμάτων απάντησης διαδρομής.

Αριστερά στην Εικόνα 1 η πηγή στέλνει μηνύματα αίτησης διαδρομής RREQ προς όλους τους γειτονικούς της γείτονες, κι αυτοί δημιουργούν εγγραφές αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή. Στην συνέχεια στέλνουν κι αυτοί μηνύματα αίτησης, μέχρι να βρεθεί γνωστό δρομολόγιο προς τον προορισμό ή να λάβει ο προορισμός κάποιο μήνυμα αίτησης.

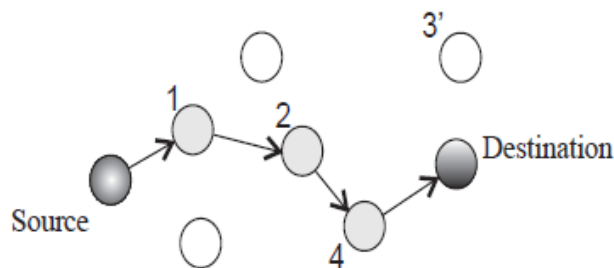
Στα δεξιά της Εικόνας 1 ο προορισμός απαντά με μηνύματα απάντησης δρομολογίου RREP, χρησιμοποιώντας τις εγγραφές αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή. Κάθε κόμβος που παραλαμβάνει ένα μήνυμα απάντησης το προωθεί στο επόμενο άλμα προς την πηγή, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί εγγραφή διαδρομής προς τον προορισμό.



Εικόνα 2~ Στην εικόνα φαίνεται η περίπτωση στην οποία εντοπίζεται διακοπή μιας σύνδεσης και ενεργοποιείται η δημιουργία μηνυμάτων σφάλματος.

Στην Εικόνα 2 αναπαρίσταται η διαδικασία δημιουργίας μηνυμάτων σφάλματος. Όπως φαίνεται παρουσιάζεται διακοπή μεταξύ των κόμβων 2 και 3 με αποτέλεσμα ο κόμβος

2 να δημιουργεί μήνυμα σφάλματος το οποίο περιέχει τον κόμβο 3 με τον οποίο χάθηκε η σύνδεση αλλά και τον υποδεικνυόμενο προορισμό της εγγραφής που περιελάμβανε τον κόμβο 3 ως επόμενο άλμα. Έτσι ο κόμβος 1 λαμβάνοντας το μήνυμα σφάλματος ακυρώνει τις εγγραφές του πίνακα δρομολόγησης που περιελάμβαναν τον κόμβο 2 ως επόμενο άλμα προς τον προορισμό. Στην συνέχεια εκπέμπει το δικό του μήνυμα σφάλματος στους γειτονικούς του κόμβους επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία. Όταν η πηγή θα παραλάβει το μήνυμα σφάλματος θα ακυρώσει τα αντίστοιχα δρομολόγια και στην περίπτωση που επιθυμεί ακόμα να εδραιώσει κάποιο μονοπάτι επικοινωνίας προς τον προορισμό θα ξεκινήσει νέα αναζήτηση διαδρομής όπως φαίνεται στην Εικόνα 3 ώστε να επιδιορθωθεί το δρομολόγιο μέσω του κόμβου 4.



Εικόνα 3~ Στην εικόνα φαίνεται το νέο δρομολόγιο προς τον προορισμό, μετά την επιδιόρθωση των εσφαλμένων εγγραφών στους πίνακες δρομολόγησης των ενδιάμεσων κόμβων.

2.3 Μοντέλα κίνησης

Λόγω του ότι ακόμα δεν είναι ευρέως διαδεδομένη η εφαρμογή των MANET, όλες οι έρευνες στον τομέα αυτό γίνονται κυρίως μέσω προσομοιώσεων. Μία από τις βασικές παραμέτρους μελέτης αποτελεί η κινητικότητα, η οποία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις επιδόσεις του δικτύου. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται μοντέλα κινητότητας ανάλογα με τον τύπο κίνησης, και το φυσικό περιβάλλον στο οποίο κινούνται οι οντότητες ενός δικτύου.

Τα μοντέλα κινητότητας ανάλογα με τον τύπο της κίνησης διακρίνονται σε μοντέλα ατομικής και ομαδικής κινητότητας. Τα μοντέλα ατομικής κινητότητας εφαρμόζονται για την προσομοίωση κίνησης ενός ατόμου. Δηλαδή σε ένα σύνολο οντοτήτων στο οποίο θα εφαρμοστεί ένα μοντέλο ατομικής κινητότητας, κάθε οντότητα θα κινείται ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες. Αντίθετα τα μοντέλα ομαδικής κινητότητας εφαρμόζονται για την προσομοίωση κίνησης μιας ομάδας οντοτήτων. Στην διπλωματική θα ασχοληθούμε με το μοντέλο Probabilistic Random Walk και το Behavioral Mobility (Individual Behavioral Mobility) για ατομική κινητικότητα και τα Column Mobility και Behavioral Mobility (Behavioral Group Mobility) για ομαδική κινητικότητα. Όσον αφορά στο φυσικό περιβάλλον κίνησης, το μοντέλο Behavioral Mobility μελετάται σε περιβάλλον με εμπόδια και με περιορισμό στον χώρο λόγω ύπαρξης τοίχων είτε για ατομική είτε για ομαδική κινητικότητα.

2.3.1 Ατομική Κινητότητα - Probabilistic Random Walk

Το μοντέλο κίνησης Probabilistic Random Walk χρησιμοποιεί κάποιους πιθανοκρατικούς κανόνες για τον υπολογισμό της θέσης των κινητών κόμβων. Ορίζει τρεις καταστάσεις κίνησης, την τρέχουσα, την προηγούμενη και την επόμενη κατάσταση κίνησης. Ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα με την χρήση ενός πίνακα πιθανοτήτων επιλέγεται η κατάσταση στην οποία μεταβαίνει ο κινητός κόμβος, και έπειτα υπολογίζεται η νέα θέση του. Ουσιαστικά μια γεννήτρια αριθμών χρησιμοποιώντας τις πιθανότητες του συγκεκριμένου πίνακα επιλέγει την κατάσταση στην οποία θα μεταβεί ο αντίστοιχος κόμβος την επόμενη χρονική στιγμή [6][8]. Το μέτρο της ταχύτητας κάθε κόμβου επιλέγεται από την αρχή, ανάλογα με τις συνθήκες κίνησης που πρόκειται να μελετηθούν. Ο Chiang προτείνει έναν πίνακα πιθανοτήτων 3 x 3 διαστάσεων της εξής μορφής:

$$\begin{matrix} p(1,1) & p(1,2) & p(1,3) \\ p(2,1) & p(2,2) & p(2,3) \\ p(3,1) & p(3,2) & p(3,3) \end{matrix}$$

Κάθε στοιχείο του πίνακα αντιπροσωπεύει την πιθανότητα μετάβασης $p(a,b)$ από την κατάσταση a στην κατάσταση b . Στην συνέχεια φαίνεται η αντιστοιχία κάθε κατάστασης με τον αριθμό κατάστασης.

Κατάσταση	Αριθμός κατάστασης.
Προηγούμενη κατάσταση	1
Τρέχουσα κατάσταση	2
Επόμενη κατάσταση	3

Παραδείγματος χάρι η πιθανότητα μετάβασης από την τρέχουσα κατάσταση στην προηγούμενη κατάσταση είναι η πιθανότητα $p(2,1)$. Αντίστοιχα η πιθανότητα μετάβασης από την τρέχουσα κατάσταση στην επόμενη κατάσταση είναι $p(2,3)$. Στην περίπτωση που επιλεγεί η μετάβαση στην τρέχουσα κατάσταση, ο κινητός κόμβος συνεχίζει να κινείται με τα ίδια χαρακτηριστικά, ίδιο μέτρο και κατεύθυνση ταχύτητας. Στην περίπτωση που ο κόμβος μεταβεί στην επόμενη κατάσταση, αρχίζει να κινείται με κατεύθυνση και ταχύτητα με τις οποίες μπορεί να κινούταν παλαιότερα ή κινείται με νέα κατεύθυνση που επιλέγεται τυχαία και μέτρο ταχύτητας που ορίζεται εκ των προτέρων. Τέλος για την μετάβαση στην προηγούμενη κατάσταση χρησιμοποιείται το μέτρο και η κατεύθυνση ταχύτητας τα οποία χρησιμοποίησε ο κόμβος στην προηγούμενη ενημέρωση θέσης.

Παρόλο που το μοντέλο που προτείνει ο Chiang θεωρεί ότι η πιθανότητα μετάβασης από μια a κατάσταση σε μια b κατάσταση είναι διαφορετική από την πιθανότητα μετάβασης από την b κατάσταση στην a , κάποιες πιθανότητες μετάβασης του 3 x 3 πίνακα δεν έχουν κάποια λογική ερμηνεία. Χαρακτηριστικά η πιθανότητα μετάβασης $p(1,1)$, από την

προηγούμενη κατάσταση στην προηγούμενη κατάσταση, δεν έχει κάποιο ιδιαίτερο νόημα, εφόσον κάθε χρονική στιγμή η κατάσταση κίνησης ενός κόμβου θεωρείται ως τρέχουσα κατάσταση. Επομένως η μετάβαση στην προηγούμενη κατάσταση από την προηγούμενη κατάσταση δεν υφίσταται. Για την μελέτη του συγκεκριμένου μοντέλου, υλοποιήθηκε μια παραλλαγή του μοντέλου που περιέγραψε ο Chiang με την εφαρμογή ενός πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης διαστάσεων 1×3 . Όπως θα περιγραφεί και στο επόμενο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται πιθανότητες μετάβασης στην επόμενη, τρέχουσα και προηγούμενη κατάσταση, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το είδος της μετάβασης (π.χ. από την τρέχουσα στην επόμενη ή από την επόμενη στην προηγούμενη), καθώς κάθε χρονική στιγμή, η κατάσταση κάθε κόμβου θεωρείται ως τρέχουσα κατάσταση.

Βέβαια το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι καθαρά πιθανοκρατικό παρά τυχαίο, προσδίδοντας ρεαλισμό στην κίνηση των κόμβων. Παραδείγματος χάρη εάν θεωρηθεί ότι η πιθανότητα μετάβασης στην τρέχουσα κατάσταση έχει την μεγαλύτερη τιμή, η κίνηση προσεγγίζει την πραγματικότητα, εφόσον όταν ένα άτομο κινείται προς έναν προορισμό, διατηρεί μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και παρεκκλίνει πολύ πιο σπάνια από την πορεία του.

2.3.2 Ομαδική Κινητότητα - Column Mobility

Το μοντέλο Column Mobility αποδεικνύεται εξαιρετικά χρήσιμο σε σκοπούς αναζήτησης και σάρωσης. Ουσιαστικά αναπαριστά την κίνηση κόμβων οι οποίοι ανήκουν σε ομάδες παρατεταγμένοι στην σειρά, δημιουργώντας μια ευθεία κινούμενοι προς έναν συγκεκριμένο προορισμό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κίνηση μιας σειράς στρατιωτών κατευθυνόμενοι προς έναν αντίπαλο. Ανάλογα με την εφαρμογή και την υλοποίηση του μοντέλου υπάρχει η δυνατότητα να επιτρέπει σε κάθε οντότητα να ακολουθεί η μία την άλλη, αναπαριστώντας παραδείγματος χάρη μια ομάδα μικρών παιδιών που κινούνται στη σειρά το ένα ακολουθώντας το άλλο για να εισέλθουν και να εξέλθουν από την τάξη.

Όπως περιγράφει ο M.Sanchez, οι κόμβοι τοποθετούνται σε μονή γραμμή και κινούνται γύρω από την αρχική τους θέση. Η διαδικασία ξεκινάει υπολογίζοντας την νέα θέση αναφοράς για κάθε κόμβο [5][6][8].

Μία θέση αναφοράς ορίζεται ως εξής:

$$RP_i^t = P_i^t + rnd$$

Όλα τα σημεία αναφοράς απέχουν από τον αντίστοιχο κόμβο μια συγκεκριμένη απόσταση rnd . Για να μετακινηθούν οι κόμβοι θα πρέπει να μετακινηθεί το αντίστοιχο σημείο αναφοράς τους την τρέχουσα χρονική στιγμή. Η μετατόπιση του σημείου αναφοράς υπολογίζεται ως εξής:

$$RP_i^t = RP_i^{t-1} + a_i^t,$$

όπου RP_i^{t-1} είναι μια στατική μεταβλητή που υποδεικνύει την αρχική θέση αναφοράς της κινητής οντότητας. Το διάνυσμα \vec{a} , είναι ένα τυχαίο διάνυσμα μετατόπισης αναφερόμενο και

ως advance vector, που προστίθεται στις συντεταγμένες του σημείου αναφοράς ώστε να μετατοπιστεί σε νέα θέση. Αφού ενημερωθεί το σημείο αναφοράς, η νέα θέση του κινητού κόμβου i παρεκκλίνει τυχαία από το νέο σημείο αναφοράς του σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_i^t = RP_i^t + w_i^t,$$

όπου w_i^t ένα τυχαίο διάνυσμα.

Το μοντέλο Column Mobility μπορεί να εφαρμοστεί για την αναπαράσταση κίνησης σε δρόμο όπου όλα τα οχήματα κινούνται το ένα πίσω από το άλλο μέσα στην πόλη.

2.4 Behavioral Mobility

Σκοπός του συγκεκριμένου μοντέλου είναι να αναπαραστήσει την κίνηση ενός ατόμου, όπως αυτή επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση με άλλα άτομα αλλά και με το περιβάλλον κίνησης, προσδίδοντας περισσότερο ρεαλισμό. Είναι εμπνευσμένο κυρίως από έρευνες στην βιοφυσική και στην τεχνητή νοημοσύνη όπου οι αλληλεπιδράσεις και η επίγνωση της φύσης των κινητών μέσων, έχουν πολύ μεγάλο αντίκτυπο στην κίνηση. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η κίνηση περιγράφεται μέσα από κανόνες, όπως αυτοί αποτυπώνουν τον τρόπο με τον οποίο αναμένεται ότι αντιδρούν και αλληλεπιδρούν οι κινούμενες οντότητες επηρεασμένες από τα πρόσωπα και την κίνησή τους στον περιβάλλοντα χώρο, αλλά και από την φυσιολογία του χώρου. Η συμπεριφορά ενός ατόμου ως προς την κίνηση επηρεάζεται σαφώς από πολλούς παράγοντες, όπως είναι ο κοινωνικός περίγυρος, η παρορμητικότητα του ή οι αντιδράσεις του σε διάφορα ερεθίσματα [4]. Το συγκεκριμένο μοντέλο μελετά την τελευταία κατηγορία, δίνοντας την δυνατότητα στον κινητό κόμβο που πλησιάζει πολύ κοντά σε εμπόδια, σε άλλον κόμβο ή σε τοίχο και να τα αποφύγει, ενώ ταυτόχρονα κινείται προς έναν συγκεκριμένο προορισμό.

2.4.1 Κανόνες Κίνησης

Για να είναι πιο ξεκάθαρη η περιγραφή των κανόνων κίνησης που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο μοντέλο, εκφράζει τις κινήσεις κάθε κόμβου ως αποτέλεσμα απωστικών και ελκτικών δυνάμεων. Παραδείγματος χάρη στην περίπτωση που ένας κόμβος κινείται προς έναν συγκεκριμένο προορισμό, τότε θεωρείται ότι δέχεται μια ελκτική δύναμη από αυτόν, οπότε και κατευθύνεται προς αυτόν. Αντίστοιχα μπορεί να δεχτεί απωστικές δυνάμεις από άλλους κόμβους ή από τοίχους και εμπόδια ώστε να αποφύγει πιθανή πρόσκρουση. Κάθε δύναμη, ανάλογα με την αιτία που την προκάλεσε δημιουργεί μια επιτάχυνση, η οποία συμβάλει στον υπολογισμό της συνολικής επιτάχυνσης του κινητού κόμβου. Η συνολική επιτάχυνση υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το βάρος κάθε επιτάχυνσης [4]. Δηλαδή στην περίπτωση που έχουμε πρόσκρουση με τοίχο και ταυτόχρονα πρόσκρουση με κάποιον άλλο κινητό κόμβο, μεγαλύτερη βαρύτητα θα δοθεί στην αποφυγή του τοίχου, άρα στην επιτάχυνση άπωσης από τον τοίχο, παρά στην επιτάχυνση άπωσης από τον άλλο κόμβο. Ανάλογα λοιπόν την κάθε περίπτωση, η συνολική επιτάχυνση υπολογίζεται βάσει κάποιων αντιπροσωπευτικών βαρών που λαμβάνουν υπόψη τους κάποιες προτεραιότητες αποφυγής σύγκρουσης.

Κάθε κανόνας ορίζει την κίνηση μιας οντότητας μια δεδομένη χρονική στιγμή, υπολογίζοντας ένα ανεξάρτητο διάνυσμα επιτάχυνσης. Υπάρχει ένας συσσωρευτής ο οποίος συνδυάζει όλα τα διανύσματα επιτάχυνσης, λαμβάνοντας υπόψη τα αντιπροσωπευτικά βάρη του κάθε διανύσματος επιτάχυνσης του κάθε κανόνα και υπολογίζει την συνολική επιτάχυνση. Όπως ήδη αναφέρθηκε το βάρος κάθε διανύσματος επιτάχυνσης καθορίζεται ανάλογα με κάθε περίπτωση [4]. Πρέπει να επισημανθεί ότι η συνολική επιτάχυνση υφίσταται κάποιους λογικούς περιορισμούς. Παραδείγματος χάρη η τιμή της δεν μπορεί να είναι άπειρη, αλλά μπορεί να φτάσει μια μέγιστη τιμή. Η διαδικασία υπολογισμού της επιτάχυνσης ονομάζεται αίτηση επιτάχυνσης. Μετά τον υπολογισμό της αίτησης επιτάχυνσης μια μηχανή κινητότητας ενημερώνει την ταχύτητα της οντότητας σύμφωνα με τον εξής τύπο:

$$\vec{u}_{t+\Delta t} = \vec{u}_t + \vec{a}\Delta t$$

Στην συνέχεια παρατίθενται κάποιοι βασικοί κανόνες τους οποίους ορίζει το μοντέλο ώστε να διαμορφωθεί η κίνηση των κόμβων στον χώρο.

1^{ος} κανόνας: «Κατεύθυνση προς έναν προορισμό»

Ο κινητός κόμβος ακολουθεί ένα μονοπάτι προς τον προορισμό του. Η επιτάχυνσή του ορίζεται από τον εξής τύπο:

$$\vec{a} = \beta \left[v_0 \left(\frac{\overrightarrow{destination_i} - \overrightarrow{currentposition_i}}{|\overrightarrow{destination_i} - \overrightarrow{currentposition_i}|} \right) - v_i(t) \right]$$

Ο τύπος υπολογίζει το διάνυσμα της επιτάχυνσης του κινητού κόμβου, υπολογίζοντας το μέτρο και την κατεύθυνσή του. Το β είναι η κανονικοποίηση της βαθμωτής διάστασης $\frac{1}{s}$. Εφόσον έχει υπολογιστεί η επιτάχυνση του κινητού προσδιορίζεται και η θέση του στον «χώρο» της προσομοίωσης.

2^{ος} κανόνας: «Αποφυγή τοίχων»

Οι πεζοί δεν προσκρούουν σε τοίχους. Για την αποφυγή της πρόσκρουσης ορίζεται μια απόσταση ασφαλείας από τον τοίχο. Έτσι ασκείται μια απωστική δύναμη στον κόμβο ώστε η ελάχιστη απόσταση από τοίχο να είναι η επιθυμητή. Η δύναμη αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ του κόμβου και του τοίχου. Ο τύπος που ορίζει την επιτάχυνση σ' αυτή τη περίπτωση είναι ο εξής:

$$\vec{a} = \gamma (\overrightarrow{currentposition_i} - \overrightarrow{wallposition_i}),$$

όπου $\overrightarrow{wallposition_i}$ είναι η θέση του κοντινότερου σημείου του τοίχου από τον κινητό κόμβο και γ είναι η κανονικοποίηση της βαθμωτής διάστασης $\frac{1}{s^2}$.

3^{ος} κανόνας: «Αποφυγή εμποδίων»

Τα εμπόδια ορίζονται στον χώρο της προσομοίωσης ως κυκλικοί δίσκοι ή γεωμετρικά πολύγωνα. Στην περίπτωση πολυγώνου υπάρχει μια γωνία του, από την οποία ο κινητός κόμβος πρέπει να παρεκκλίνει. Η επιτάχυνση στην περίπτωση αυτή ορίζεται έτσι ώστε ο κινητός κόμβος να κινείται γύρω από το εμπόδιο με την ελάχιστη επιθυμητή παρέκκλιση.

4^{ος} κανόνας: «Αμοιβαία αποφυγή κόμβων»

Οι κόμβοι αποφεύγουν να συγκρουστούν: αυτό επιτυγχάνεται είτε συνεχίζοντας στην ίδια πορεία είτε συνεχίζοντας με αντίθετη διεύθυνση. Δηλαδή οι κόμβοι μεταξύ τους ασκούν απωστικές δυνάμεις.

$$\alpha = \sum_{j \in T_i} \gamma(pdv(x, t))$$

Η α είναι συνάρτηση που επιστρέφει ένα κάθετο διάνυσμα στην ταχύτητα του κόμβου i ώστε αυτός να παραμερίσει τον κινητό κόμβο j ο οποίος βρίσκεται στην κυκλική περιοχή T_i γύρω από τον i .

Οι κανόνες αυτοί ισχύουν στην περίπτωση ατομικής κινητότητας. Οι ίδιοι κανόνες μπορούν να εφαρμοστούν για ομαδική κινητότητα με μικρές τροποποιήσεις :

1^{ος} κανόνας: «Αμοιβαία αποφυγή κόμβων»

Όμοιος κανόνας με τον 4^ο κανόνα.

2^{ος} κανόνας: «Κοινή ταχύτητα»

Οι κόμβοι που ανήκουν στην ίδια ομάδα θα πρέπει να έχουν την ίδια ταχύτητα.

$$\vec{\alpha} = \beta \left(\frac{1}{|N_g|} \sum_{x \in G} \vec{v}_x(t) \right) - \vec{v}_i(t),$$

όπου N_g είναι οι ορατές οντότητες που ανήκουν στην ομάδα G .

3^{ος} κανόνας: «Κοινός προορισμός»

Εφόσον όλοι οι κόμβοι ανήκουν σε μία ομάδα, θα πρέπει να προσεγγίζουν ο ένας τον άλλον έχοντας κοινό προορισμό.

$$\vec{\alpha} = \gamma \left(\frac{1}{|N_g|} \sum_{x \in G} \overline{pos}_x(t) \right) - \overline{pos}_i(t),$$

όπου $\overline{pos}_x(t)$ η θέση ενός κοντινού κόμβου στον i και $\overline{pos}_i(t)$ η θέση του i .

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πρώτος κανόνας εφαρμόζει ουσιαστικά μια απωστική δύναμη ενώ οι δύο τελευταίοι ελκτικές δυνάμεις.

Τα μοντέλα που περιγράφηκαν μαζί με τον αλγόριθμο αντιδραστικής δρομολόγησης Ad hoc On-demand Distance Vector υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον Matlab με κάποιες μικρές παραλλαγές για την διευκόλυνση της υλοποίησης του προσομοιωτή, χωρίς αυτό φυσικά να αλλοιώνει την ορθότητα και την αποτελεσματικότητα των μοντέλων κίνησης.

Κεφάλαιο 3^ο – Υλοποίηση

Η υλοποίηση όλων των μοντέλων κίνησης και του αλγορίθμου δρομολόγησης AODV πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab με event- driven programming. Με την χρήση γεγονότων στον προγραμματισμό επιτυγχάνεται η διάκριση μεταξύ των λειτουργιών του προσομοιωτή, ώστε να εκτελούνται ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Βασικές λειτουργίες του συγκεκριμένου προσομοιωτή είναι η δρομολόγηση και η ενημέρωση θέσης κάθε κόμβου. Ανάλογα με το μοντέλο κίνησης που χρησιμοποιείται επιλέγεται και διαφορετικό γεγονός για την ενημέρωση θέσης. Στο κεφάλαιο αυτό επεξηγούνται αναλυτικά οι δομές δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, η διάκριση των λειτουργιών σε διαφορετικά γεγονότα και οι λειτουργίες αυτών.

3.1 Δομές Δεδομένων

Η βασική δομή δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του προσομοιωτή είναι η δομή πίνακα. Κάποιοι από τους κυριότερους πίνακες με τις λειτουργίες τους παρατίθενται στην συνέχεια:

Event_List: Η λίστα των γεγονότων έχει τη δομή πίνακα. Ο πίνακας αυτός δημιουργείται στην αρχή της προσομοίωσης. Το αρχικό του μέγεθος είναι 3 x 2. Κάθε στήλη αντιπροσωπεύει ένα γεγονός. Οι γραμμές του πίνακα αντιπροσωπεύουν τα εξής στοιχεία:

- Event id: Είναι το αναγνωριστικό κάθε γεγονότος. Ανάλογα με το id εκτελείται και διαφορετικό event.
- Event time: Είναι η χρονική στιγμή στην οποία θα ξεκινήσει το event να εκτελείται.
- Event node: Είναι ο κόμβος στον οποίο θα εκτελεστεί το συγκεκριμένο event.

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με την εκτέλεση των γεγονότων δημιουργούνται συνεχώς γεγονότα, τα οποία προγραμματίζονται να εκτελεστούν σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Έτσι το μέγεθος του πίνακα μεταβάλλεται συνεχώς, ανάλογα κάθε φορά με το πλήθος των γεγονότων που είναι προς εκτέλεση.

Nodes_position: Η θέση όλων των κόμβων αποτελείται από τις συντεταγμένες x και y . Ο συγκεκριμένος πίνακας είναι μεγέθους $2 \times n$, όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων. Ο αριθμός της στήλης αντιστοιχεί στο id του κόμβου και κάθε γραμμή αντιπροσωπεύει μια συντεταγμένη. Πιο συγκεκριμένα η συντεταγμένες του x είναι στην πρώτη γραμμή και αντίστοιχα οι συντεταγμένες του y στην δεύτερη. Έτσι παραδείγματος χάρι οι συντεταγμένες του κόμβου με id 6 είναι τα στοιχεία του πίνακα στην 6^η στήλη, με συντεταγμένη x το στοιχείο `nodes_position(1,6)` και συντεταγμένη y το στοιχείο `nodes_position(2,6)` αντίστοιχα. Κατά την ενημέρωση θέσης κάθε στοιχείο του πίνακα απλά ενημερώνεται χωρίς να επηρεάζεται το μέγεθός του πίνακα.

Route_table_of_node_id: Κάθε κόμβος διατηρεί τον δικό του πίνακα δρομολόγησης. Ο πίνακας αυτός έχει αρχικό μέγεθος 1 x 5. Κάθε γραμμή αντιπροσωπεύει ένα γνωστό δρομολόγιο. Οι στήλες αντιπροσωπεύουν τα ακόλουθα στοιχεία δρομολογίου:

Αναγνωριστικό προορισμού	Επόμενο άλμα από τον τρέχον κόμβο προς τον προορισμό	Αριθμός αλμάτων	Destination sequence number	Διάρκεια ζωής της εγγραφής
--------------------------	--	-----------------	-----------------------------	----------------------------

Κάθε κόμβος στην αρχή της προσομοίωσης δεν γνωρίζει κανένα δρομολόγιο προς τον προορισμό. Ο πίνακας δρομολόγησης στην περίπτωση αυτή περιέχει μια εγγραφή της εξής μορφής.

Αναγνωριστικό του ίδιου του κόμβου	0	0	0	0
------------------------------------	---	---	---	---

Η συγκεκριμένη εγγραφή δεν διαγράφεται, αλλά παραμένει στον πίνακα δρομολόγησης καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το γεγονός ότι όλα τα στοιχεία του πίνακα, εκτός του αναγνωριστικού είναι μηδενικά, οφείλεται σε προγραμματιστικούς λόγους.

D: Ο πίνακας αυτός είναι μεγέθους $n \times n$ και καταγράφει την απόσταση μεταξύ όλων των κόμβων. Βάσει αυτού του πίνακα προκύπτουν οι πίνακες γειτόνων για κάθε κόμβο.

Neighbors_of_node: Στον πίνακα αυτό καταγράφονται όλοι οι γείτονες κάθε κόμβου. Αποτελείται από 2 στήλες και μεταβλητό πλήθος γραμμών, όσοι είναι και οι γείτονες μετά από κάθε ενημέρωση θέσης του αντίστοιχου κόμβου.

Q_node: Στον πίνακα αυτό καταγράφονται τα πακέτα δεδομένων που φτάνουν στον αντίστοιχο κόμβο. Η καταγραφή τους γίνεται κυρίως για προγραμματιστικούς λόγους για την καταγραφή του χρόνου άφιξης κάθε πακέτου. Αποτελείται από 2 γραμμές, το αναγνωριστικό του πακέτου και την χρονική στιγμή άφιξης και μεταβλητό πλήθος στηλών, ανάλογα με τον αριθμό των πακέτων που βρίσκονται στον αντίστοιχο κόμβο. Κατά την άφιξη ενός πακέτου σε έναν κόμβο προστίθεται μια στήλη και κατά την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων αφαιρείται η αντίστοιχη στήλη. Λειτουργεί με ουρά FIFO. Όποιο πακέτο δεδομένων φτάσει πρώτο φεύγει και πρώτο.

Dobst1: Ο πίνακας αυτός καταγράφει την απόσταση ενός κόμβου από όλα τα εμπόδια που βρίσκονται στον χώρο προσομοίωσης. Οι διαστάσεις του είναι $obstcl \times 1$, όπου $obstcl$ είναι το πλήθος των εμποδίων που υπάρχουν στον χώρο προσομοίωσης.

Dw: Ο συγκεκριμένος πίνακας περιέχει την απόσταση ενός κόμβου από τους τοίχους στον χώρο προσομοίωσης. Υπολογίζεται για κάθε κόμβο κατά την διαδικασία ενημέρωσης θέσης.

3.2 Περιγραφή υλοποίησης

Στην αρχή της προσομοίωσης ο χρήστης ορίζει το πλήθος των κόμβων που θα τοποθετηθούν στον χώρο, τις διαστάσεις του χώρου που επιθυμεί και την διάρκεια της προσομοίωσης. Στην συνέχεια ανάλογα με το μοντέλο κίνησης που θα επιλέξει να προσομοιώσει, εάν πρόκειται για ομαδική κινητικότητα θα πρέπει να επιλέξει πλήθος ομάδων κίνησης, ενώ αν επιλέξει κάποια από τις δύο περιπτώσεις του behavioral mobility, είτε ομαδικής είτε ατομικής κίνησης, θα πρέπει να επιλέξει εάν θέλει να προσομοιώσει κίνηση σε χώρο με εμπόδια και με περιορισμό χώρου ή όχι. Σε κάθε προσομοίωση επιλέγεται τυχαία ένα ζευγάρι αποστολέα-παραλήπτη. Το ζευγάρι αυτό παραμένει ίδιο μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

3.2.1 Τοποθέτηση κόμβων

Οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία σε χώρο διαστάσεων που ορίζει ο χρήστης στην αρχή της προσομοίωσης με τυχαία ομοιόμορφη κατανομή. Κανένας κόμβος δεν μπορεί να συμπέσει με κάποιον άλλον, διότι κάθε θέση καταλαμβάνεται μόνο από έναν κόμβο.

3.2.2 Event List και Events

Η Event List όπως ήδη αναφέρθηκε είναι ένας πίνακας ,ο οποίος αποτελείται από γεγονότα τα οποία πρόκειται να εκτελεστούν. Κάθε γεγονός αποτελεί μια στήλη της λίστας γεγονότων. Η μορφή του είναι η ακόλουθη:

Event id
Event time
Event node

Κάθε φορά εκτελείται το event που βρίσκεται στην πρώτη στήλη και ανάλογα με τις λειτουργίες που έχει, πυροδοτεί την δημιουργία γεγονότων τα οποία τοποθετούνται στην λίστα και περιμένουν να εκτελεστούν την χρονική στιγμή που υποδεικνύει η παράμετρος event time. Κάθε φορά ορίζονται από τα στοιχεία της πρώτης στήλης της λίστας γεγονότων, ως τρέχον event το event με το συγκεκριμένο event id, ως τρέχον χρόνος ο event time και τρέχον κόμβος ο event node. Με την ολοκλήρωση της εκτέλεσης ενός event, αυτό διαγράφεται από την λίστα γεγονότων και γίνεται ταξινόμηση των γεγονότων βάσει του event time. Έτσι τηρείται μια χρονική συνέχεια ενώ παράλληλα κάθε λειτουργία ενός event παραμένει διακριτή και ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες λειτουργίες.

Τα events που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη προσομοίωση διακρίνονται βάσει των λειτουργιών που προσφέρουν, είτε σε event δρομολόγησης είτε σε event ενημέρωσης θέσης.

3.2.3 Event Δρομολόγησης: Αλγόριθμος Ad hoc On-demand Distance Vector

Event 1: «Δημιουργία πακέτων δεδομένων»

Στο event αυτό πραγματοποιείται η δημιουργία πακέτων δεδομένων στον αποστολέα. Δημιουργείται Event 1 με event node την πηγή και event time τον τρέχον χρόνο συν τον interarrival time. Ο interarrival time είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από την δημιουργία ενός πακέτου δεδομένων στην πηγή μέχρι την δημιουργία του επόμενου, και υπολογίζεται από μια εκθετική κατανομή με μέση τιμή, παράμετρο που ορίζει ο χρήστης. Η τιμή που παίρνει στις περισσότερες προσομοιώσεις της συγκεκριμένης μελέτης είναι 1 sec. Τα πακέτα που δημιουργούνται αποθηκεύονται στην μνήμη του αποστολέα μέχρι να ολοκληρωθεί η ανακάλυψη δρομολογίου και να μπορέσουν να σταλούν στον παραλήπτη. Όλα τα πακέτα θεωρήθηκε ότι είναι ίδιου μεγέθους, 1518 bytes. Το event αυτό πυροδοτεί την έναρξη της ανακάλυψης δρομολογίου δημιουργώντας Event 2 με event node τον τρέχον κόμβο του event 1, δηλαδή την πηγή και με event time, τον τρέχον χρόνο συν τον interarrival time. Επομένως την χρονική στιγμή που έφτασε το πακέτο δεδομένων, ξεκινάει και η αναζήτηση δρομολογίου προς τον προορισμό.

Event 2: «Αποστολή μηνυμάτων αίτησης δρομολογίου, RREQ»

Το συγκεκριμένο event ενεργοποιεί την αναζήτηση δρομολογίου. Ο τρέχον κόμβος ελέγχει εάν υπάρχει στον πίνακα δρομολόγησής του κάποια έγκυρη εγγραφή προς τον προορισμό. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει, στέλνει μήνυμα αίτησης δρομολογίου σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους. Αυτοί με τη σειρά τους λαμβάνοντας το μήνυμα αίτησης δρομολογίου δημιουργούν μια εγγραφή αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή στον πίνακα δρομολόγησής τους. Η αντίστροφη εγγραφή έχει την εξής μορφή:

Αναγνωριστικό πηγής	Επόμενο άλμα από τον τρέχον κόμβο προς την πηγή	Αριθμός αλμάτων	Source sequence number	Διάρκεια ζωής της εγγραφής
---------------------	---	-----------------	------------------------	----------------------------

Ως επόμενο άλμα ορίζεται ο τρέχον κόμβος, ο οποίος απέστειλε το μήνυμα αίτησης δρομολογίου RREQ στον γείτονα κόμβο. Δηλαδή για τους γειτονικούς κόμβους της πηγής, ο κόμβος - επόμενο άλμα προς την πηγή είναι η ίδια η πηγή. Ο αριθμός αλμάτων του γειτονικού κόμβου από την πηγή υπολογίζεται από τον αριθμό αλμάτων του τρέχοντος κόμβου αυξημένο κατά ένα. Η διάρκεια ζωής κάθε εγγραφής στους πίνακες δρομολόγησης καθορίζεται από το μέγεθος του γραφήματος συνδεσιμότητας του δικτύου. Το γράφημα συνδεσιμότητας δημιουργείται από τους πίνακες γειτνίασης όλων των κόμβων και απεικονίζει ποιοι κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Κάθε εγγραφή σε οποιοδήποτε πίνακα δρομολόγησης έχει διάρκεια ζωής πολλαπλάσια του πλήθους των συνδεδεμένων κόμβων στο γράφημα συνδεσιμότητας, ώστε να μπορούν να επικοινωνήσουν

ακόμα και οι πιο απομακρυσμένοι κόμβοι. Βέβαια εξαιτίας της κίνησης των κόμβων, οι πίνακες γειτνίασης μεταβάλλονται συχνά, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και το γράφημα συνδεσιμότητας του δικτύου, άρα και ο χρόνος ζωής κάθε εγγραφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε κάθε εκτέλεση ενός event η τιμή του χρόνου ζωής σε όλους τους πίνακες δρομολόγησης μειώνεται κατά 1, μέχρι τη στιγμή που θα πάρει μηδενική τιμή. Τότε διαγράφεται ολόκληρη η εγγραφή του συγκεκριμένου δρομολογίου από τον πίνακα δρομολόγησης.

Στην συνέχεια το event δημιουργεί νέα Event 2, ένα για κάθε γείτονα κόμβο, στα οποία θέτει ως event time τον τρέχον χρόνο συν τον χρόνο που κάνει να φτάσει το μήνυμα αίτησης δρομολογίου στον εκάστοτε γειτονικό κόμβο. Δηλαδή θεωρώντας ότι το μέγεθος του μηνύματος είναι 1518 bytes και η ταχύτητα μετάδοσης είναι 1 Mbps με αμελητέο χρόνο διάδοσης του σήματος, υπολογίζεται ότι ο χρόνος μετάδοσης του μηνύματος είναι 0.001447 sec. Επομένως τα νέα event είναι της μορφής:

Event 2
Current time + 0.001447 sec
Neighbors node id

Για να αποφευχθεί η λήψη πολλαπλών μηνυμάτων αίτησης διαδρομής, καθώς πολλοί κόμβοι έχουν κοινούς γείτονες, κάθε κόμβος διαθέτει μια σημαία η οποία είναι μηδέν στην περίπτωση που δεν έχει λάβει ο κόμβος RREQ και γίνεται 1 στην περίπτωση που λάβει. Όταν ένας κόμβος έχει σημαία 1 απορρίπτει τα υπόλοιπα RREQ γιατί έχει ήδη λάβει το συγκεκριμένο μήνυμα αίτησης από προηγούμενο κόμβο. Φυσικά σε κάθε έναρξη διαδικασίας αναζήτησης διαδρομής όλες οι σημαίες όλων των κόμβων μηδενίζονται, ώστε να ενημερωθούν οι εγγραφές του πίνακα δρομολόγησης. Όσον αφορά τον αριθμό ακολουθίας της πηγής αυξάνεται κατά ένα κάθε φορά που ξεκινάει μια καινούργια αναζήτηση διαδρομής. Στην περίπτωση που υπάρχει ήδη εγγραφή αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή, η εγγραφή ενημερώνεται μόνο στην περίπτωση που το μήνυμα περιέχει μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας πηγής ή ίσο με μικρότερο πλήθος αλμάτων.

Από την άλλη πλευρά στην περίπτωση που υπάρχει έγκυρη διαδρομή προς τον προορισμό στον πίνακα δρομολόγησης του τρέχοντος κόμβου ή ο τρέχον κόμβος είναι ο προορισμός, τότε δημιουργείται Event 3 με event time τον τρέχον χρόνο + 0.01447sec και event node τον τρέχον κόμβο.

Event 3: «Αποστολή μηνυμάτων απάντησης διαδρομής, RREP»

Το γεγονός αυτό πυροδοτεί την αποστολή μηνυμάτων απάντησης δρομολογίου RREP. Ο τρέχον κόμβος ελέγχει εάν γνωρίζει κάποια έγκυρη εγγραφή προς τον προορισμό. Στην περίπτωση αυτή ελέγχει εάν υπάρχει κάποια εγγραφή αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή. Εάν υπάρχει τότε, απαντά με μήνυμα απάντησης διαδρομής στον κόμβο που του υποδεικνύει το πεδίο επόμενο άλμα στην εγγραφή αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή. Ο αντίστοιχος κόμβος που θα λάβει το μήνυμα απάντησης θα δημιουργήσει την ακόλουθη

εγγραφή δρομολογίου προς τον προορισμό, σύμφωνα με το μήνυμα απάντησης που έλαβε. Εάν έχει ήδη κάποια εγγραφή δρομολογίου προς τον προορισμό τότε αυτή ενημερώνεται μόνο στην περίπτωση που ο αριθμός ακολουθίας του προορισμού είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό ακολουθίας της εγγραφής ή εάν είναι ίσος και ο αριθμός των αλμάτων είναι μικρότερος.

Αναγνωριστικό προορισμού	Τρέχον κόμβος (αποτελεί επόμενο άλμα προς τον προορισμό)	Αριθμός αλμάτων	Destination sequence number	Διάρκεια ζωής της εγγραφής
--------------------------	--	-----------------	-----------------------------	----------------------------

Στην συνέχεια δημιουργείται Event 3 στο οποίο event node θεωρείται ο κόμβος που παρέλαβε το RREP και event time θεωρείται ο τρέχον χρόνος συν 0.001447 sec.

Εάν ο κόμβος που λάβει ένα RREQ γνωρίζει κάποιο έγκυρο δρομολόγιο προς τον προορισμό, αλλά δεν γνωρίζει κάποια έγκυρη διαδρομή προς την πηγή, δημιουργεί Event 2 ώστε να επαναληφθεί η διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής και να δημιουργηθούν εγγραφές αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή. Τα μηνύματα απάντησης διαδρομής ακολουθούν πάντα ένα μοναδικό μονοπάτι εγκαθιδρύοντας την διαδρομή προς τον προορισμό. Όταν το μήνυμα απάντησης φτάσει στην πηγή, δημιουργείται Event 4 με event time τον τρέχον χρόνο συν 0.001447 sec και με event node την πηγή.

Event 4: «Αποστολή πακέτων δεδομένων»

Στο event αυτό γίνεται η αποστολή των πακέτων δεδομένων. Η μνήμη των κόμβων λειτουργεί με ουρά FIFO, αποστέλλοντας πρώτο το πακέτο που δημιουργήθηκε και πρώτο. Ο αποστολέας προωθεί τα πακέτα δεδομένων που υπάρχουν στην μνήμη του στον επόμενο κόμβο προς τον προορισμό, τον οποίο του υποδεικνύει η εγγραφή του πίνακα δρομολόγησής του με το μεγαλύτερο destination sequence number. Στην συνέχεια δημιουργεί νέο Event 4 στο οποίο θέτει ως event node τον κόμβο που αποτελεί επόμενο άλμα προς τον προορισμό και event time τον τρέχον χρόνο συν 0.002894 ($2 * 0.01147$), τον χρόνο που κάνει να μεταδοθεί το πακέτο στον αποστολέα και στον ενδιάμεσο παραλήπτη. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος που λαμβάνει τα πακέτα δεδομένων και πρόκειται να τα προωθήσει προς τον τελικό παραλήπτη, τα αποθηκεύει στην μνήμη του. Στην συνέχεια και αυτός με τη σειρά του δημιουργεί Event 4 με event node τον κόμβο που αποτελεί επόμενο άλμα προς τον προορισμό και event time τον τρέχον χρόνο συν 0.002894 sec. Η συγκεκριμένη διαδικασία θα συνεχιστεί μέχρι τα δεδομένα να φτάσουν στον τελικό παραλήπτη.

Στην περίπτωση που ένας κόμβος παραλάβει ένα μήνυμα δεδομένων αλλά δεν γνωρίζει κάποια διαδρομή προς τον τελικό παραλήπτη τότε έχουμε την πυροδότηση μηνυμάτων σφάλματος. Ο κόμβος στην περίπτωση αυτή ελέγχει εάν υπάρχει εγγραφή αντίστροφης διαδρομής προς την πηγή. Στην περίπτωση που υπάρχει, τότε δημιουργεί Event 5 στο οποίο θέτει ως event time τον τρέχον χρόνο συν 0.001447 sec και event node τον κόμβο που υποδεικνύει η εγγραφή αντίστροφης διαδρομής ως επόμενο άλμα προς την πηγή. Στην

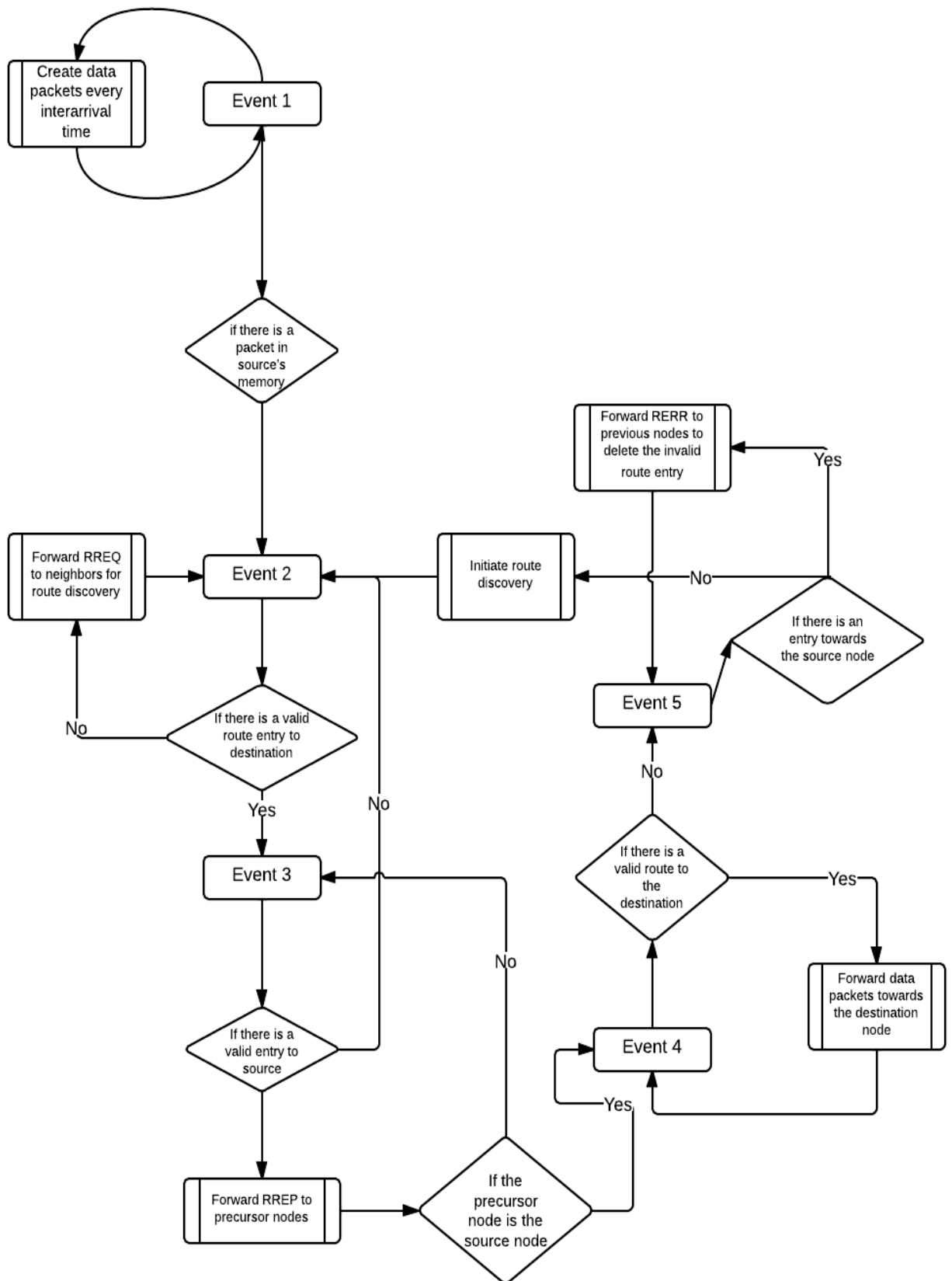
αντίθετη περίπτωση δημιουργεί Event 5 με event node τον εαυτό του και event time τον τρέχον χρόνο συν 0.001447 sec.

Event 5: «Αποστολή μηνυμάτων σφάλματος, RERR»

Στο συγκεκριμένο event γίνεται η αποστολή μηνυμάτων σφάλματος αλλά και η επιδιόρθωση των πινάκων δρομολόγησης στους κόμβους που έχει εμφανιστεί σφάλμα. Διακρίνονται τέσσερις βασικές περιπτώσεις:

1. Εάν υπάρχει δρομολόγιο προς τον προορισμό στον πίνακα δρομολόγησης του τρέχοντος κόμβου.
2. Εάν υπάρχει αντίστροφο δρομολόγιο προς την πηγή στον πίνακα δρομολόγησης του τρέχοντος κόμβου
3. Εάν υπάρχει δρομολόγιο προς τον προορισμό και προς την πηγή.
4. Εάν δεν υπάρχουν εγγραφές δρομολογίου ούτε για τον προορισμό ούτε για την πηγή.

Στην πρώτη περίπτωση που υπάρχει μόνο εγγραφή προς τον προορισμό στον πίνακα δρομολόγησης του τρέχοντος κόμβου, η εγγραφή αυτή διαγράφεται και δημιουργείται Event 2 με event node την πηγή και event time τον τρέχον χρόνο συν 0.001447 sec. Έτσι δίνεται η δυνατότητα επιδιόρθωσης και ενημέρωσης των πινάκων δρομολόγησης όλων των κόμβων του δικτύου. Στην δεύτερη περίπτωση που υπάρχει μόνο αντίστροφο δρομολόγιο προς την πηγή, δημιουργείται Event 5 με event node τον κόμβο που υποδεικνύει ως επόμενο άλμα προς την πηγή και event time τον τρέχον χρόνο συν 0.001447 sec. Έτσι ο κόμβος ο οποίος προώθησε εσφαλμένα τα δεδομένα στον τρέχον κόμβο θα διαγράψει την αντίστοιχη εγγραφή του πίνακα δρομολόγησης του με αποτέλεσμα να επιδιορθωθεί το σφάλμα. Στην τρίτη περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμα και τα δυο δρομολόγια, είτε προς τον προορισμό είτε προς την πηγή, το αντίστοιχο δρομολόγιο προς τον προορισμό διαγράφεται και ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση δημιουργείται Event 5 για τον προηγούμενο από τον τρέχον κόμβο. Τέλος εάν δεν υπάρχει διαθέσιμο έγκυρο δρομολόγιο ούτε προς τον προορισμό ούτε προς την πηγή, ενεργοποιείται ο μηχανισμός επιδιόρθωσης του δικτύου, δημιουργώντας Event 2 για νέα ανακάλυψη δρομολογίου με event node την πηγή και event time τον τρέχον χρόνο συν έναν χρόνο ασφαλείας ο οποίος καθορίζεται από το πλήθος των συνδεδεμένων κόμβων στο γράφημα συνδεσιμότητας του δικτύου. Στην συνέχεια η Εικόνα 4 απεικονίζει την ροή των event δρομολόγησης στο πρόγραμμα.



Εικόνα 4- Απεικόνιση της ροής των γεγονότων στον προσομοιωτή.

3.2.4 Event Ενημέρωσης Θέσης

Ανάλογα με την επιλογή μοντέλου κίνησης, επιλέγεται και διαφορετικό event ενημέρωσης θέσης. Η ενημέρωση θέσης γίνεται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Στον συγκεκριμένο προσομοιωτή έχει επιλεγεί να γίνεται κάθε 0.1447 sec, 100 φορές πολλαπλάσιο του χρόνου μετάδοσης ενός μηνύματος ελέγχου ή ενός πακέτου δεδομένων.

Event 6: «Ενημέρωση θέσης με χρήση του μοντέλου Probabilistic Random Walk»

Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, το μοντέλο Probabilistic Random Walk χρησιμοποιεί έναν πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης κατάστασης κίνησης για την ενημέρωση της θέσης των κόμβων. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση χρησιμοποιείται επιπρόσθετα ένας πίνακας κατευθύνσεων ο οποίος αποθηκεύει τις κατευθύνσεις στις οποίες μεταβαίνει ένας κόμβος. Επιπλέον ορίζεται ένας δείκτης που υποδεικνύει την τρέχουσα κατεύθυνση του εκάστοτε κόμβου κάθε χρονικό διάστημα ενημέρωσης θέσης. Στην περίπτωση που ένας κόμβος μεταβεί στην προηγούμενη κατάσταση ο δείκτης μεταβαίνει μια θέση πίσω στον πίνακα, αντίστοιχα στην περίπτωση που παραμένει στην τρέχουσα κατάσταση δεν μεταβάλλεται, ενώ στην περίπτωση που μεταβεί σε επόμενη κατάσταση μεταβαίνει μια θέση μπροστά στον πίνακα. Για την επιλογή μετάβασης σε μια κατάσταση χρησιμοποιείται μια γεννήτρια αριθμών η οποία επιλέγει κάθε φορά κατάσταση ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης κάθε κατάστασης. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση θεωρήθηκε σκόπιμο και πιο ορθό να χρησιμοποιηθεί ένας πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης κατάστασης διαστάσεων 1 x 3 αντί για 3 x 3, της παρακάτω μορφής:

$$[p(1) \quad p(2) \quad p(3)]$$

Ο βασικότερος λόγος είναι ότι κάποια στοιχεία του 3 x 3 πίνακα δεν είχαν κάποια λογική βάση. Όπως παραδείγματος χάρη το στοιχείο 1,1 που είναι η μετάβαση από την προηγούμενη κατάσταση στην προηγούμενη κατάσταση. Κάθε χρονικό διάστημα t η κατάσταση που βρίσκεται ο κόμβος θεωρείται τρέχουσα κατάσταση. Οπότε εάν μεταβεί στον χρόνο $t+1$ στην προηγούμενη κατάσταση, αυτή θα θεωρηθεί στον χρόνο $t+2$ τρέχουσα κατάσταση του κόμβου, οπότε η μετάβαση ξανά στην προηγούμενη κατάσταση, είναι ουσιαστικά το ίδιο με την μετάβαση από την τρέχουσα στην προηγούμενη κατάσταση που είναι το στοιχείο $p(2)$ του νέου πίνακα. Το ίδιο ισχύει για το στοιχείο 3,3 του 3x3 πίνακα που προτείνει ο Chiang.

Επειδή με την έναρξη της προσομοίωσης, οι κόμβοι είναι ακίνητοι, ο πίνακας κατεύθυνσης είναι κενός. Οπότε αναγκαστικά επιλέγεται η μετάβαση στην επόμενη κατάσταση, όπου επιλέγεται ταχύτητα με μέτρο, αυτό που έχει οριστεί πριν την έναρξη της προσομοίωσης και κατεύθυνση που επιλέγεται από τυχαία ομοιόμορφη κατανομή. Η κατεύθυνση καταγράφεται στον πίνακα κατεύθυνσης και ο δείκτης παίρνει την τιμή 1. Στην συνέχεια εφόσον ο πίνακας έχει μόνο ένα στοιχείο, μπορεί είτε να παραμείνει στην τρέχουσα κατάσταση είτε να μεταβεί σε επόμενη. Η επιλογή κατάστασης γίνεται από την γεννήτρια που χρησιμοποιεί τον πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης κατάστασης. Κάθε νέα κατεύθυνση ενός κόμβου προστίθεται στον πίνακα κατεύθυνσής του, μεταβάλλοντας την θέση του δείκτη. Εφόσον επιλεγεί λοιπόν κατεύθυνση και μέτρο ταχύτητας, γίνεται διαχωρισμός της ταχύτητας σε δύο συνιστώσες χ και ψ αντίστοιχα. Οπότε υπολογίζεται η μετατόπιση των

κόμβων σ' αυτό το χρονικό διάστημα στον x και y άξονα και ενημερώνονται οι συντεταγμένες των κόμβων στον πίνακα θέσεων.

Ζωτικής σημασίας είναι να ενημερωθεί ο πίνακας γειτόνων κάθε κόμβου. Γι' αυτόν τον λόγο υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ όλων των κόμβων στο δίκτυο και αποθηκεύεται σε έναν $n \times n$ πίνακα, όπου n το πλήθος των κόμβων στον χώρο. Γειτονικοί θεωρούνται οι κόμβοι των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρότερη ή ίση της εμβέλειας σήματος του κάθε κόμβου. Οπότε για κάθε κόμβο δημιουργείται ένας πίνακας γειτόνων που περιλαμβάνει όλους τους κόμβους που πληρούν αυτές τις προϋποθέσεις. Θεωρήθηκε ότι το κανάλι επικοινωνίας ήταν αξιόπιστο οπότε δεν χρησιμοποιήθηκαν μηνύματα χαιρετισμού για την εύρεση των γειτονικών κόμβων. Τέλος πριν την ολοκλήρωση του event, προστίθεται στην λίστα γεγονότων ένα Event 6 για event time τον τρέχον χρόνο συν το χρονικό διάστημα στο οποίο έχει οριστεί ότι θα γίνεται η ενημέρωση θέσης. Φυσικά το event εκτελείται για όλους τους κόμβους του δικτύου.

Event 7: «Ενημέρωση θέσης με την χρήση του μοντέλου Behavioral Mobility για ατομική κινητικότητα. Individual Behavioral Mobility»

Το γεγονός αυτό ενεργοποιείται κατά την επιλογή του μοντέλου κίνησης individual behavioral mobility. Το συγκεκριμένο μοντέλο όπως έχει ήδη αναφερθεί υποστηρίζει την κίνηση σε χώρο με εμπόδια και τοίχους. Έτσι στην αρχή της προσομοίωσης μπορεί να επιλεγεί εάν ο χώρος θα έχει εμπόδια, το πλήθος τους και αν θα υπάρχει περιορισμός του χώρου από τοίχους ή τίποτε από τα δύο. Ανάλογα με το περιβάλλον κίνησης επηρεάζονται και οι κανόνες κίνησης του behavioral mobility για ατομική κινητικότητα.

Στην περίπτωση που επιλεγεί προσομοίωση σε χώρο χωρίς εμπόδια και περιορισμό από τοίχους, η κίνηση κάθε κόμβου πρέπει να υπακούσει στους εξής κανόνες:

1. «Κατεύθυνση προς έναν προορισμό»
2. «Αμοιβαία αποφυγή κόμβων»

Αρχικά επιλέγεται μια τυχαία κατεύθυνση κίνησης για κάθε κόμβο. Το μέτρο της ταχύτητας κίνησης επιλέγεται εκ των προτέρων πριν την έναρξη της προσομοίωσης. Στην συνέχεια υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας στον x και y γνωρίζοντας την γωνία θ της κίνησης ως προς τον x άξονα :

$$u_x = \cos \theta u_0,$$

$$u_y = \sin \theta u_0,$$

όπου u_0 το μέτρο της ταχύτητας που ορίζεται στην αρχή της προσομοίωσης. Έτσι σε κάθε ενημέρωση θέσης υπολογίζεται η μετατόπιση κάθε κόμβου στον x και y άξονα.

$$dx = u_x t$$

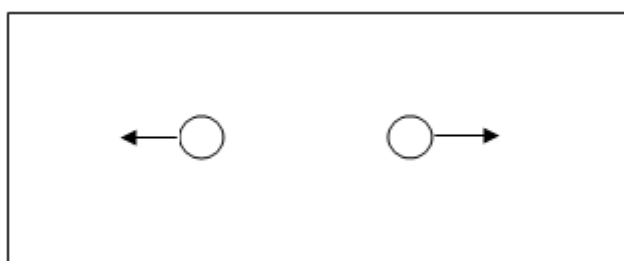
$$dy = u_y t$$

Αντίστοιχά οι νέες συντεταγμένες της θέσης κάθε κόμβου υπολογίζονται από τους εξής τύπους:

$$x = x_0 + dx$$

$$y = y_0 + dy$$

Σε κάθε γεγονός ενημέρωσης θέσης υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ όλων των κόμβων. Στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ δύο κόμβων είναι μικρότερη των 5 μέτρων, ενεργοποιείται η διαδικασία αμοιβαίας αποφυγής της σύγκρουσής τους. Για να αποφευχθεί η σύγκρουση σε απόσταση μικρότερη των 5 μέτρων, οι κόμβοι αναπτύσσουν αντίθετη πορεία κίνησης ο ένας από τον άλλον όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα

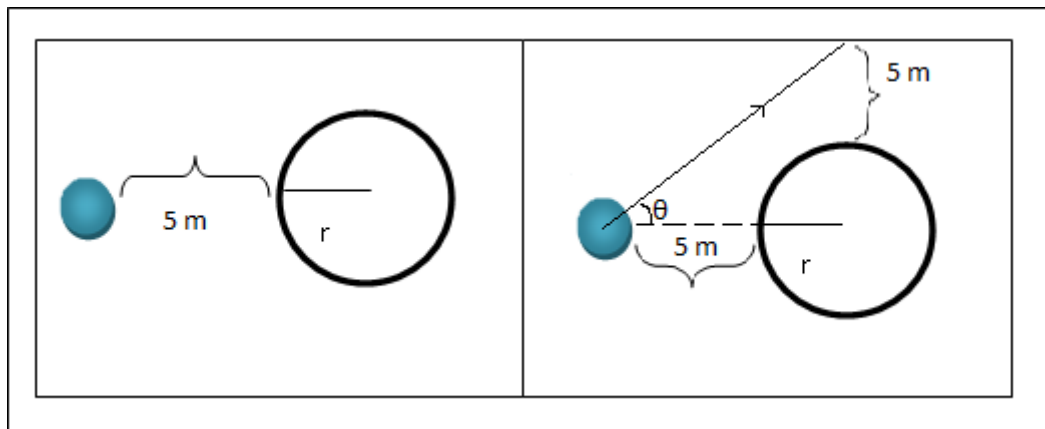


Εικόνα 5~ Απεικονίζεται η κίνηση αντίθετης φοράς των κόμβων ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση.

Για να επιτευχθεί αυτό, δημιουργείται ένας πίνακας συγκρούσεων για κάθε κόμβο. Ο πίνακας αυτός περιέχει τους κόμβους με τους οποίους πρόκειται να συγκρουστεί ο αντίστοιχος κόμβος. Κάθε φορά υπολογίζεται η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος που σχηματίζουν οι δύο συγκρουόμενοι κόμβοι και στην συνέχεια βάσει της κλίσης υπολογίζεται η γωνία του ευθύγραμμου τμήματος ως προς τον x άξονα. Γνωρίζοντας πλέον την γωνία υπολογίζονται όπως προηγουμένως οι συνιστώσες της ταχύτητας στον x και y άξονα για τον έναν από τους δύο κόμβους. Ο άλλος κόμβος πρέπει να επιλέξει την αντίθετη φορά κίνησης ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση όταν έρθει η σειρά του να ενημερώσει την θέση του. Γι' αυτόν τον λόγο καταγράφεται σε έναν πίνακα. Πριν την ενημέρωση θέσης κάθε κόμβος ελέγχει εάν βρίσκεται στον πίνακα αυτόν. Εάν όχι τότε ενημερώνει κανονικά την θέση του βάσει των συνιστωσών ταχύτητας που υπολόγισε, ενώ στην αντίθετη περίπτωση επιλέγει αντίθετες συνιστώσες ταχύτητας και στην συνέχεια διαγράφεται η καταχώρησή του από τον πίνακα.

Από την άλλη πλευρά εάν επιλεγεί η προσομοίωση σε χώρο με εμπόδια πρέπει η κίνηση κάθε κόμβου παράλληλα με τους προηγούμενους κανόνες να υπακούσει και στον κανόνα αποφυγής εμποδίων. Όπως και στην περίπτωση αμοιβαίας σύγκρουσης με κόμβο, έτσι και στην περίπτωση σύγκρουσης με εμπόδιο, υπολογίζεται στην αρχή του γεγονότος η απόσταση κάθε κόμβου από τα εμπόδια στον χώρο. Το πλήθος των εμποδίων επιλέγεται από τον χρήστη στην αρχή της προσομοίωσης και η τοποθέτησή τους στον χώρο γίνεται τυχαία. Όλα τα εμπόδια θεωρούνται ότι είναι κυκλικοί δίσκοι ακτίνας που ορίζει ο χρήστης. Επιπλέον ανάλογα με το υλικό του εμποδίου, θεωρείται και διαφορετικό το ποσοστό απώλειας που προκαλεί το εμπόδιο στο σήμα των κόμβων σε περίπτωση παρεμβολής. Κάθε φορά για την ενημέρωση θέσης ενός κόμβου αποθηκεύεται σε έναν πίνακα η απόσταση του συγκεκριμένου κόμβου από όλα τα εμπόδια. Στην περίπτωση που η απόσταση από ένα εμπόδιο είναι

μικρότερη των 5 μέτρων ενεργοποιείται ο μηχανισμός αποφυγής του εμποδίου. Η κίνηση που ακολουθεί ο κόμβος πρέπει να παρουσιάζει την μικρότερη επιθυμητή παρέκκλιση κινούμενος γύρω από το εμπόδιο.



Εικόνα 6- Αριστερά φαίνεται η περίπτωση στην οποία ενεργοποιείται ο μηχανισμός αποφυγής εμποδίου και δεξιά φαίνεται η νέα κατεύθυνση του κόμβου.

Για να υπολογιστεί η γωνία κατεύθυνσης της κίνησης με την ελάχιστη επιθυμητή παρέκκλιση, χρησιμοποιείται το πυθαγόρειο θεώρημα. Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα σχηματίζεται ένα ορθογώνιο τρίγωνο στο οποίο μπορεί να υπολογιστεί η υποτείνουσα ως εξής:

$$x = \sqrt{dobst^2 + (r + 5)^2},$$

Όπου *dobst* είναι η απόσταση του αντίστοιχου κόμβου από το κέντρο του εμποδίου. Στην συνέχεια γνωρίζοντας την υποτείνουσα υπολογίζουμε το ημίτονο και το συνημίτονο της επιθυμητής γωνίας.

$$\sin \theta = \frac{(r + 5)}{x}$$

$$\cos \theta = \frac{dobst}{x}$$

Επομένως οι συνιστώσες της ταχύτητας στον x και y άξονα υπολογίζονται ως εξής:

$$u_x = \cos \theta u_0$$

$$u_y = \sin \theta u_0$$

Σε κάθε ενημέρωση θέσης υπολογίζεται η νέα θέση κάθε κόμβου ως εξής:

$$x = x_0 + u_x t$$

$$y = y_0 + u_y t$$

Τέλος στην περίπτωση όπου επιλεγεί η κίνηση με εμπόδια και περιορισμό στον χώρο, πέρα από τους κανόνες που ήδη αναφέρθηκαν θα πρέπει να εφαρμοστεί και ο κανόνας αποφυγής τοίχων. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τοίχοι στα όρια του χώρου προσομοίωσης οι οποίοι ουσιαστικά περιορίζουν τον χώρο προσομοίωσης. Οι κόμβοι στην περίπτωση που πλησιάσουν έναν τοίχο σε απόσταση μικρότερη των 5 μέτρων αρχίζουν να κινούνται παράλληλα με τον τοίχο αποφεύγοντας έτσι την πρόσκρουση. Για να γίνει αυτό με την έναρξη του γεγονότος υπολογίζεται η απόσταση του κάθε κόμβου από τους τοίχους του χώρου και αποθηκεύεται σε έναν σχετικό πίνακα. Η απόσταση υπολογίζεται από τον τύπο απόστασης σημείου από ευθεία. Στην περίπτωση που είναι μικρότερη των 5 μέτρων, ο κόμβος ανάλογα με ποιον τοίχο πρόκειται να συγκρουστεί αλλάζει την κατεύθυνση κίνησής του. Συγκεκριμένα υπολογίζεται η κλίση του τοίχου, συνεπώς και η γωνία θ της κίνησης και εν συνεχεία υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας του κόμβου με όμοιο τρόπο όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις ώστε να αρχίσει να κινείται παράλληλα στον τοίχο. Δεν ισχύει όμως το ίδιο στην περίπτωση που ένας κόμβος πλησιάζει σε απόσταση μικρότερη των 5 μέτρων δύο τοίχους. Στην περίπτωση αυτή προσεγγίζει την γωνία του χώρου. Οπότε για την αποφυγή της σύγκρουσης επιλέγεται ανάλογα με το ζευγάρι των τοίχων που πρόκειται να συγκρουστεί ο κόμβος και κατάλληλη γωνία, -45° , 45° , 135° και 225° .

Αφού ολοκληρωθεί η ενημέρωση της θέσης όλων των κόμβων εκτελείται η εύρεση των γειτονικών κόμβων. Ομοίως με το Event 6, υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των κόμβων και όσοι απέχουν μικρότερη ή ίση απόσταση από την εμβέλεια σήματος θεωρούνται γειτονικοί κόμβοι και αποθηκεύονται στον πίνακα γειτόνων κάθε κόμβου.

Στην περίπτωση ύπαρξης εμποδίων στον χώρο είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί έλεγχος για κάθε ζευγάρι γειτονικών κόμβων εάν παρεμβάλλεται της επικοινωνίας τους ένα ή περισσότερα εμπόδια. Για να γίνει αυτό και για να εξοικονομηθεί υπολογιστική ισχύς, περιορίζεται η περιοχή ελέγχου ύπαρξης εμποδίου μεταξύ ενός ζευγαριού γειτονικών κόμβων. Η περιοχή περιορισμού ελέγχου ορίζεται από τις συντεταγμένες των γειτονικών κόμβων. Προσδιορίζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές μεταξύ των συντεταγμένων των δύο κόμβων και σύμφωνα με αυτές ορίζεται ο εξής χώρος.

$$x \in (x_{max} + r, x_{min} - r) \text{ και } y \in (y_{max} + r, y_{min} - r),$$

Όπου r η ακτίνα του εμποδίου. Στην συνέχεια γίνεται έλεγχος εάν υπάρχει κάποιο εμπόδιο στην περιοχή αυτή εφόσον οι συντεταγμένες όλων των εμποδίων είναι γνωστές. Στην περίπτωση που υπάρχει εμπόδιο, υπολογίζεται η απόσταση του κέντρου του εμποδίου από το ευθύγραμμο τμήμα που σχηματίζουν οι δύο γειτονικοί κόμβοι. Στην περίπτωση που η απόσταση του κέντρου από το ευθύγραμμο τμήμα είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα του εμποδίου, τότε δεν παρεμβάλλεται στην επικοινωνία. Αντίθετα εάν είναι μικρότερη ή ίση με την ακτίνα του εμποδίου, παρεμβάλλεται στην επικοινωνία και η εμβέλεια του σήματος των δύο κόμβων μειώνεται κατά ένα ποσοστό απώλειας σήματος, ανάλογα με το υλικό του εμποδίου. Στην περίπτωση που παρεμβάλλονται παραπάνω από ένα εμπόδια, η εμβέλεια σήματος επηρεάζεται ως εξής.

$$a = a_0$$

$$a_1 = a_0 - a_{obst_loss}$$

$$a_2 = a_1 - a_1_{obst_loss}$$

...

$$a_n = a_{n-1} - a_{n-1} obst_loss$$

Όπου a η αρχική εμβέλεια σήματος, n ο αριθμός των εμποδίων που παρεμβάλλονται στην επικοινωνία και $obst_loss$ το ποσοστό απώλειας σήματος λόγω παρεμβολής ενός εμποδίου στην επικοινωνία δύο κόμβων, το οποίο προσδιορίζεται από το υλικό των εμποδίων. Επομένως στην περίπτωση που η εμβέλεια σήματος μειωθεί πολύ και η απόσταση μεταξύ των δύο γειτονικών κόμβων είναι μεγαλύτερη από την νέα εμβέλεια, τότε η επικοινωνία διακόπτεται πλήρως.

Οι κινήσεις που περιγράφηκαν αφορούν στην περίπτωση που ισχύει ένα είδος σύγκρουσης κάθε φορά. Εάν ισχύουν ταυτόχρονα παραπάνω από ένα είδος σύγκρουσης, η κίνηση του αντίστοιχου κόμβου ακολουθεί την εξής σειρά προτεραιότητας στην εφαρμογή των κανόνων.

1. Αποφυγή σύγκρουσης με τοίχο ή αποφυγή σύγκρουσης με εμπόδιο.
2. Αποφυγή αμοιβαίας σύγκρουσης με κόμβο
3. Κίνηση με κατεύθυνση έναν συγκεκριμένο προορισμό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε φορά μπορεί να εφαρμοστεί μόνο ένας από τους παραπάνω κανόνες. Στην περίπτωση που έχουμε ταυτόχρονη σύγκρουση με τοίχο και εμπόδιο, συγκρίνεται η απόσταση τοίχου - κόμβου και εμποδίου - κόμβου. Η προτεραιότητα εφαρμογής παραχωρείται σε όποια περίπτωση έχει μικρότερη απόσταση από τον αντίστοιχο κόμβο, γιατί υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης.

Event 8: «Ενημέρωση θέσης με την χρήση του μοντέλου Column Mobility»

Το μοντέλο Column Mobility αποτελεί μοντέλο ομαδικής κινητότητας. Για τον λόγο αυτό στην αρχή της προσομοίωσης επιλέγεται το πλήθος των ομάδων κίνησης που χωρίζονται οι κόμβοι του δικτύου. Για κάθε κόμβο ορίζεται ένα σημείο αναφοράς, το οποίο απέχει μια συγκεκριμένη απόσταση από τη αρχική θέση του κόμβου και ορίζεται ως εξής:

$$Reference\ Point = nodes\ position + rnd,$$

όπου rnd είναι η απόσταση την οποία απέχουν όλοι οι κόμβοι από τα σημεία αναφοράς τους και είναι ίδια για όλα τα σημεία αναφοράς.

Στην συνέχεια όλοι οι κόμβοι και τα σημεία αναφοράς χωρίζονται σε ομάδες κίνησης, ανάλογα με το πλήθος που έχει ορίσει ο χρήστης. Όλοι οι κόμβοι που ανήκουν στην ίδια ομάδα κίνησης κινούνται με την ίδια ταχύτητα. Ο καθορισμός της ταχύτητας κίνησης γίνεται με την επιλογή τυχαίου διανύσματος μετατόπισης, *advance vector*. Ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα όλοι οι κόμβοι μετατοπίζονται κατά *advance vector*. Το διάνυσμα αυτό είναι κοινό για όλα τα σημεία αναφοράς μιας ομάδας και υπολογίζεται από μια τυχαία ομοιόμορφη κατανομή για συγκεκριμένα διαστήματα που ορίζει ο χρήστης. Έτσι παραδείγματος χάρι εάν έχει επιλεγεί το διάστημα (0,1) για την ομοιόμορφη κατανομή, η

τιμή του τυχαίου διανύσματος θα είναι είτε 0 είτε 1, με αποτέλεσμα το σημείο αναφοράς του αντίστοιχου κόμβου να μετακινηθεί είτε κατά 1 μέτρο είτε καθόλου. Η μετακίνηση αυτή επηρεάζει όλους τους κόμβους που ανήκουν στην ομάδα αυτή διότι όλα τα σημεία αναφοράς μετακινήθηκαν κατά το τυχαίο διάνυσμα μετατόπισης.

$$\text{Reference Point} = \text{Previous Reference Point} + \text{advance vector}$$

Ο υπολογισμός της τελικής θέσης κάθε κόμβου δεν καθορίζεται μόνο από τη θέση του σημείου αναφοράς του, αλλά και από ένα ακόμα τυχαίο διάνυσμα κόμβου, το οποίο υπολογίζεται με τυχαία ομοιόμορφη κατανομή για το διάστημα (1,2).

$$\text{Nodes position} = \text{reference point} + \vec{w},$$

Όπου w το τυχαίο διάνυσμα. Για τον ορισμό της τελικής θέσης κάθε κόμβου, υπολογίζονται οι συνιστώσες της μετατόπισης στον x και y άξονα και ενημερώνεται η εγγραφή της θέσης κάθε κόμβου στον αντίστοιχο πίνακα. Έπειτα γίνεται η εύρεση των γειτόνων, με τον ίδιο τρόπο όπως και στα προηγούμενα events, υπολογίζοντας την απόσταση μεταξύ όλων των κόμβων και εντοπίζοντας τους κόμβους που απέχουν μικρότερη ή ίση απόσταση από την εμβέλεια του σήματος κάθε κόμβου.

Event 9: «Ενημέρωση θέσης με την χρήση του μοντέλου Behavioral Group Mobility»

Ομοίως με το προηγούμενο μοντέλο, το Behavioral Group Mobility αφορά την προσομοίωση ομαδικής κίνησης. Στην αρχή του event επιλέγεται το πλήθος των ομάδων κίνησης που χωρίζονται οι κόμβοι. Στην συνέχεια ομοίως με το μοντέλο Individual Behavioral Mobility, η κίνηση κάθε κόμβου θα πρέπει να υπακούσει σε κάποιους βασικούς κανόνες, ανάλογα με τις επιλογές που θα κάνει ο χρήστης για το φυσικό περιβάλλον του δικτύου. Στην περίπτωση λοιπόν που επιλέξει κίνηση σε χώρο χωρίς εμπόδια και περιορισμό από τοίχους, οι βασικοί κανόνες που εφαρμόζονται στην κίνηση είναι ο κοινός προορισμός για όλους τους κόμβους μιας ομάδας, η κοινή ταχύτητα κίνησης και η αμοιβαία αποφυγή σύγκρουσης μεταξύ των κόμβων, όπως αυτοί περιγράφονται στο 2^ο Κεφάλαιο. Στον κανόνα επιλογής κοινού προορισμού και κοινής ταχύτητας, για κάθε ομάδα κίνησης επιλέγεται μια κατεύθυνση κίνησης στην οποία κινούνται όλοι οι κόμβοι της ομάδας. Η επιλογή της γίνεται με τυχαία ομοιόμορφη κατανομή για το διάστημα (0,360) μοιρών. Αφού επιλεγεί η γωνία της κίνησης, υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας των κόμβων για τον x και y άξονα.

$$\theta = \text{randi}([0,360])$$

$$u_x = \cos \theta u_0$$

$$u_y = \sin \theta u_0$$

Επομένως όλοι οι κόμβοι της ίδιας ομάδας κινούνται προς τον ίδιο προορισμό με το ίδιο μέτρο ταχύτητας. Βέβαια ταυτόχρονα με την εφαρμογή του κανόνα κίνησης προς έναν κοινό προορισμό για όλους τους κόμβους μιας ομάδας, λαμβάνεται υπόψη και ο κανόνας αμοιβαίας αποφυγής σύγκρουσης μεταξύ των κόμβων. Ειδικά στην περίπτωση που οι κόμβοι κινούνται κατά ομάδες, αυξάνεται η πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ των κόμβων της ίδιας ομάδας, διότι κινούνται πολύ κοντά ο ένας με τον άλλον. Για να αποφευχθεί η σύγκρουση, ομοίως με το μοντέλο Individual Behavioral Mobility οι κόμβοι που πλησιάζουν σε απόσταση λιγότερη

των 5 μέτρων αναπτύσσουν αντίθετη φορά κίνησης μεταξύ τους ώστε να αποφύγουν ο ένας τον άλλον. Όπως και για το Individual Behavioral Mobility, υπολογίζεται η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος που σχηματίζουν οι κόμβοι που πρόκειται να συγκρουστούν, στην συνέχεια υπολογίζεται η γωνία του ευθύγραμμου τμήματος ως προς τον x άξονα και βάσει αυτής υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας κάθε κόμβου στον x και y άξονα. Βέβαια ο ένας από τους δύο κόμβους επιλέγει αντίθετη φορά, με τον τρόπο που περιγράφηκε στο individual behavioral mobility.

Από την άλλη πλευρά, εάν ο χρήστης επιλέξει την προσομοίωση σε χώρο με εμπόδια και περιορισμό χώρου, επιλέγεται το πλήθος, η ακτίνα και το ποσοστό απώλειας σήματος που προκαλεί ένα εμπόδιο. Εάν σε έναν κόμβο πρέπει να εφαρμοστούν ταυτόχρονα όλοι οι κανόνες κίνησης, τότε η κίνησή του υπακούει στην ακόλουθη προτεραιότητα εφαρμογής των κανόνων.

1. Αποφυγή σύγκρουσης με τοίχο ή αποφυγή σύγκρουσης με εμπόδιο.
2. Αποφυγή αμοιβαίας σύγκρουσης με κόμβο
3. Κίνηση προς κοινό προορισμό με κοινή ταχύτητα .

Ο τρόπος υλοποίησης της κίνησης για την αποφυγή σύγκρουσης με εμπόδια και με περιορισμό του χώρου λόγω της ύπαρξης τοίχου είναι ακριβώς ίδιος όπως στο μοντέλο Individual Behavioral Mobility. Έπειτα ακολουθεί η εύρεση των γειτονικών κόμβων. Υπολογίζεται η απόσταση όλων των κόμβων μεταξύ τους, και ελέγχεται ποιοι κόμβοι απέχουν μικρότερη ή ίση απόσταση της εμβέλειας του σήματος. Έτσι δημιουργείται για κάθε κόμβο ένας πίνακας γειτνίασης ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους γειτονικούς του κόμβους.

Και στην εφαρμογή του Behavioral Mobility για ομαδική κινητικότητα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, το γεγονός ότι με την παρεμβολή εμποδίων μεταξύ της επικοινωνίας δύο γειτονικών κόμβων, υπάρχει αλλοίωση του σήματος και πολλές φορές διακοπή. Επομένως για κάθε ζευγάρι γειτονικών κόμβων πραγματοποιείται έλεγχος, εάν παρεμβάλλεται εμπόδιο στην επικοινωνία. Για κάθε ζευγάρι γειτονικών κόμβων επιλέγεται μια περιοχή ελέγχου, η οποία ορίζεται από τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές των συντεταγμένων.

$$x \in (x_{max} + r, x_{min} - r) \text{ και } y \in (y_{max} + r, y_{min} - r),$$

Στην συνέχεια γίνεται έλεγχος εάν υπάρχει στον χώρο αυτό κάποιο εμπόδιο, εφόσον οι συντεταγμένες όλων των εμποδίων είναι γνωστές. Εάν υπάρχει, τότε υπολογίζεται η απόσταση του κέντρου του εμποδίου από το ευθύγραμμο τμήμα που σχηματίζουν οι δύο γειτονικοί κόμβοι. Εάν είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα του εμποδίου, τότε δεν παρεμβάλλεται στην επικοινωνία. Σε αντίθετη περίπτωση εντοπίζεται παρεμβολή στο σήμα, οπότε ανάλογα με το ποσοστό απώλειας σήματος που έχει οριστεί για κάθε εμπόδιο, υπολογίζεται η απώλεια εμβέλειας σήματος.

$$a = \alpha_0$$

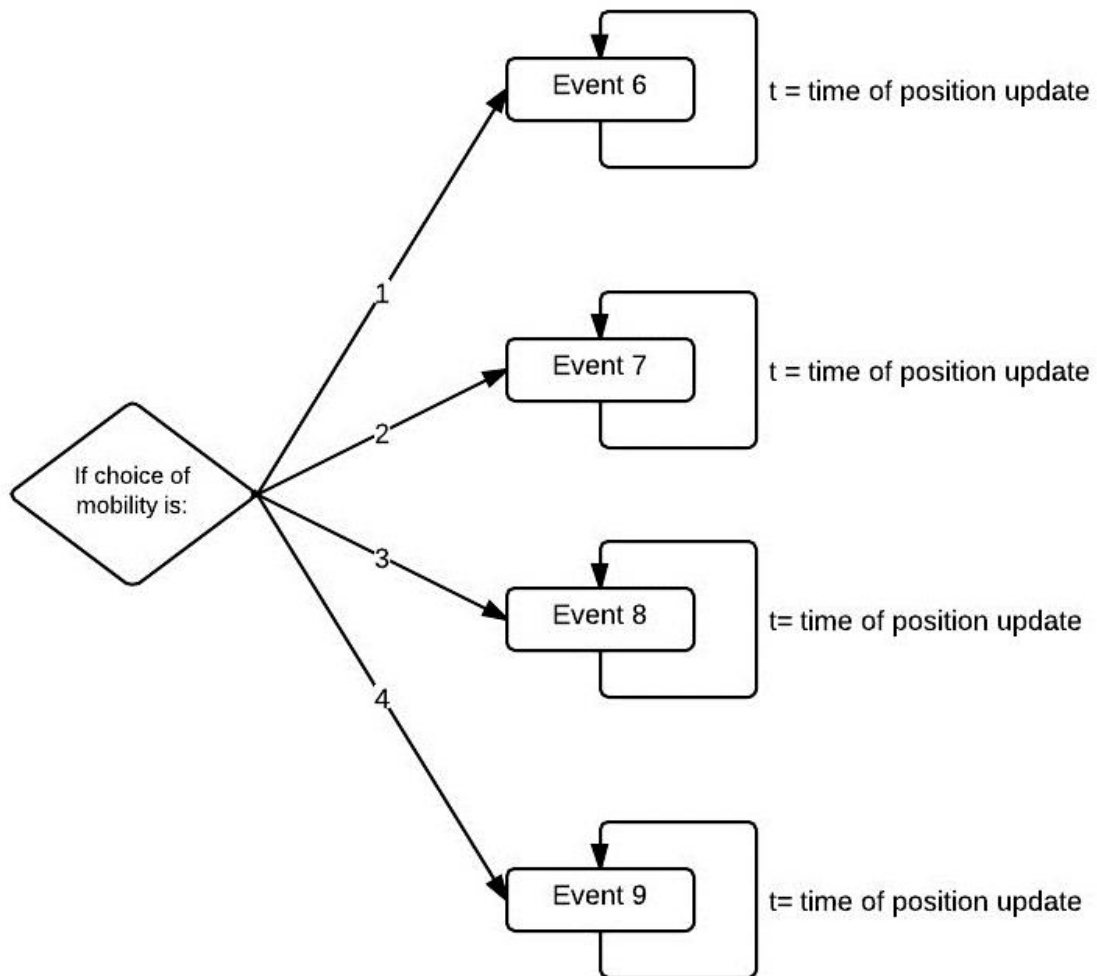
$$a_1 = \alpha_0 - \alpha_{obst_loss}$$

$$a_2 = a_1 - a_1_{obs_loss}$$

...

$$a_n = a_{n-1} - a_{n-1}obst_loss$$

Το ποσοστό απώλειας σήματος, *obst_loss* προσδιορίζεται από το υλικό των εμποδίων. Όπως είναι εμφανές για κάθε εμπόδιο που παρεμβάλλεται στην επικοινωνία δύο κόμβων, μειώνεται όλο και περισσότερο η εμβέλεια του σήματος. Στην περίπτωση λοιπόν που η τελική εμβέλεια σήματος είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση δύο γειτονικών κόμβων, η επικοινωνία διακόπτεται και οι δύο κόμβοι παύουν να θεωρούνται γείτονες. Ακολουθεί το διάγραμμα ροής των γεγονότων ενημέρωσης θέσης.



Εικόνα 7~ Διάγραμμα ροής γεγονότων ενημέρωσης θέσης.

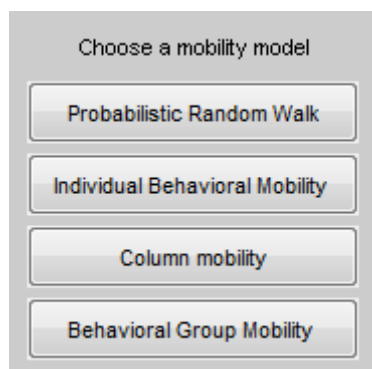
3.3 Περιβάλλον προσομοίωσης

Με την έναρξη της προσομοίωσης ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει το πλήθος των κόμβων του δικτύου, την εμβέλεια του σήματος κάθε κόμβου, τις διαστάσεις του δισδιάστατου χώρου προσομοίωσης και την διάρκεια προσομοίωσης.

```
Input number of nodes:50
Input range of nodes:100
Choose the x maximum dimension:500
Choose the y maximum dimension:500
fx Input the duration of the simulation:1000|
```

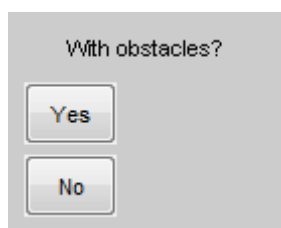
Εικόνα 8 ~ Παράμετροι εισόδου του προσομοιωτή.

Στην συνέχεια ανάλογα με το μοντέλο κίνησης που επιθυμεί να μελετήσει μπορεί να επιλέξει μέσω ενός μενού, ένα από τα τέσσερα μοντέλα που υλοποιήθηκαν.

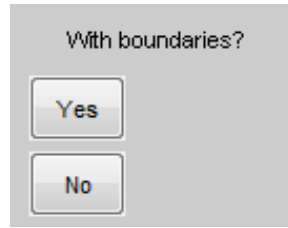


Εικόνα 9~ Μενού επιλογής μοντέλου κινητότητας.

Εάν επιλέξει το μοντέλο Individual Behavioral Mobility ή το Behavioral θα πρέπει να επιλέξει εάν ο χώρος προσομοίωσης θα περιέχει εμπόδια και εάν θα περιλαμβάνει οριοθέτηση ο από τοίχο.

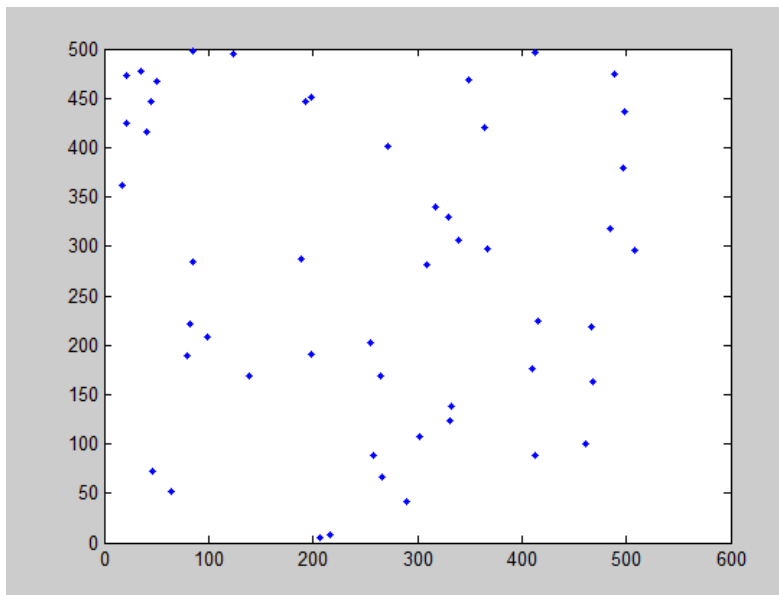


Εικόνα 10~ Μενού επιλογής εμποδίων.

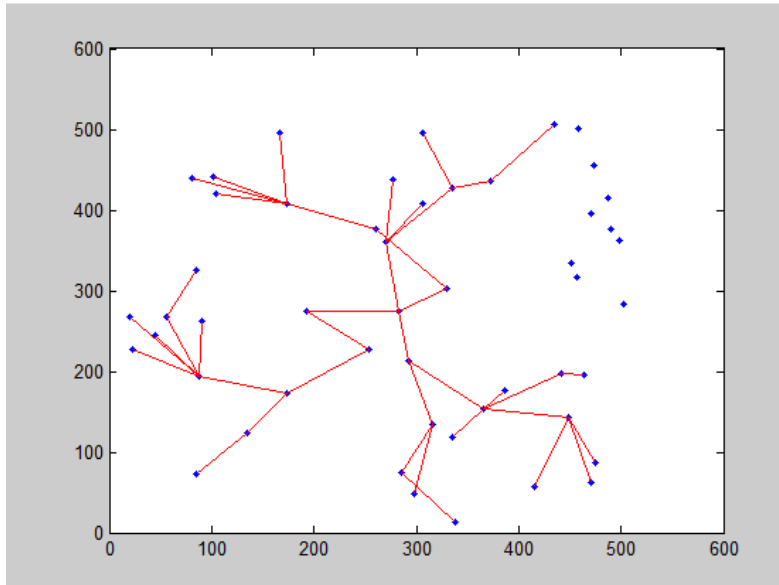


Εικόνα 11~ Μενού επιλογής ορίων.

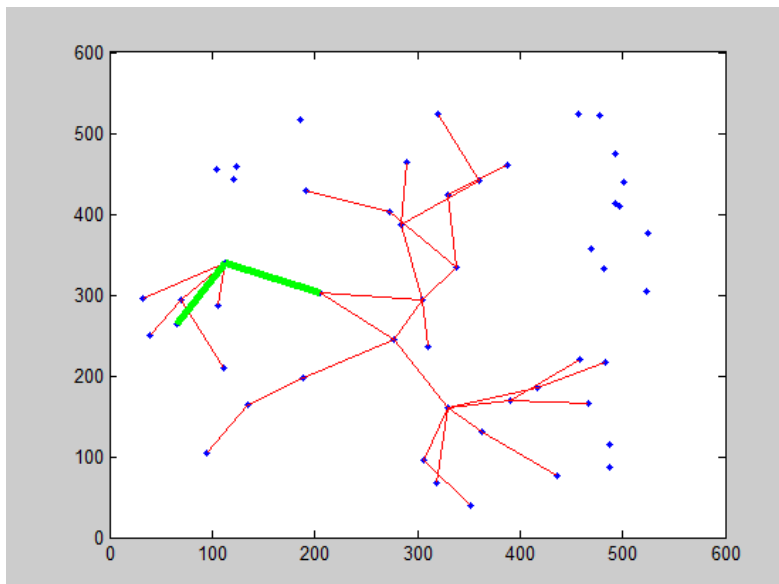
Ενώ εάν επιλέξει το Column Mobility Model ή το Behavioral Group Mobility θα πρέπει να επιλέξει το πλήθος των ομάδων κίνησης. Αφού επιλεγεί το μοντέλο κίνησης, ξεκινάει η προσομοίωση. Ακολουθούν κάποια στιγμιότυπα από διάφορες προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν κατά την μελέτη των μοντέλων κίνησης.



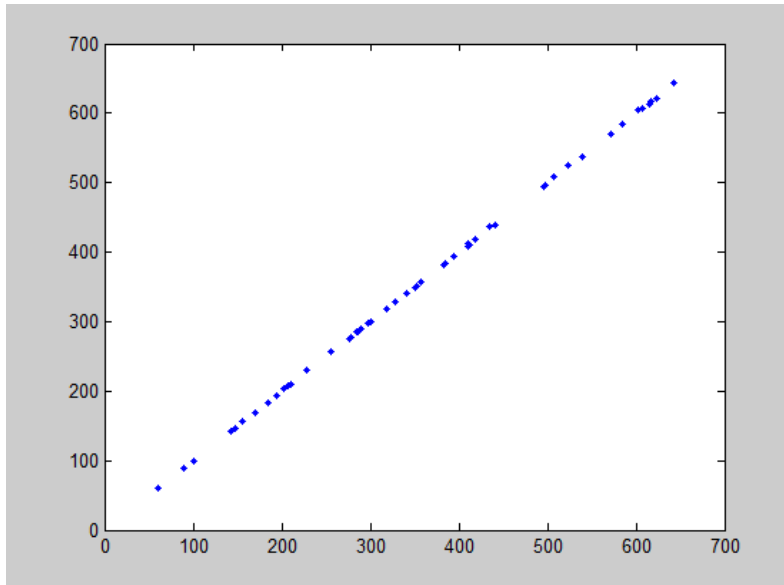
Εικόνα 12 ~ Οι κόμβοι έχουν τοποθετηθεί σε τυχαίες θέσεις στον χώρο προσομοίωσης και κινούνται εφαρμόζοντας το μοντέλο Probabilistic Random Walk. Οι τελείες απεικονίζουν τους κόμβους.



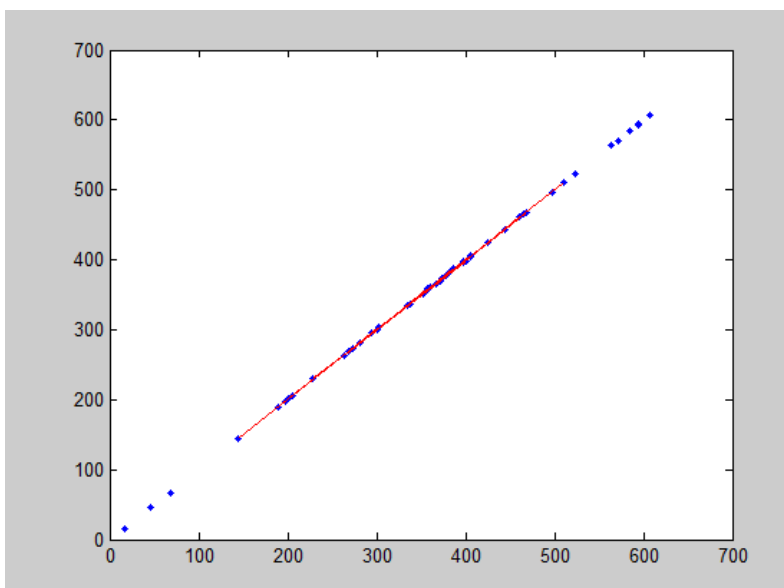
Εικόνα 13 ~ Φαίνεται η διαδικασία ανακάλυψης δρομολογίου. Οι κόμβοι στέλνουν στους γείτονές τους μηνύματα αίτησης δρομολογίου.



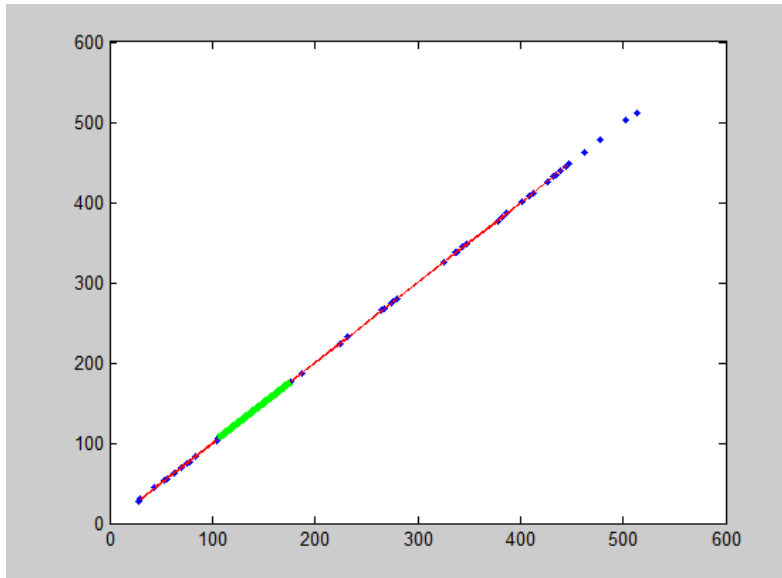
Εικόνα 14 ~ Ο προορισμός προωθεί μηνύματα απάντησης δρομολογίου προς την πηγή ώστε να εδραιωθεί το μονοπάτι επικοινωνίας τους. Η διαδρομή των μηνυμάτων απάντησης απεικονίζεται με την πράσινη γραμμή.



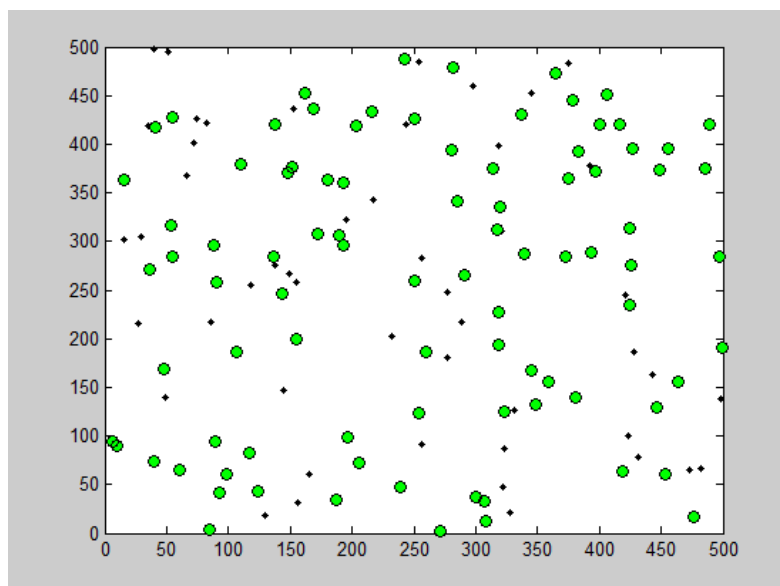
Εικόνα 15 ~ Οι κόμβοι κινούνται εφαρμόζοντας το μοντέλο *Column Mobility*. Παρατίθενται στη σειρά και κάθε ομάδα κίνησης κινείται με διαφορετική ταχύτητα και κατεύθυνση.



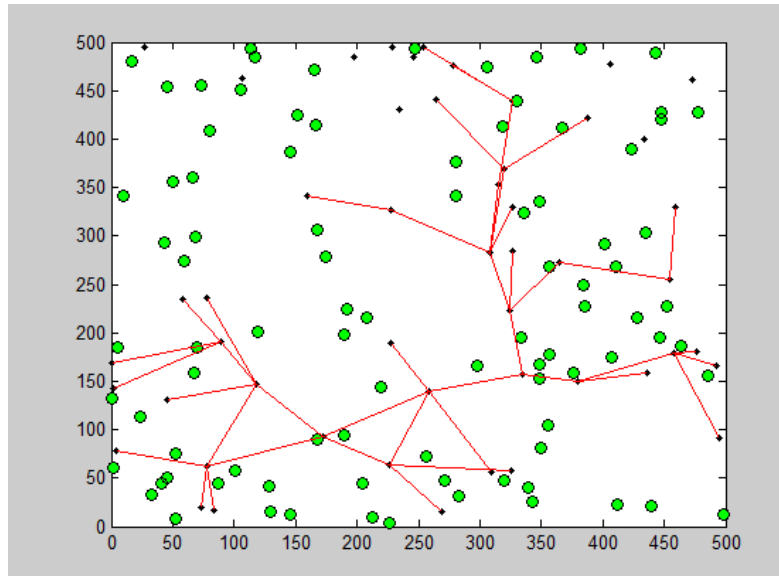
Εικόνα 16 ~ Διαδικασία αναζήτησης δρομολογίου προς τον προορισμό



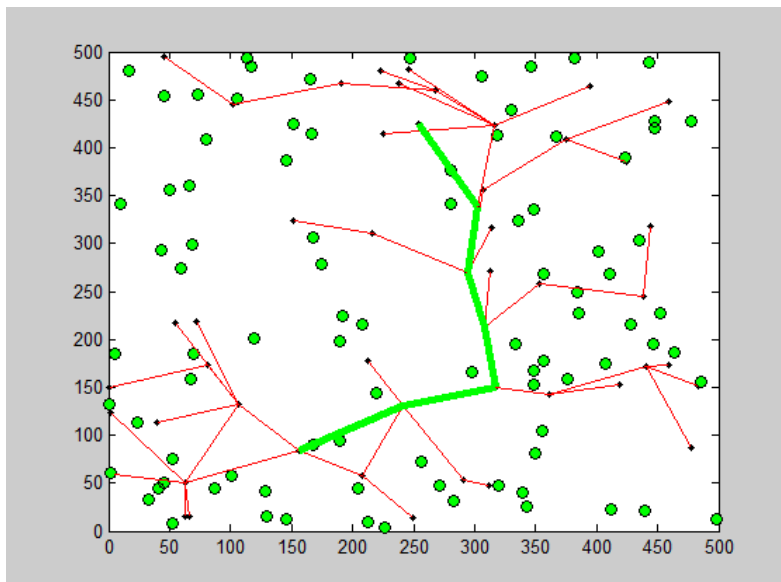
Εικόνα 17 ~ Ο προορισμός προωθεί μηνύματα απάντησης προς την πηγή.



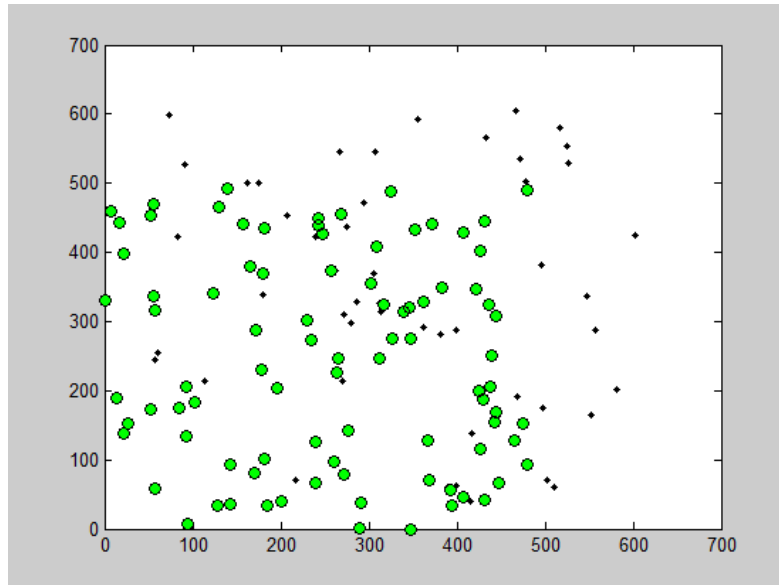
Εικόνα 18 ~ Απεικόνιση του μοντέλου Behavioral Mobility για ατομική κινητικότητα με εμπόδια και τοίχους στα όρια του χώρου. Οι πράσινοι κυκλικοί δίσκοι απεικονίζουν τα εμπόδια και οι τελείες τους κόμβους.



Εικόνα 19 ~ Απεικονίζεται η διαδικασία αναζήτησης διαδρομής σε περιβάλλον με εμπόδια και περιορισμό χώρου από τοίχους.



Εικόνα 20 ~ Ο προορισμός προωθεί μηνύματα απάντησης διαδρομής προς την πηγή για την εδραίωση μονοπατιού σε περιβάλλον με εμπόδια και τοίχους.



Εικόνα 21 ~ Απεικόνιση προσομοίωσης του *Behavioral Mobility* για ομαδική κινητικότητα με δύο ομάδες κίνησης σε περιβάλλον με εμπόδια και χωρίς περιορισμό από τοίχους.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται εκτίμηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για κάθε μοντέλο κινητότητας, βάσει της μεταβολής των παραμέτρων της προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 4^ο- Αποτελέσματα

4.1 Παράμετροι προσομοίωσης

Interarrival time: Ο χρόνος που μεσολαβεί από την δημιουργία ενός πακέτου δεδομένων στην πηγή μέχρι την δημιουργία του επόμενου πακέτου. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται από μια συνάρτηση εκθετικής κατανομής με συγκεκριμένη μέση τιμή. Η μέση τιμή στην συγκεκριμένη προσομοίωση παίρνει τιμές από 1 έως και 5. Το αποτέλεσμα της εκθετικής συνάρτησης είναι σε sec.

Φόρτος δικτύου: Ο φόρτος του δικτύου είναι ο ρυθμός με τον οποίο παράγονται τα πακέτα δεδομένων στην πηγή. Υπολογίζεται από τον λόγο των συνολικών πακέτων δεδομένων που δημιουργήθηκαν στον αρχικό αποστολέα προς τον συνολικό χρόνο προσομοίωσης. Ο ρυθμός αυτός εξαρτάται από τα χρονικά διαστήματα που μεσολαβούν από μία δημιουργία ενός πακέτου στον αρχικό αποστολέα μέχρι την επόμενη (interarrival time). Η μονάδα μέτρησης είναι πακέτα/sec.

Πιθανότητες μετάβασης κατάστασης: Στον probabilistic random walk για να αλλάξει χαρακτηριστικά κίνησης ένας κόμβος, δηλαδή κατεύθυνση κίνησης, θα πρέπει να αλλάξει κατάσταση. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια γεννήτρια αριθμών για την μετάβαση από μια κατάσταση στην επόμενη. Το αποτέλεσμα της γεννήτριας αυτής ορίζει την κατάσταση στην οποία θα μεταβεί ένας κόμβος. Η γεννήτρια λειτουργεί με τρεις πιθανότητες, οι οποίες είναι οι εξής:

1^η Πιθανότητα: Να μεταβεί ο κόμβος στην προηγούμενη κατάσταση κίνησης.

2^η Πιθανότητα: Να παραμείνει στην τρέχουσα κατάσταση κίνησης.

3^η Πιθανότητα: Να μεταβεί στην επόμενη κατάσταση κίνησης.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον μελέτης παρουσιάζει η μεταβολή της πιθανότητας παραμονής στην ίδια κατάσταση, η οποία θα μελετηθεί στην συνέχεια, θεωρώντας τις υπόλοιπες πιθανότητες μετάβασης κατάστασης ίσες. Φυσικά το άθροισμα όλων των πιθανοτήτων είναι 1.

Ταχύτητα των κόμβων: Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά κίνησης είναι η ταχύτητα του κινητού κόμβου, το μέτρο της και η κατεύθυνσή της. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση θα μελετηθεί πως επηρεάζει η μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας τα αποτελέσματα του δικτύου.

Πλήθος των κόμβων: Μας ενδιαφέρει ποια είναι η συμπεριφορά του δικτύου για μεταβαλλόμενο πλήθος κόμβων.

Πλήθος ομάδων: Στην περίπτωση ομαδικής κινητότητας μελετάται κατά πόσο επηρεάζει το δίκτυο το πλήθος των ομάδων κίνησης που ανήκουν οι κόμβοι του. Κάθε φορά οι ομάδες αποτελούνται περίπου από ίσο πλήθος κόμβων.

Advance vector: Στην περίπτωση του μοντέλου ομαδικής κινητότητας, column mobility, κάθε κόμβος έχει ένα σημείο αναφοράς σύμφωνα με το οποίο μετατοπίζεται κάθε φορά που

γίνεται ενημέρωση θέσης. Το σημείο αναφοράς απέχει συγκεκριμένη απόσταση από τον αντίστοιχο κόμβο, και σε κάθε ενημέρωση θέσης μετατοπίζεται κατά ένα τυχαίο διάνυσμα *advance vector*. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση το μέτρο του διανύσματος αυτού παράγεται με τυχαία ομοιόμορφη κατανομή για τα εξής διαστήματα: (0,1),(1,2),(2,3),(3,4). Έτσι παραδείγματος χάρι εάν έχει επιλεγεί το διάστημα (0,1) για την ομοιόμορφη κατανομή, η τιμή του τυχαίου διανύσματος θα είναι είτε 0 είτε 1, με αποτέλεσμα το σημείο αναφοράς του αντίστοιχου κόμβου να μετακινηθεί είτε κατά 1 μέτρο είτε καθόλου. Κάτι ανάλογο θα γίνει και για τα υπόλοιπα διαστήματα. Για κάθε διάστημα της ομοιόμορφης κατανομής υπολογίζεται προσεγγιστικά η ταχύτητα κόμβου που προκύπτει από το *advance vector* και το χρονικό διάστημα ενημέρωσης της θέσης. Πιο συγκεκριμένα έχουμε τις εξής αντιστοιχίες:

<i> advance vector </i>	<i> ταχύτητα σε m/sec</i>
(0,1)	3,5
(1,2)	10,5
(2,3)	17,5
(3,4)	24,5

Αριθμός εμποδίων: Στην μελέτη κινητότητας βάσει του φυσικού περιβάλλοντος του δικτύου, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο το πλήθος των εμποδίων. Για ένα περιβάλλον σταθερών διαστάσεων, μεταβάλλουμε τον αριθμό των εμποδίων για να διαπιστωθεί κατά πόσο επηρεάζουν την επικοινωνία των κόμβων.

Ποσοστό απώλειας εμβέλειας σήματος: Στην περίπτωση που υπάρχει παρεμβολή εμποδίου μεταξύ της επικοινωνίας δύο κόμβων, η εμβέλεια του σήματος κάθε κόμβου μειώνεται κατά ένα ποσοστό απώλειας εμβέλειας σήματος. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από το υλικό του εμποδίου. Φυσικά σε κάθε προσομοίωση όλα τα εμπόδια θεωρείται ότι αποτελούνται από το ίδιο υλικό. Τα ποσοστά απώλειας που μελετώνται είναι: 10%, 20% και 30%.

Ακτίνα εμποδίου: Για σταθερό πλήθος εμποδίων σε χώρο σταθερών διαστάσεων μεταβάλλεται η ακτίνα του εμποδίου ώστε να μελετηθεί πως επηρεάζεται όχι μόνο η κίνηση των κόμβων αλλά και η λειτουργία του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε προσομοίωση όλα τα εμπόδια είναι ίδιου μεγέθους. Η ακτίνα του εμποδίου μπορεί να είναι: 2, 5 και 8 μέτρα.

4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Μέσος βαθμός κόμβου: Οι κόμβοι που επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους στο δίκτυο, σχηματίζουν ένα γράφημα συνδεσιμότητας. Ο αριθμός των συνδέσεων κάθε κόμβου στο γράφημα συνδεσιμότητας αποτελεί τον βαθμό κόμβου. Πιο πρακτικά στην συγκεκριμένη προσομοίωση ο βαθμός κόμβου είναι ο αριθμός των γειτονικών κόμβων του. Κάθε φορά που γίνεται ενημέρωση θέσης κόμβου πραγματοποιείται και ανακάλυψη γειτόνων. Οπότε υπολογίζεται ένας μέσος όρος βαθμού κόμβου για όλους τους κόμβους, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις φορές που έγινε ενημέρωση θέσης. Η μονάδα μέτρησης είναι σε πλήθος κόμβων.

Μέσο μήκος μονοπατιού: Κατά την αποστολή των πακέτων δεδομένων, καταγράφεται το μονοπάτι διέλευσής τους, δηλαδή οι κόμβοι από τους οποίους πέρασαν τα δεδομένα. Κάθε φορά που φτάνει επιτυχώς ένα πακέτο δεδομένων στον τελικό παραλήπτη, υπολογίζεται το μήκος του μονοπατιού σε πλήθος κόμβων. Επομένως το μέσο μήκος μονοπατιού είναι ο μέσος όρος των μηκών των μονοπατιών που διένυσαν όλα τα πακέτα δεδομένων που έφτασαν επιτυχώς στον τελικό παραλήπτη. Η μονάδα μέτρησης είναι σε πλήθος κόμβων.

Μέσος χρόνος εύρεσης μονοπατιού: Ο χρόνος εύρεσης μονοπατιού είναι το χρονικό διάστημα από την έναρξη αναζήτησης διαδρομής από τον αρχικό αποστολέα μέχρι την στιγμή που θα λάβει μήνυμα απάντησης με γνωστό δρομολόγιο προς τον τελικό παραλήπτη. Ο μέσος χρόνος εύρεσης μονοπατιού είναι ο μέσος όρος των χρονικών αυτών διαστημάτων για κάθε αναζήτηση διαδρομής που έγινε. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αρχικός αποστολέας και ο τελικός παραλήπτης παραμένουν οι ίδιοι καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η μονάδα μέτρησης είναι σε sec.

Μέσος χρόνος ζωής σύνδεσης: Ο χρόνος ζωής σύνδεσης είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο υπάρχει εγγραφή δρομολογίου προς έναν συγκεκριμένο προορισμό στον πίνακα δρομολόγησης κάθε κόμβου. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση δημιουργούνται δρομολόγια μόνο για την πηγή και τον προορισμό. Επομένως η μέση διάρκεια ζωής σύνδεσης είναι ο μέσος όρος όλων των χρονικών διαστημάτων ζωής όλων των εγγραφών των πινάκων δρομολόγησης όλων των κόμβων που μπορούν να επικοινωνήσουν με τον αρχικό αποστολέα και τον τελικό παραλήπτη. Κάθε εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης περιλαμβάνει και έναν χρόνο ζωής εγγραφής, ο οποίος είναι ανάλογος του πλήθους των κόμβων του γραφήματος συνδεσιμότητας του δικτύου. Όταν παρέλθει αυτός ο χρόνος η εγγραφή διαγράφεται. Επιπλέον στην περίπτωση που λάβει ένας κόμβος μήνυμα σφάλματος, διαγράφει την αντίστοιχη εγγραφή που του υποδεικνύει το μήνυμα, με αποτέλεσμα να επιδρά στον χρόνο ζωής μιας σύνδεσης. Η μονάδα μέτρησης είναι σε sec.

Αριθμός μηνυμάτων σφάλματος: Τα μηνύματα σφάλματος ανήκουν στην κατηγορία μηνυμάτων ελέγχου του δικτύου. Η αποστολή τους γίνεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει σφάλμα στον πίνακα δρομολόγησης ενός κόμβου. Ο κόμβος με τον εσφαλμένο πίνακα δρομολόγησης, αποστέλλει τα μηνύματα αυτά σε γειτονικούς του κόμβους, ώστε να τους ενημερώσει ότι δεν μπορεί να προωθήσει δεδομένα προς τον τελικό προορισμό, διότι δεν διαθέτει κάποια εγγραφή προς αυτόν, στον πίνακα δρομολόγησης του. Η συγκεκριμένη παράμετρος μελετά τον αριθμό αυτών των μηνυμάτων.

Μέση καθυστέρηση πακέτου: Η καθυστέρηση πακέτου είναι το χρονικό διάστημα από την δημιουργία του πακέτου στον αποστολέα μέχρι την στιγμή που θα το λάβει ο παραλήπτης. Επομένως η μέση καθυστέρηση πακέτου είναι ο μέσος όρος καθυστέρησης για όλα τα πακέτα που παρέλαβε ο τελικός παραλήπτης. Η μονάδα μέτρησης είναι σε sec.

Ρυθμαπόδοση: Η ρυθμαπόδοση του δικτύου είναι ο ρυθμός με τον οποίο φτάνουν τα πακέτα δεδομένων στον τελικό παραλήπτη. Υπολογίζεται από τον λόγο των πακέτων δεδομένων που έφτασαν επιτυχώς στον προορισμό προς τον συνολικό χρόνο προσομοίωσης. Η μονάδα μέτρησης είναι πακέτα/sec.

Ποσοστό απώλειας πακέτων: Κάθε κόμβος εφόσον παραλάβει ένα πακέτο δεδομένων έχει την δυνατότητα να το προωθήσει αμέσως στον επόμενο κόμβο που του υποδεικνύει ο πίνακας δρομολόγησης του. Στην περίπτωση όμως που παραλάβει ένα πακέτο δεδομένων και

δεν έχει στον πίνακα δρομολόγησής του κάποια εγγραφή προς τον τελικό παραλήπτη, το πακέτο χάνεται. Το ποσοστό απώλειας πακέτων λοιπόν, είναι το ποσοστό των πακέτων που χάθηκαν από τον συνολικό αριθμό πακέτων που υπάρχουν στο δίκτυο, ακόμα κι αν αυτά βρίσκονται ακόμα στον αρχικό αποστολέα. Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται επί τοις εκατό.

4.3 Εκτίμηση αποτελεσμάτων βάσει του τύπου της κίνησης

Περιβάλλον και χαρακτηριστικά του δικτύου

Για την μελέτη των μοντέλων κινητότητας ανεξαρτήτως του τύπου κίνησης, θεωρήσαμε ότι το δίκτυο αποτελούνταν από ασύρματους κόμβους τοποθετημένους τυχαία σε χώρο αρχικών διαστάσεων 500 x 500 τετραγωνικά μέτρα χωρίς εμπόδια και οριοθέτηση. Η εμβέλεια του σήματος κάθε κόμβου θεωρήθηκε 100 μέτρα. Επιλέχθηκε ταχύτητα μετάδοσης 1Mbps και φόρτος δικτύου περίπου 1 πακέτο/sec με το interarrival time να προκύπτει από εκθετική κατανομή με μέση τιμή 1. Επιπλέον το μέγεθος μηνυμάτων ελέγχου και πακέτων δεδομένων θεωρήθηκε σταθερό στα 1518 bytes, επομένως το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από μια ενημέρωση θέσης στην επόμενη είναι 0.1447 δευτερόλεπτα. Μέσα από την προσομοίωση των μοντέλων κινητότητας για διαφορετικά σενάρια, εκτιμήθηκε η συμπεριφορά του δικτύου ως προς την κίνηση και ως προς τις επιδόσεις του, μελετώντας τα αποτελέσματα τις προσομοίωσης για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων της προσομοίωσης. Σε κάθε σενάριο προσομοίωσης ορίστηκε μια μεταβλητή παράμετρος προσομοίωσης ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι θεωρήθηκαν σταθερές. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι για κάθε τιμή μιας παραμέτρου, το ίδιο σενάριο προσομοιώθηκε πολλαπλές φορές και λήφθηκε υπόψη ο μέσος όρος των τιμών των αποτελεσμάτων κάθε εκτέλεσης.

4.3.1 Ατομική Κινητότητα

Κατά την μελέτη της ατομικής κινητότητας εκτιμήθηκε η συμπεριφορά του δικτύου βάσει της μεταβολής των αποτελεσμάτων κατά την εκτέλεση διαφορετικών σεναρίων προσομοίωσης για τα μοντέλα Probabilistic Random Walk και Individual Behavioral Mobility. Τα μοντέλα αυτά παρόλο που αποτελούν μοντέλα ατομικής κινητότητας, δημιουργούν πολύ διαφορετικό είδος κίνησης. Το πρώτο εμφανίζει μια δυναμικότητα στην κίνηση, ενώ το δεύτερο δημιουργεί πιο ρεαλιστική κίνηση στις οντότητες του δικτύου, προσεγγίζοντας την πραγματική κίνηση ενός ατόμου σε έναν χώρο. Πρέπει να σημειωθεί ότι προσομοιώθηκαν σενάρια για μεταβλητό μέτρο ταχύτητας κόμβων, μεταβλητό πλήθος κόμβων και μεταβλητό φόρτο δικτύου για διάρκεια προσομοίωσης 1000 sec.

Εκτίμηση της μεταβολής των αποτελεσμάτων ατομικής κινητότητας

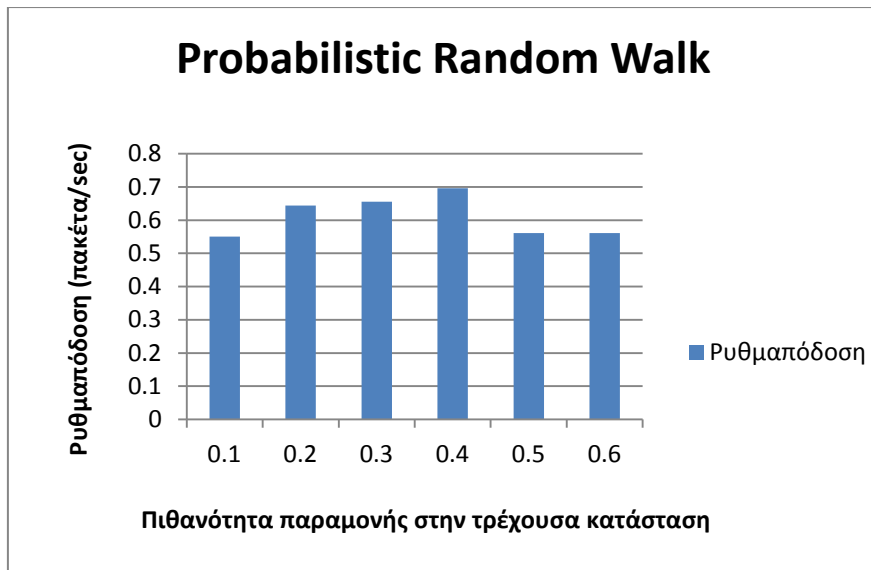
Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής της πιθανότητας παραμονής στην τρέχουσα κατάσταση στο μοντέλο ατομικής κινητότητας Probabilistic Random Walk στα χαρακτηριστικά κίνησης των οντοτήτων του δικτύου αλλά και στην επίδραση που έχουν αυτά

στις επιδόσεις του. Οι πιθανότητες μετάβασης στην προηγούμενη και στην επόμενη κατάσταση θεωρήθηκαν ίσες, με το συνολικό άθροισμα των πιθανοτήτων να είναι 1.

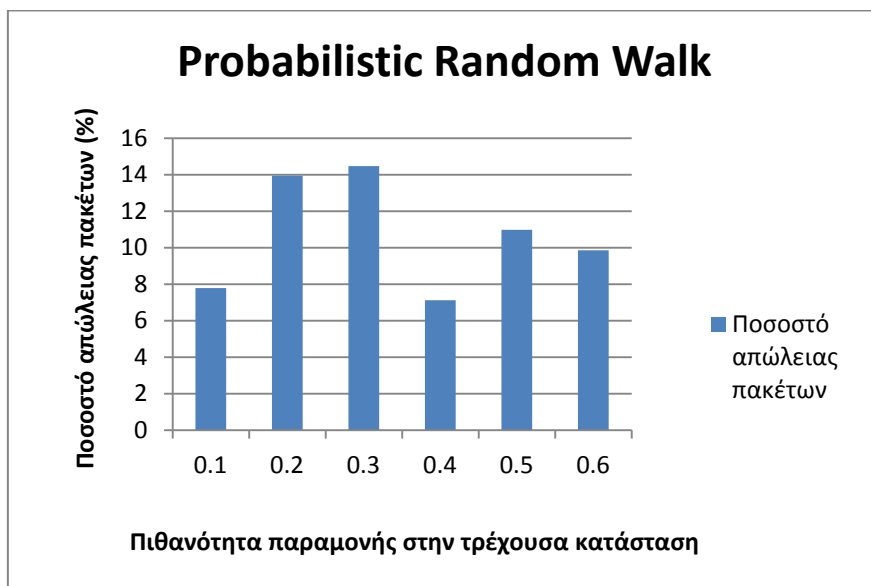
Η κίνηση κάθε κόμβου, εφόσον πρόκειται για μοντέλο ατομικής κίνησης, είναι ανεξάρτητη των υπόλοιπων κόμβων. Το γεγονός αυτό συνεπάγει ότι κάθε κόμβος μπορεί να μεταβαίνει σε οποιαδήποτε κατάσταση κίνησης ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους. Έτσι εάν θεωρήσουμε ότι η πιθανότητα παραμονής στην ίδια κατάσταση είναι 0.8, οι υπόλοιπες πιθανότητες θα είναι αντίστοιχα 0.1 η καθεμία. Επομένως οι περισσότεροι κόμβοι, αν όχι όλοι, θα παρέμεναν στην τρέχουσα κατάσταση κίνησης κινούμενοι στην αρχική τους κατεύθυνση, με αποτέλεσμα να απομακρύνονται ο ένας από τον άλλον. Αυτό θα προκαλούσε συνεχείς μεταβολές των συνδέσεων επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και μελλοντικά ολοκληρωτική διακοπή τους και κατά συνέπεια μετά από ένα χρονικό διάστημα προσομοίωσης να μην εμφανίζει καλές επιδόσεις ο αλγόριθμος δρομολόγησης. Αντίστοιχα στην περίπτωση που θεωρήσουμε πολύ μικρή πιθανότητα παραμονής στην ίδια κατάσταση, η κίνηση γίνεται απρόβλεπτη και πιο χαοτική, αφού κάθε κόμβος ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους θα αλλάζει πορεία, είτε σε επόμενη είτε με προηγούμενη κατεύθυνση (ανάλογα με την κατάσταση που θα μεταβεί) με αποτέλεσμα και στην περίπτωση αυτή να μεταβάλλονται και να διακόπτονται πιο συχνά οι συνδέσεις επικοινωνίας των κόμβων και να μειώνονται οι επιδόσεις αλγορίθμου δρομολόγησης. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι οντότητες του δικτύου εμφανίζουν πιο «ομαλή» κίνηση στην περίπτωση που οι τιμές των πιθανοτήτων διαφέρουν λιγότερο. Οπότε μελετώντας τα αποτελέσματα για τιμές των πιθανοτήτων με τη μικρότερη διαφορά μεταξύ τους, καλύτερος συνδυασμός πιθανοτήτων ήταν (0.3 0.4 0.3). Στην περίπτωση που είχαμε συνδυασμό πιθανοτήτων (0.35 0.3 0.35) δεν εμφάνισε τόσο καλά αποτελέσματα όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα που ακολουθούν. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι για τον ακόλουθο συνδυασμό πιθανοτήτων μετάβασης κατάστασης το δίκτυο παρουσίασε καλύτερες επιδόσεις και περισσότερη σταθερότητα.

Πιθανότητα μετάβασης στην προηγούμενη κατάσταση	0,3
Πιθανότητα παραμονής στην ίδια κατάσταση	0,4
Πιθανότητα μετάβασης στην επόμενη κατάσταση	0,3

Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στα γραφήματα για πιθανότητα παραμονής στην τρέχουσα κατάσταση 0.4 το δίκτυο παρουσίασε καλύτερη ρυθμαπόδοση, μικρότερο ποσοστό απώλειας πακέτων δεδομένων.

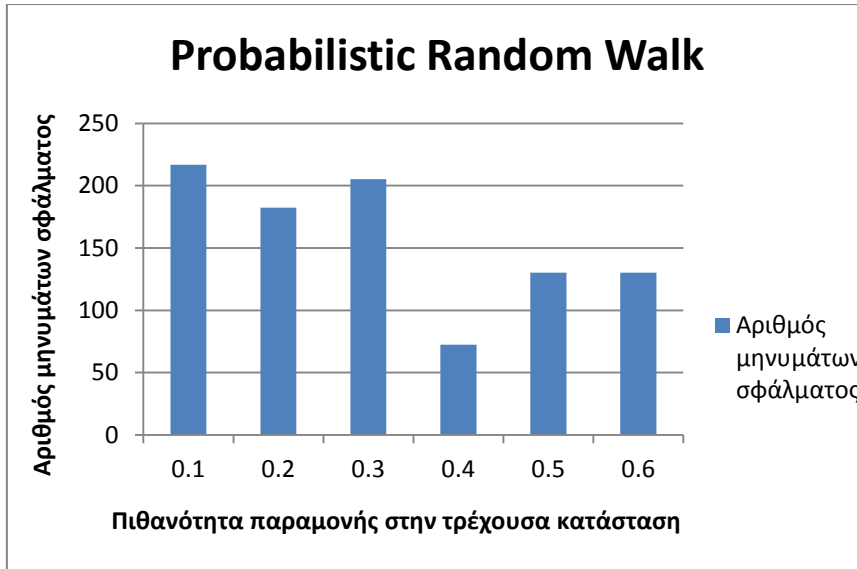


Διάγραμμα 1~ Απεικονίζεται η μεταβολή της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει της πιθανότητας παραμονής στην τρέχουσα κατάσταση. Οι πιθανότητες μετάβασης στην επόμενη και στην προηγούμενη κατάσταση θεωρήθηκαν ίσες με το σύνολο των πιθανοτήτων να είναι 1.



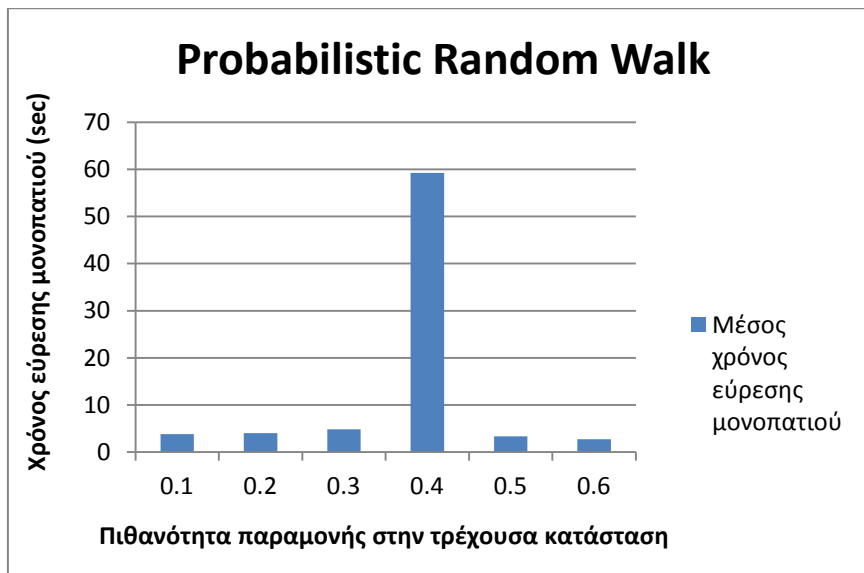
Διάγραμμα 2~ Απεικονίζεται η μεταβολή του ποσοστού απώλειας πακέτων συναρτήσει της πιθανότητας παραμονής στην τρέχουσα κατάσταση. Οι πιθανότητες μετάβασης στην επόμενη και στην προηγούμενη κατάσταση θεωρήθηκαν ίσες με το σύνολο των πιθανοτήτων να είναι 1.

Η διαδικασία αναζήτησης διαδρομής ξεκινάει κάθε φορά που ένας κόμβος δεν γνωρίζει κάποιο γνωστό δρομολόγιο προς τον προορισμό. Η περιπτώσεις στις οποίες διαγράφεται μια εγγραφή ενός δρομολογίου είναι είτε εάν παρέλθει ο χρόνος ζωής της είτε εάν ο αντίστοιχος κόμβος λάβει κάποιο μήνυμα σφάλματος που του υποδεικνύει να την διαγράψει. Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 3 το μοντέλο εμφάνισε ελάχιστο αριθμό μηνυμάτων σφάλματος για πιθανότητα 0.4.



Διάγραμμα 3~ Μεταβολή αριθμού μηνυμάτων σφάλματος ως προς την μεταβολή της πιθανότητας παραμονής στην τρέχουσα κατάσταση. Οι πιθανότητες μετάβασης στην επόμενη και στην προηγούμενη κατάσταση θεωρήθηκαν ίσες με το σύνολο των πιθανοτήτων να είναι 1.

Αυτό σημαίνει ότι για την πιθανότητα 0.4, ο αλγόριθμος δρομολόγησης έκανε τις λιγότερες απόπειρες αναζήτησης διαδρομής εκ των οποίων οι περισσότερες πραγματοποιούνταν στην περίπτωση που διαγράφονταν οι εγγραφές εξαιτίας του χρόνου ζωής τους. Έτσι είναι αναμενόμενο να έχουμε για την αντίστοιχη τιμή πιθανότητας μέγιστο μέσο χρόνο εύρεσης διαδρομής, αφού η διαδικασία αναζήτησης ολοκληρωνόταν μόνο στην περίπτωση που το μήνυμα αίτησης διαδρομής έφτανε στον τελικό προορισμό.

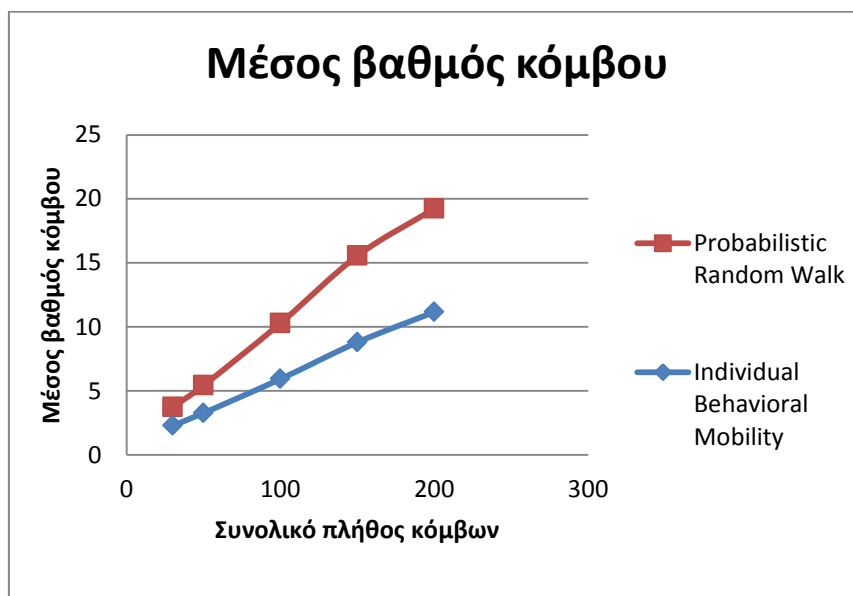


Διάγραμμα 4~ Απεικονίζεται ο μέσος χρόνος εύρεσης μονοπατιού συναρτήσει της πιθανότητας παραμονής στην τρέχουσα κατάσταση. Οι πιθανότητες μετάβασης στην επόμενη και στην προηγούμενη κατάσταση θεωρήθηκαν ίσες με το σύνολο των πιθανοτήτων να είναι 1.

Ο συγκεκριμένος συνδυασμός των πιθανοτήτων μετάβασης κατάστασης χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα υπόλοιπα σενάρια που μελετήθηκαν, ώστε ο Probabilistic Random Walk να έχει τις καλύτερες δυνατές επιδόσεις.

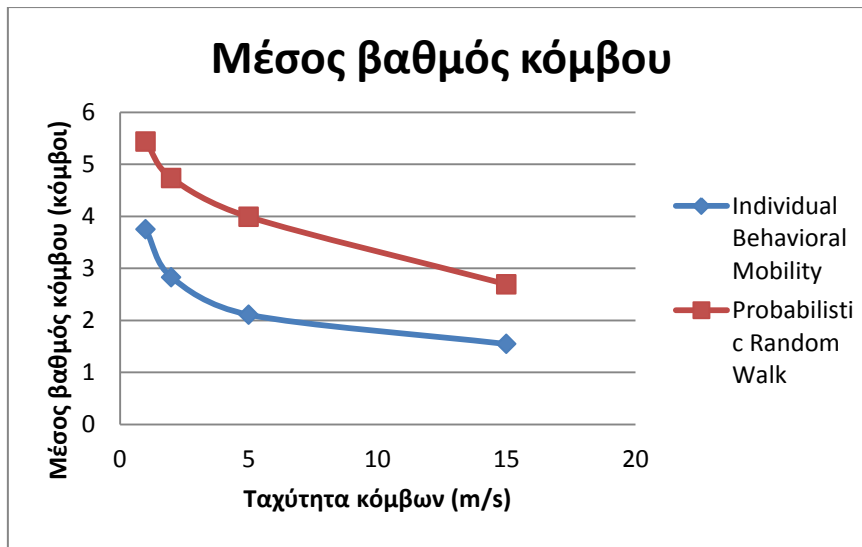
Μέσος βαθμός κόμβου

Ο μέσος βαθμός κόμβου επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από την μεταβολή της θέσης κάθε κόμβου όπως αυτή πραγματοποιείται από το αντίστοιχο μοντέλο κινητότητας. Κάθε κόμβος δεδομένης της θέσης του, ανακαλύπτει τους γειτονικούς του κόμβους με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα αντίστοιχο γράφημα συνδεσιμότητας το οποίο καθορίζει τον μέσο βαθμό κόμβου. Δεδομένου ότι ο αρχικός χώρος προσομοίωσης που τοποθετούνται οι κόμβοι είναι συγκεκριμένων διαστάσεων, μεταβάλλοντας το πλήθος των κόμβων μεταβάλλεται αντίστοιχα και ο μέσος βαθμός κόμβου.



Διάγραμμα 5 ~ Απεικονίζεται η μεταβολή του μέσου βαθμού κόμβου συναρτήσει του συνολικού πλήθους των κόμβων σε χώρο προσομοίωσης σταθερών διαστάσεων.

Αντίστοιχα η μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας κίνησης και για τα δύο μοντέλα ατομικής κίνησης επέδρασε καταλυτικά στην τιμή του μέσου βαθμού κόμβου. Χαρακτηριστικά, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα των κινητών κόμβων η μέση τιμή του βαθμού κόμβου μειώνεται.

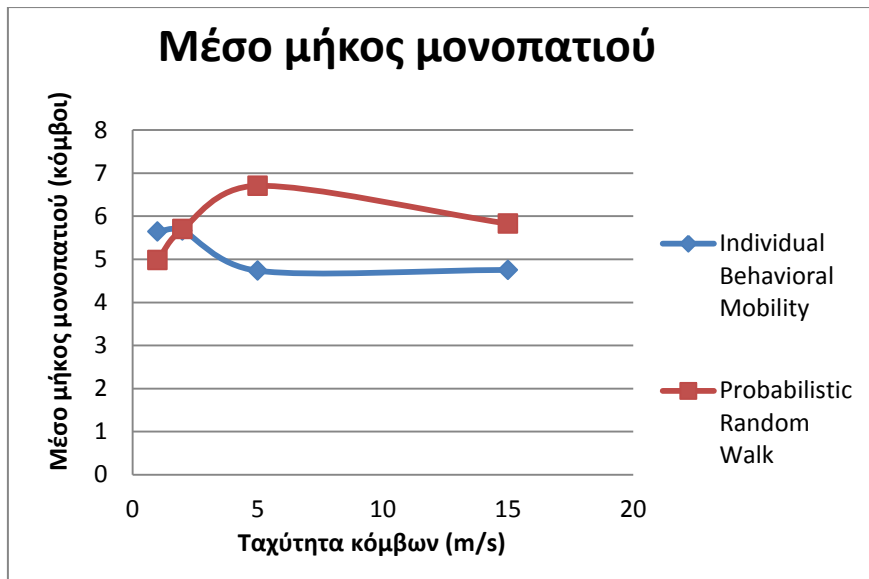


Διάγραμμα 6- Παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου βαθμού κόμβου ως προς την μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων.

Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι με την αύξηση του μέτρου της ταχύτητας οι κόμβοι απομακρύνονται με μεγαλύτερο ρυθμό ο ένας από τον άλλον με αποτέλεσμα να μειώνονται οι γείτονες κάθε κόμβου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο Probabilistic Random Walk, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 5, παρουσιάζει κατά γενική ομολογία μεγαλύτερες τιμές μέσου βαθμού κόμβου συγκριτικά με το Individual Behavioral Mobility.

Μέσο μήκος μονοπατιού

Οι σχετικές θέσεις του ζεύγους αποστολέα-παραλήπτη και η μετατόπισή τους βάσει του μοντέλου ατομικής κινητότητας που εφαρμόζεται παίζουν πολύ βασικό ρόλο στην τιμή του μέσου μήκους μονοπατιού. Όσο πιο κοντά βρίσκονται οι δύο κόμβοι και κινούνται με παρόμοια χαρακτηριστικά, μέτρο ταχύτητας και κατεύθυνση, τόσο πιο σταθερό μήκος μονοπατιού έχουμε.



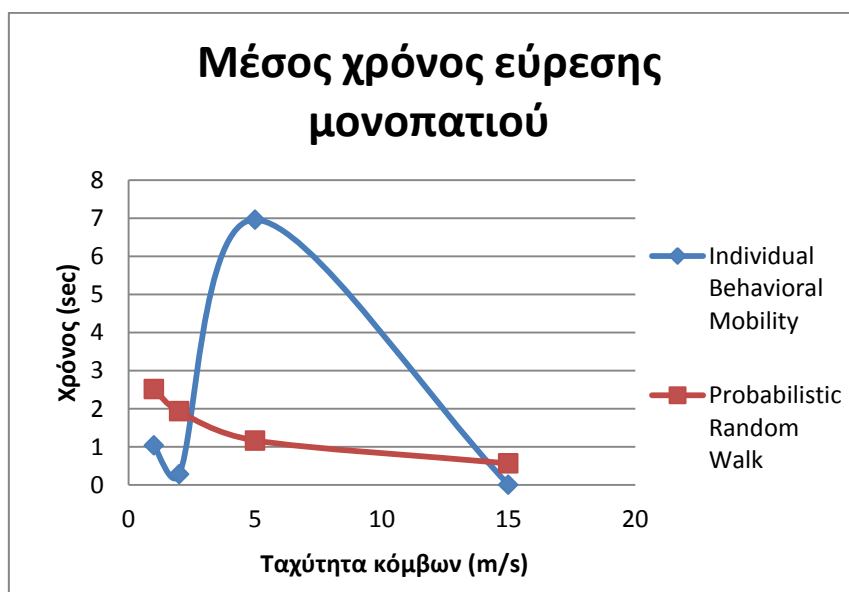
Διάγραμμα 7~ Φαίνεται η μεταβολή του μέσου μήκους μονοπατιού ως προς την μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων.

Όπως φαίνεται και από την σύγκριση των δύο καμπυλών το μοντέλο Individual Behavioral Mobility έχει μικρότερες τιμές μέσου μήκους μονοπατιού, γεγονός που φανερώνει ότι η κίνηση των κόμβων είναι πιο «ομαλή» συγκριτικά με την δυναμική κίνηση που δημιουργεί το Probabilistic Random Walk. Επιπρόσθετα η ιδιότητα του αλγορίθμου δρομολόγησης, να επιδιορθώνει το δίκτυο σε περίπτωση διακοπής της επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων δημιουργώντας εναλλακτικό μονοπάτι επικοινωνίας, παίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της μέσης τιμής του μήκους μονοπατιού. Ο μέσος βαθμός κόμβου επιδρά στην αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης ικανότητας του αλγορίθμου δρομολόγησης, εφόσον όσο μεγαλύτερο βαθμό κόμβου έχουμε τόσο πιο εύκολο είναι να βρει ο αλγόριθμος δρομολόγησης εναλλακτικό μονοπάτι προς τον παραλήπτη των δεδομένων.

Μέσος χρόνος εύρεσης μονοπατιού

Όσον αφορά τον μέσο χρόνο εύρεσης μονοπατιού εξαρτάται κυρίως από την διαδικασία αναζήτησης μονοπατιού του αλγορίθμου δρομολόγησης. Στην αρχή της προσομοίωσης ο χρόνος εύρεσης μονοπατιού παίρνει την μεγαλύτερη τιμή διότι πρόκειται για την πρώτη απόπειρα ανακάλυψης διαδρομής στην οποία κανένας κόμβος δεν γνωρίζει κάποιο δρομολόγιο μέχρι το μήνυμα αίτησης διαδρομής να φτάσει στον προορισμό. Αντίθετα όμως στην επόμενη αναζήτηση διαδρομής, είναι πιο πιθανό κάποιος ενδιάμεσος κόμβος να γνωρίζει κάποιο δρομολόγιο προς τον προορισμό, οπότε ολοκληρώνεται πιο σύντομα η αναζήτηση. Επιπρόσθετα ο μέσος χρόνος εύρεσης μονοπατιού εξαρτάται και από τις απόπειρες αναζήτησης διαδρομής. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, όσο πιο συχνά διαγράφονται εγγραφές των πινάκων δρομολόγησης θα έχουμε και περισσότερες απόπειρες αναζήτησης μονοπατιού. Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, για μέτρο ταχύτητας 1, 2 και 15 m/sec ο Probabilistic Random Walk εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές μέσου χρόνου εύρεσης. Αντίθετα για μέτρο ταχύτητας 5 m/sec ο Individual Behavioral Mobility εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή μέσου χρόνου εύρεσης μονοπατιού. Η υψηλή τιμή μέσου χρόνου εύρεσης

μονοπατιού οφείλεται στο ότι το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχών αποπειρών εύρεσης διαδρομής κατά την ανακάλυψή της, είχαν διαγραφεί οι περισσότερες εγγραφές στους πίνακες δρομολόγησης των κόμβων λόγω της περάτωσης του χρόνου ζωής τους. Αυτό επαληθεύεται και από το γεγονός ότι για την αντίστοιχη ταχύτητα έχουμε λίγα μηνύματα σφάλματος. Στην περίπτωση αυτή όλες οι εγγραφές των πινάκων δρομολόγησης διαγράφονται σχεδόν ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να γίνεται αναζήτηση διαδρομής από την αρχή και να έχουμε πολύ υψηλό μέσο χρόνο εύρεσης διαδρομής.



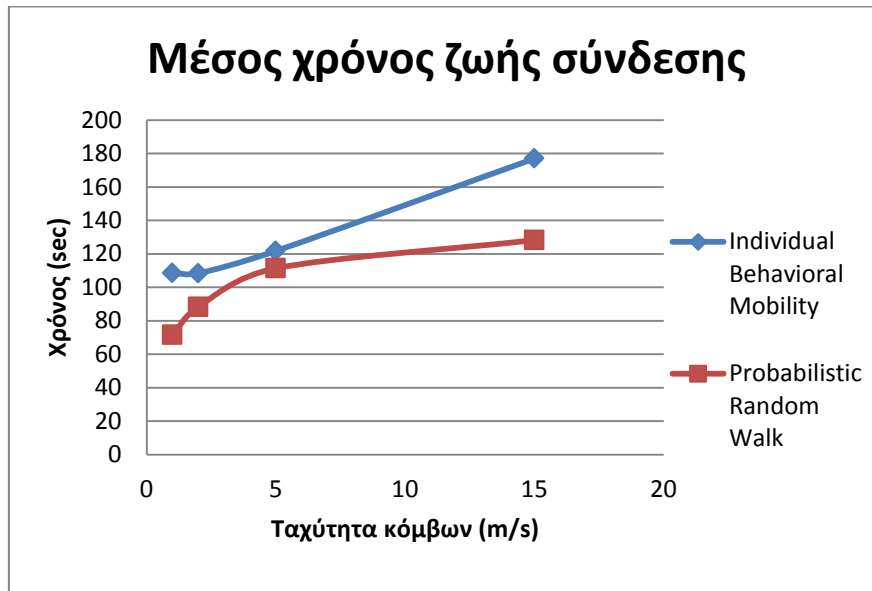
Διάγραμμα 8~ Το διάγραμμα παρουσιάζει την μεταβολή του μέσου χρόνου εύρεσης μονοπατιού ως προς την μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων.

Το ελάχιστο που εμφανίζεται στην καμπύλη του Individual Behavioral Mobility οφείλεται στο πλήθος των επιτυχών αποπειρών αναζήτησης διαδρομής. Στην συγκεκριμένη εκτέλεση της προσομοίωσης το πλήθος αυτό ήταν πολύ μικρότερο. Συμπερασματικά το μοντέλο Individual Behavioral Mobility εμφανίζει μεγαλύτερη σταθερότητα για υψηλές ταχύτητες συγκριτικά με το Probabilistic Random Walk.

Μέσος χρόνος ζωής σύνδεσης

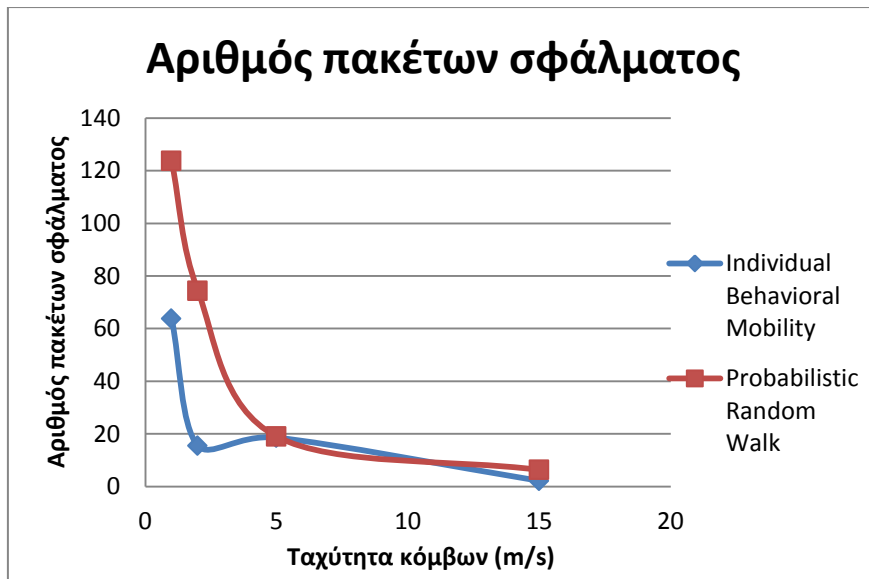
Βασικό χαρακτηριστικό του δικτύου που εξαρτάται και από τον αλγόριθμο δρομολόγησης και από το μοντέλο κινητότητας είναι ο μέσος χρόνος ζωής σύνδεσης. Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή της ενότητας ο μέσος χρόνος ζωής σύνδεσης, είναι η μέση τιμή της χρονικής διάρκειας ύπαρξης εγγραφής δρομολογίου είτε προς την πηγή είτε προς τον προορισμό. Κάθε εγγραφή του πίνακα δρομολόγησης οποιουδήποτε κόμβου έχει έναν χρόνο ζωής. Ο χρόνος αυτός καθορίζεται από το πλήθος των συνδεδεμένων κόμβων στο γράφημα συνδεσιμότητας του δικτύου, ώστε στην περίπτωση που το ζεύγος πηγή-προορισμός είναι οι πιο απομακρυσμένοι κόμβοι, να μπορούν να επικοινωνήσουν. Συνεπώς ο βαθμός κάθε κόμβου, και κατά συνέπεια το μοντέλο κίνησης επηρεάζει κατ' αυτόν τον τρόπο τον χρόνο

ζωής μιας εγγραφής. Καταλυτικό ρόλο παίζει και ο αλγόριθμος δρομολόγησης, εφόσον μια εγγραφή διαγράφεται από έναν πίνακα δρομολόγησης στην περίπτωση που δεν είναι έγκυρη. Η διαγραφή πραγματοποιείται κατά την διαδικασία επιδιόρθωσης του δικτύου με την αποστολή μηνυμάτων σφάλματος.



Διάγραμμα 9 ~ Το διάγραμμα απεικονίζει την μεταβολή του μέσου χρόνου ζωής ως προς το μέτρο της ταχύτητας των κόμβων.

Όπως φαίνεται και στην γραφική παράσταση ο μέσος χρόνος ζωής σύνδεσης του Probabilistic Random Walk είναι μικρότερος συγκριτικά με του Individual Behavioral Mobility, παρόλο που ο μέσος βαθμός κόμβου του πρώτου σε προηγούμενη γραφική παράσταση εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στο πλήθος των μηνυμάτων σφάλματος. Όπως φαίνεται στην συνέχεια για μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων, τα μηνύματα σφάλματος για τον probabilistic random walk είναι πολύ περισσότερα συγκριτικά με του individual behavioral mobility.



Διάγραμμα 10 ~ Παρουσιάζεται η μεταβολή του αριθμού μηνυμάτων σφάλματος συναρτήσει της μεταβολής του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων.

Αριθμός μηνυμάτων σφάλματος

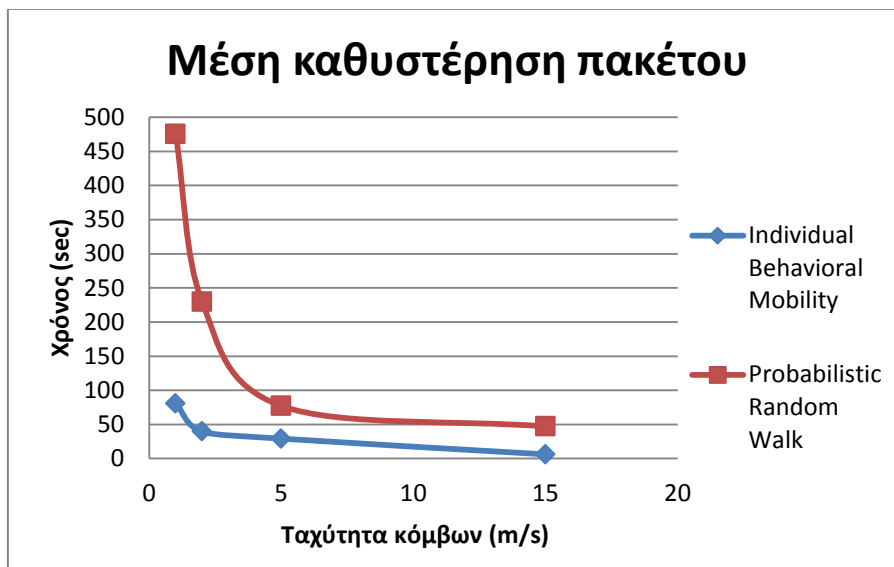
Βασικός παράγοντας που καθορίζει τον αριθμό των μηνυμάτων σφάλματος είναι η σταθερότητα του δικτύου. Ένα δίκτυο θεωρείται σταθερό εάν δεν μεταβάλλονται συχνά οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων και παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα έγκυρες οι εγγραφές δρομολογίων στους πίνακες δρομολόγησης. Στην περίπτωση που μεταβάλλεται η ταχύτητα των κόμβων, μεταβάλλονται και οι συνδέσεις επικοινωνίας, γεγονός που θα έπρεπε να επιφέρει την δημιουργία περισσότερων μηνυμάτων σφάλματος ώστε να επιδιορθωθούν οι μη έγκυρες εγγραφές στους πίνακες δρομολόγησης των κόμβων. Αυτό όμως δεν γίνεται διότι τα μηνύματα σφάλματος δημιουργούνται κατά την ανεπιτυχή εύρεση επόμενου άλματος κατά την προώθηση των δεδομένων προς τον προορισμό. Λόγω της αύξησης του μέτρου της ταχύτητας μειώνεται η ρυθμαπόδοση του δικτύου οπότε στέλνονται λιγότερα πακέτα δεδομένων άρα δημιουργούνται και λιγότερα μηνύματα σφάλματος.

Μέση καθυστέρηση πακέτου

Η μέση καθυστέρηση πακέτου είναι η χρονική διάρκεια από τη στιγμή δημιουργίας ενός πακέτου δεδομένων μέχρι την επιτυχή λήψη του από τον τελικό παραλήπτη. Η συγκεκριμένη παράμετρος επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τον αλγόριθμο δρομολόγησης. Οι υψηλές τιμές καθυστέρησης οφείλονται κυρίως στην αναμονή των πακέτων δεδομένων στην μνήμη της πηγής και των ενδιάμεσων κόμβων κατά την αποστολή τους στον τελικό παραλήπτη. Η μνήμη λειτουργεί με ουρά FIFO, δηλαδή όποιο πακέτο μπαίνει πρώτο να βγαίνει και πρώτο. Επιπλέον η καθυστέρηση πακέτου αυξάνεται δραματικά, λόγω των λειτουργιών ανακάλυψης διαδρομής και επιδιόρθωσης του δικτύου, οι οποίες παρατείνουν την αναμονή των πακέτων στις μνήμες των κόμβων. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\frac{\sum_{i=1}^{packets\ sent} delay}{packets\ sent}$$

Όπου packets sent = throughput · simulation time .Επομένως μέση καθυστέρηση εξαρτάται και από την τιμή της ρυθμαπόδοσης, η οποία καθορίζει τον αριθμό των πακέτων δεδομένων που έφτασαν επιτυχώς στον παραλήπτη.



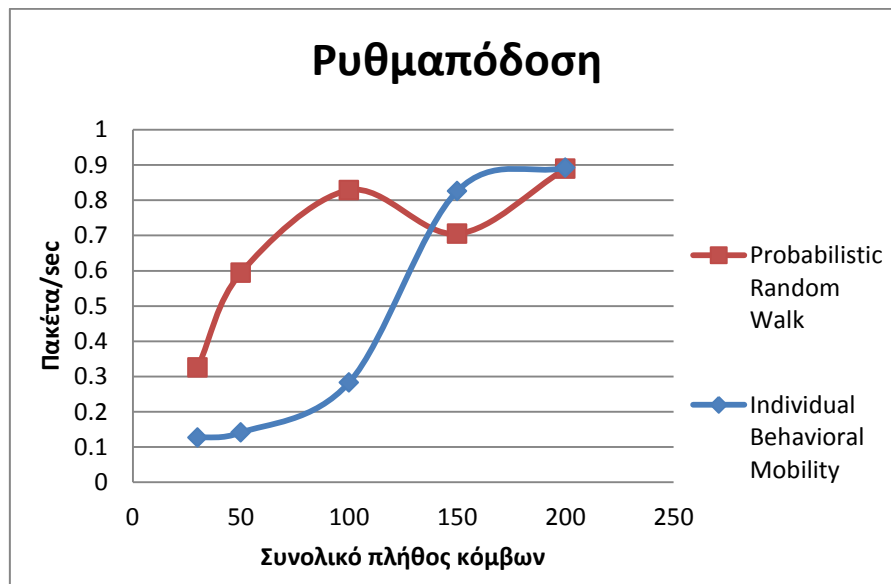
Διάγραμμα 11 ~Απεικονίζεται η μεταβολή της μέσης καθυστέρησης συναρτήσει της μεταβολής του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων.

Στο Διάγραμμα 11 η μείωση της καμπύλης του Probabilistic Random Walk οφείλεται στο πλήθος των πακέτων που έφτασαν επιτυχώς στον παραλήπτη. Τα περισσότερα πακέτα για τιμές ταχύτητας 5-15 m/sec έφτασαν στον παραλήπτη στην αρχή της προσομοίωσης όπου δεν υπήρχαν καθυστερήσεις στην αποστολή τους. Γι' αυτό και πέφτει η μέση καθυστέρηση πακέτου. Για μικρότερες τιμές ταχύτητας στάλθηκαν περισσότερα πακέτα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης όπου είχαμε μεγαλύτερες τιμές καθυστέρησης για τα πακέτα, λόγω της αποστολής μηνυμάτων σφάλματος και διακοπών των συνδέσεων.

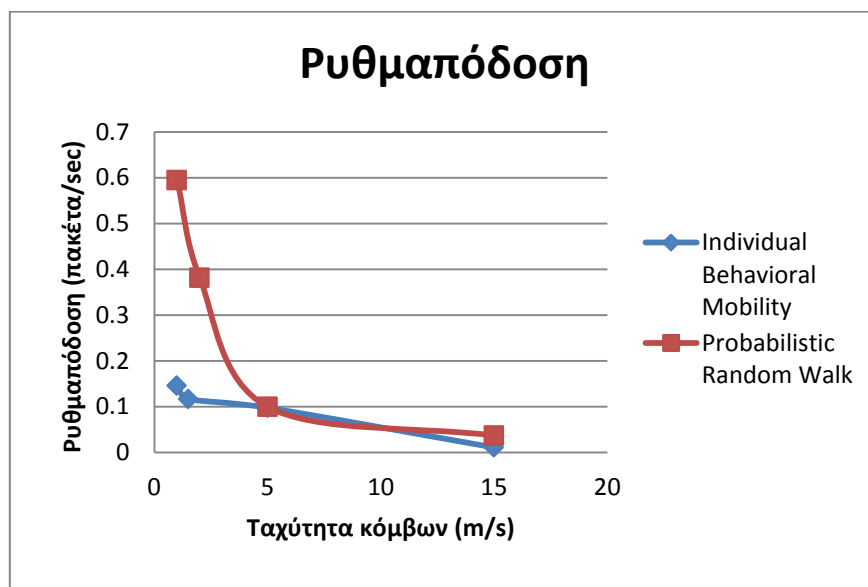
Ρυθμαπόδοση

Οι συχνές μεταβολές στην τοπολογία του δικτύου επιφέρουν μια αστάθεια στο δίκτυο με αποτέλεσμα να μειώνεται η ρυθμαπόδοση του δικτύου. Αυξάνοντας το μέτρο της ταχύτητας παρατηρείται μείωση της ρυθμαπόδοσης στον Probabilistic Random Walk ενώ στον Individual Behavioral Mobility παραμένει σχεδόν σταθερή. Από την άλλη πλευρά, αυξάνοντας το πλήθος των κόμβων του δικτύου αυξάνεται η αποτελεσματικότητα της ιδιότητας του αλγορίθμου δρομολόγησης να επιδιορθώνει και να βελτιστοποιεί το μονοπάτι

δρομολόγησης με αποτέλεσμα να βελτιώνει την ρυθμαπόδοση του δικτύου ανεξάρτητα του μοντέλου ατομικής κινητότητας που εφαρμόζεται.

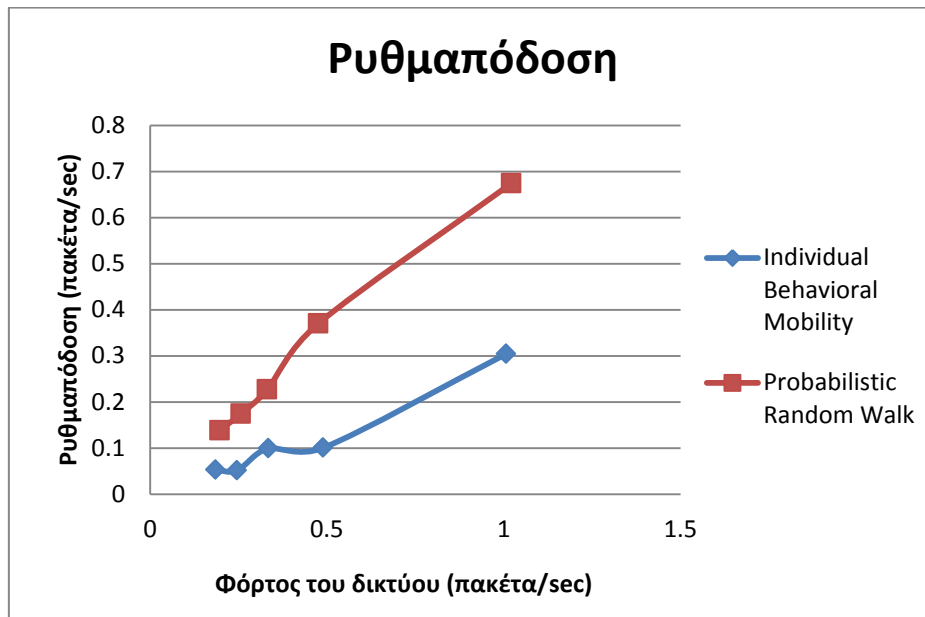


Διάγραμμα 12~ Οι καμπύλες απεικονίζουν πως μεταβάλλεται η ρυθμαπόδοση συναρτήσει του συνολικού πλήθους των κόμβων του δικτύου.



Διάγραμμα 13~ Απεικονίζεται η μεταβολή της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων.

Αντίστοιχα η αύξηση του φόρτου του δικτύου επιφέρει αύξηση της ρυθμαπόδοσης. Εφόσον αυξάνεται ο ρυθμός δημιουργίας πακέτων δεδομένων το δευτερόλεπτο είναι αναμενόμενο να αυξηθεί και ο ρυθμός επιτυχούς αποστολής πακέτων δεδομένων.

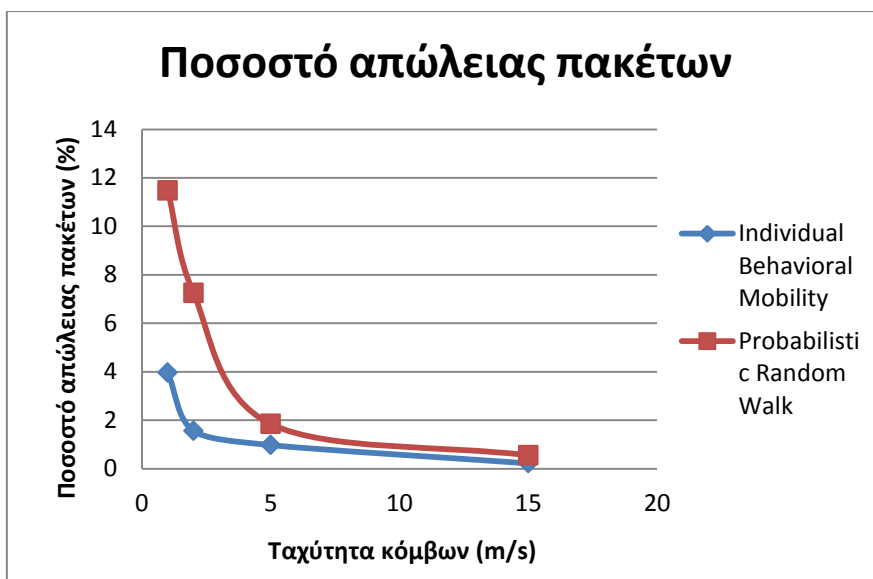


Διάγραμμα 14~ Οι καμπύλες απεικονίζουν την μεταβολή της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του φόρτου του δικτύου.

Ποσοστό απώλειας πακέτων

Το ποσοστό απώλειας πακέτων είναι το ποσοστό των πακέτων δεδομένων που χάθηκαν από το συνολικό πλήθος πακέτων δεδομένων που υπάρχουν στο δίκτυο, είτε αυτά αναμένουν την αποστολή τους στη μνήμη της πηγής ή κάποιου ενδιάμεσου κόμβου, είτε έχουν ληφθεί επιτυχώς από τον παραλήπτη. Επομένως το ποσοστό αυτό εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από την ρυθμαπόδοση και τον φόρτο του δικτύου. Θεωρώντας σταθερή τη τιμή του φόρτου του δικτύου, στην περίπτωση που μειώνεται η ρυθμαπόδοση αυτομάτως μειώνεται και το ποσοστό απώλειας πακέτων δεδομένων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αποστέλλονται όλο και λιγότερα πακέτα δεδομένων το δευτερόλεπτο με αποτέλεσμα τα περισσότερα πακέτα να αναμένουν στην μνήμη της πηγής ή κάποιου ενδιάμεσου κόμβου.

Έτσι ο λόγος $\frac{\text{πακέτα που χάθηκαν}}{\text{συνολικό πλήθος πακέτων}} \cdot 100$ μειώνεται.



Διάγραμμα 15~ Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού απώλειας πακέτων δεδομένων ως προς την μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων.

4.3.2 Ομαδική Κινητότητα

Βασικό χαρακτηριστικό της ομαδικής κινητότητας είναι ότι οι κόμβοι κινούνται κατά ομάδες κίνησης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της επίδρασης του πλήθους των ομάδων στην κίνηση και στις επιδόσεις του αλγόριθμου δρομολόγησης. Τα δύο μοντέλα ομαδικής κινητότητας Column Mobility και Behavioral Group Mobility δημιουργούν τελείως διαφορετική κίνηση στους κόμβους του δικτύου. Το πρώτο μοντέλο ανάλογα με το πλήθος των ομάδων χρηστών, δημιουργεί στήλες από κόμβους παρατεταγμένους στη σειρά, οι οποίοι κινούνται με συγκεκριμένη ταχύτητα, κατεύθυνση και μέτρο, ανάλογα με την ομάδα που ανήκουν. Το δεύτερο μοντέλο από την άλλη πλευρά, επιλέγει κατεύθυνση κίνησης για κάθε ομάδα, και κάθε κόμβος ανάλογα με την ομάδα που ανήκει κινείται προς την αντίστοιχη κατεύθυνση. Επιπρόσθετα δίνει την δυνατότητα στους κόμβους να αποφεύγουν τυχόν συγκρούσεις με άλλους κόμβους, προσδίδοντας έναν πιο ρεαλιστικό χαρακτήρα στην κίνηση. Για κάθε σενάριο μελετήθηκε η επίδραση μόνο μιας μεταβλητής στις επιδόσεις του δικτύου και στην κίνηση, ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές θεωρήθηκαν σταθεροί παράμετροι. Προσομοιώθηκαν σενάρια με τις εξής μεταβλητές: ταχύτητα κόμβων, πλήθος ομάδων, φόρτος δικτύου.

Εκτίμηση της μεταβολής των αποτελεσμάτων ομαδικής κινητότητας

Το μοντέλο ομαδικής κινητότητας Column Mobility δεν περιλαμβάνει τον όρο ταχύτητα. Για κάθε ομάδα κίνησης κατά την ενημέρωση θέσης των κόμβων, υπολογίζεται ένα διάνυσμα μετατόπισης, *advance vector*, από μία τυχαία ομοιόμορφη κατανομή για τα διαστήματα που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.1 και στην συνέχεια υπολογίζεται

προσεγγιστικά το μέτρο της ταχύτητας κίνησης από το μέτρο της μετατόπισης και το χρονικό διάστημα ενημέρωσης θέσης.

Μέσος βαθμός κόμβου

Στην ομαδική κινητικότητα ο μέσος βαθμός κόμβου επηρεάζεται διαφορετικά σε σύγκριση με την ατομική κινητικότητα. Για το ίδιο πλήθος κόμβων, τα μοντέλα ομαδικής κινητικότητας εμφανίζουν υψηλότερες τιμές μέσου βαθμού κόμβου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι κόμβοι που ανήκουν στην ίδια ομάδα έχουν ίδια χαρακτηριστικά κίνησης με αποτέλεσμα να μη μεταβάλλονται τόσο συχνά οι συνδέσεις επικοινωνίας τους, άρα και οι γείτονές τους.

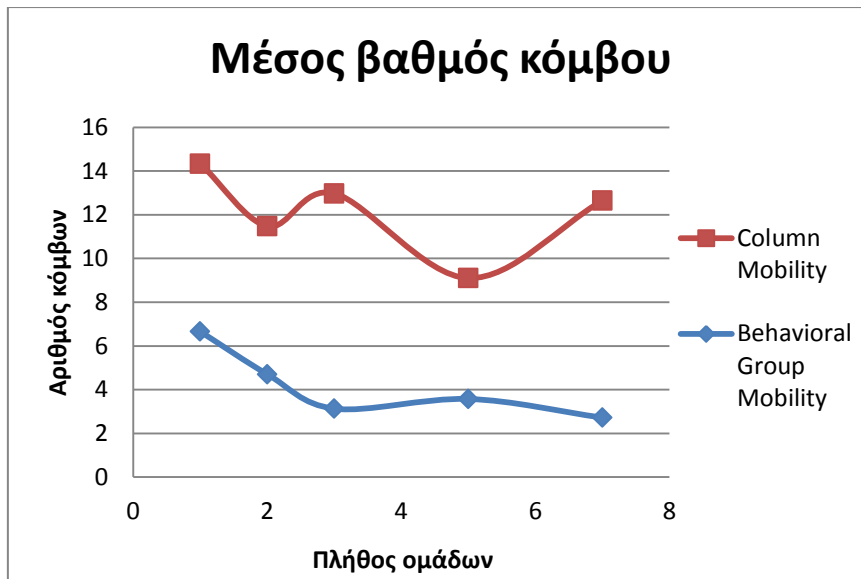
Στο μοντέλο Column Mobility για κάθε ομάδα υπολογίζεται ένα διάνυσμα μετατόπισης, *advance vector*, κοινό για όλα σημεία αναφοράς όλων των κόμβων της ομάδας. Όλα τα σημεία αναφοράς μετατοπίζονται σε κάθε ενημέρωση θέσης, κατά το διάνυσμα αυτό, το οποίο υπολογίζεται από ομοιόμορφη κατανομή για το διάστημα (0,1). Επομένως κάποια σημεία αναφοράς θα μετακινηθούν κατά 1 μέτρο και κάποια καθόλου.

$$RP(t + 1) = RP(t) + \text{advance vector}$$

Αποτέλεσμα ένας κόμβος που ανήκει στην ομάδα με *advance vector* = 0 να κινείται μόνο εξαιτίας του τυχαίου διανύσματος μετατόπισης κόμβου το οποίο προστίθεται στο νέο σημείο αναφοράς.

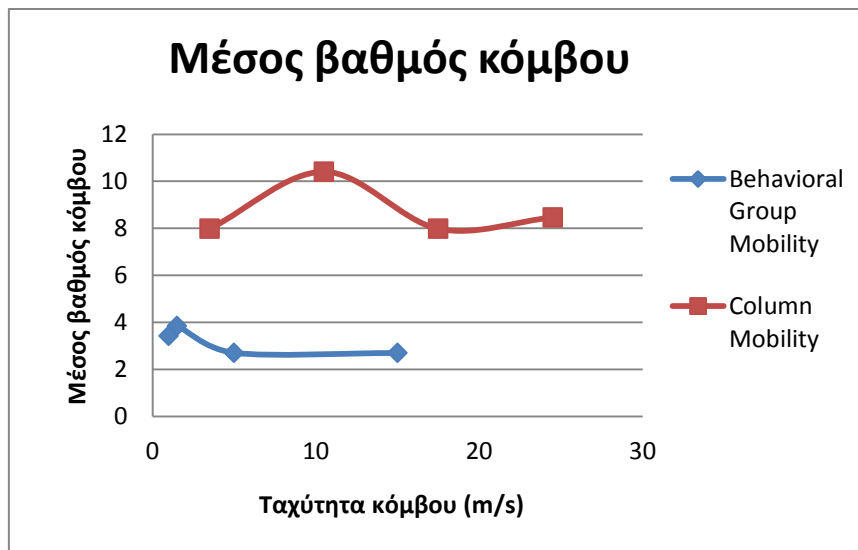
$$\text{node position}(t + 1) = RP(t + 1) + w,$$

όπου w το τυχαίο διάνυσμα μετατόπισης κόμβου, το οποίο υπολογίζεται από γεννήτρια τυχαίας ομοιόμορφης κατανομής για το διάστημα (1,2). Επομένως κάποιες από τις ομάδες τυχαίνει να έχουν όμοια χαρακτηριστικά κίνησης, με αποτέλεσμα να μη μεταβάλλονται σε μεγάλο βαθμό οι συνδέσεις των κόμβων και να έχουμε μεγαλύτερο μέσο βαθμό κόμβου. Γι' αυτό η καμπύλη εμφανίζει τις διακυμάνσεις για 2 και 5 ομάδες. Στις περιπτώσεις αυτές η πλειοψηφία των ομάδων δεν έχει κοινά χαρακτηριστικά κίνησης. Ουσιαστικά κάποιες ακραίες τιμές του μέσου όρου των πολλαπλών προσομοιώσεων για κάθε μέσο βαθμό κόμβου προκαλούν τις συγκεκριμένες διακυμάνσεις της καμπύλης.



Διάγραμμα 16- Γραφική παράσταση μεταβολής του μέσου βαθμού κόμβου ως προς το πλήθος των ομάδων στην ομαδική κινητικότητα.

Συγκριτικά για τα δύο μοντέλα παρατηρούμε ότι το Column Mobility έχει μεγαλύτερες τιμές μέσου βαθμού κόμβου και για μεταβολή του πλήθους των ομάδων και για μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας κίνησης, φαινόμενο που οφείλεται στην διάταξη των κόμβων σε στήλες.

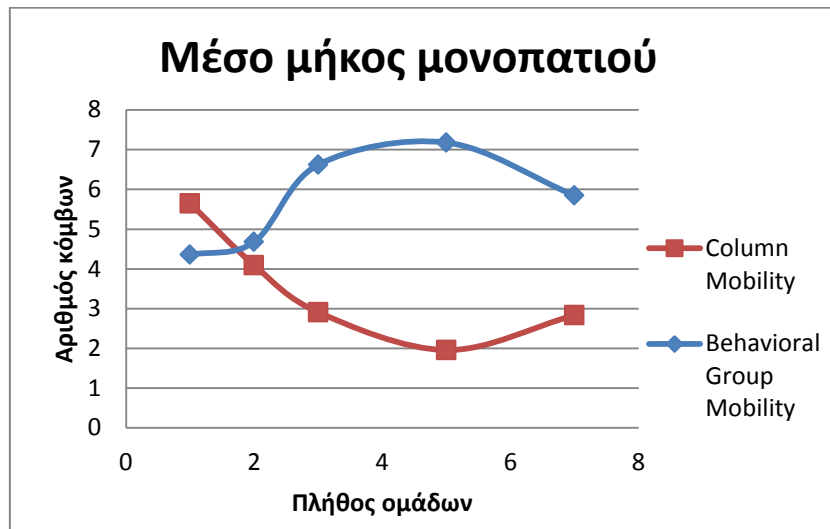


Διάγραμμα 17- Το διάγραμμα απεικονίζει τις καμπύλες μεταβολής του μέσου βαθμού κόμβου για τα μοντέλα ομαδικής κινητικότητας συναρτήσει του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων.

Μέσο μήκος μονοπατιού

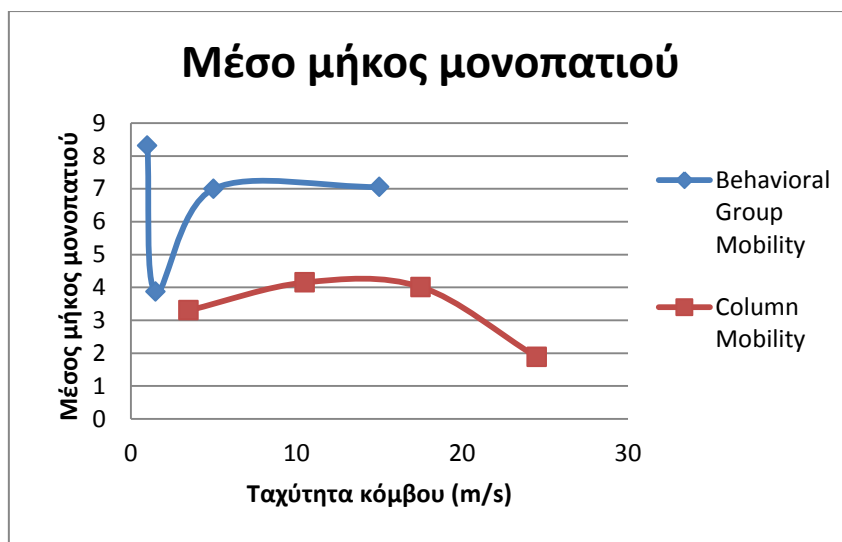
Η εύρεση του μονοπατιού εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου δρομολόγησης. Επιπλέον το μήκος του μονοπατιού εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη. Στην περίπτωση του Column Mobility λόγω της διάταξης που

δημιουργεί παρουσιάζει μικρότερες τιμές μέσου μήκους μονοπατιού σε σύγκριση με τον Behavioral Group Mobility, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 18, παρόλο που το ζευγάρι αποστολέα- παραλήπτη ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες κίνησης. Στο μοντέλο Behavioral Group Mobility όσο αυξάνεται το πλήθος των ομάδων, αυξάνεται και το μέσο μήκος μονοπατιού εξαιτίας του ότι η πηγή και ο προορισμός ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες κίνησης. Μόνο στην περίπτωση των 7 ομάδων παρατηρούμε μια πτώση, που βασίζεται στο ότι τα χαρακτηριστικά κίνησης των ομάδων που ανήκουν η πηγή και ο προορισμός δεν διαφέρουν κατά πολύ, με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερο μήκος μονοπατιού.



Διάγραμμα 18~ Γραφική παράσταση μεταβολής του μέσου μήκους μονοπατιού για τα μοντέλα κίνησης Column Mobility και Behavioral Group Mobility συναρτήσει του πλήθους των ομάδων κίνησης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της ύπαρξης μόνο μιας ομάδας κίνησης το μέσο μήκος μονοπατιού για το Column Mobility εμφανίζει την μέγιστη τιμή του.

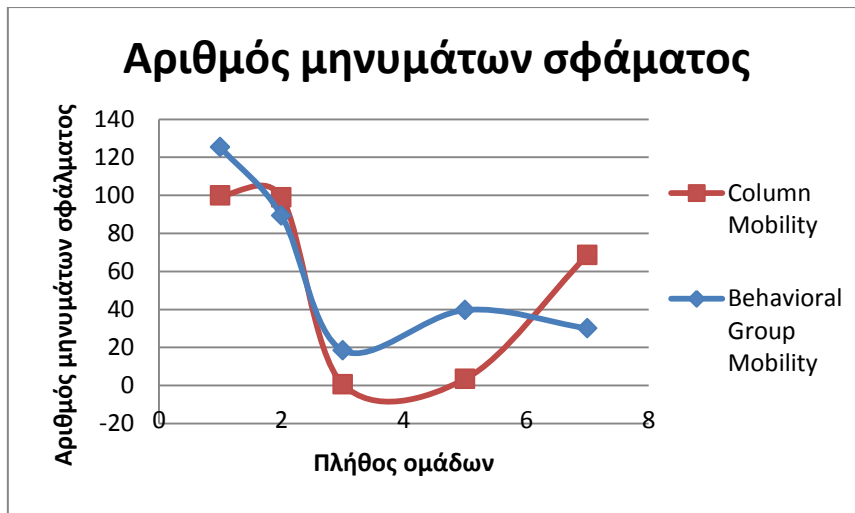


Διάγραμμα 19~ Καμπύλες μεταβολής του μέσου μήκους μονοπατιού ως προς το μέτρο της ταχύτητας των κόμβων.

Μεταβάλλοντας το μέτρο της ταχύτητας των κόμβων, το ελάχιστο που εμφανίζει η καμπύλη του μέσου μήκους μονοπατιού του Behavioral Group Mobility οφείλεται στο γεγονός ότι για το αντίστοιχο μέτρο ταχύτητας έχουμε μεγαλύτερο μέσο βαθμό κόμβου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κόμβου τόσο πιο εύκολο είναι για τον αλγόριθμο δρομολόγησης να βελτιστοποιήσει το μονοπάτι επικοινωνίας αποστολέα – παραλήπτη.

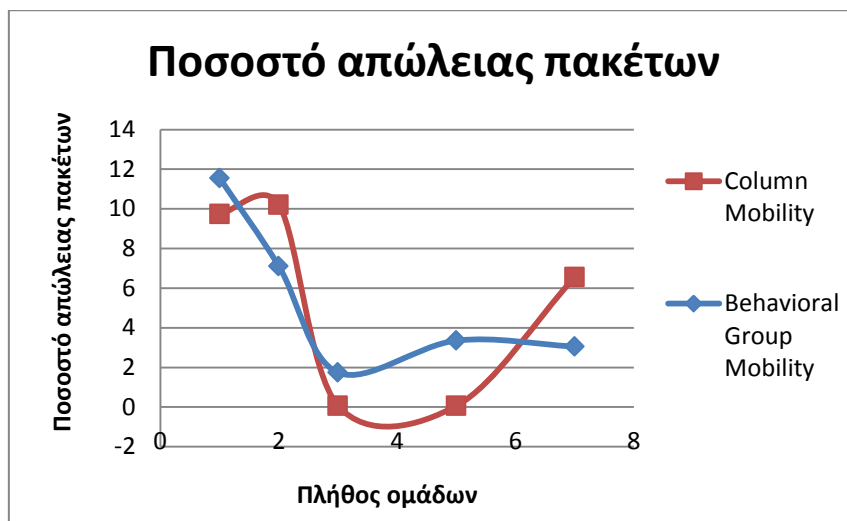
Αριθμός μηνυμάτων σφάλματος και ποσοστό απώλειας πακέτων

Η παραγωγή μηνυμάτων σφάλματος ενεργοποιείται κατά την αποστολή δεδομένων, σε περίπτωση που βρεθεί μη έγκυρη εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης ενός κόμβου. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης για να επιδιορθώσει μια μη έγκυρη εγγραφή δημιουργεί μηνύματα σφάλματος τα οποία στέλνει σε όσους κόμβους κρίνει απαραίτητο, όπως περιγράφεται στο 2^ο Κεφάλαιο. Επομένως η διαδικασία αυτή ξεκινάει στην περίπτωση που επέλθουν αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου, λόγω της κίνησης των κόμβων ή στην περίπτωση που διαγραφούν εγγραφές όταν παρέλθει ο χρόνος ζωής τους. Και για τα δύο μοντέλα παρατηρούμε ότι για πλήθος ομάδων από 1 έως 2 έχουμε αρκετά υψηλές τιμές μηνυμάτων σφάλματος, στη συνέχεια παρατηρείται μια μείωση για πλήθος ομάδων από 3 έως 5 και έπειτα αύξηση για πλήθος ομάδων 7. Η διακύμανση αυτή οφείλεται στο διαφορετικό πλήθος πακέτων δεδομένων που προσπαθεί να στείλει ένας κόμβος για διαφορετικό πλήθος ομάδων. Αυτό γίνεται λόγω του ότι η ενεργοποίηση της δημιουργίας μηνυμάτων σφάλματος γίνεται όταν ένας κόμβος στέλνει ένα πακέτο δεδομένων προς έναν προορισμό που δεν γνωρίζει κάποιο γνωστό δρομολόγιο προς τον προορισμό για να προωθήσει τα δεδομένα.



Διάγραμμα 20~ Μεταβολή του αριθμού μηνυμάτων σφάλματος ως προς το πλήθος των ομάδων.

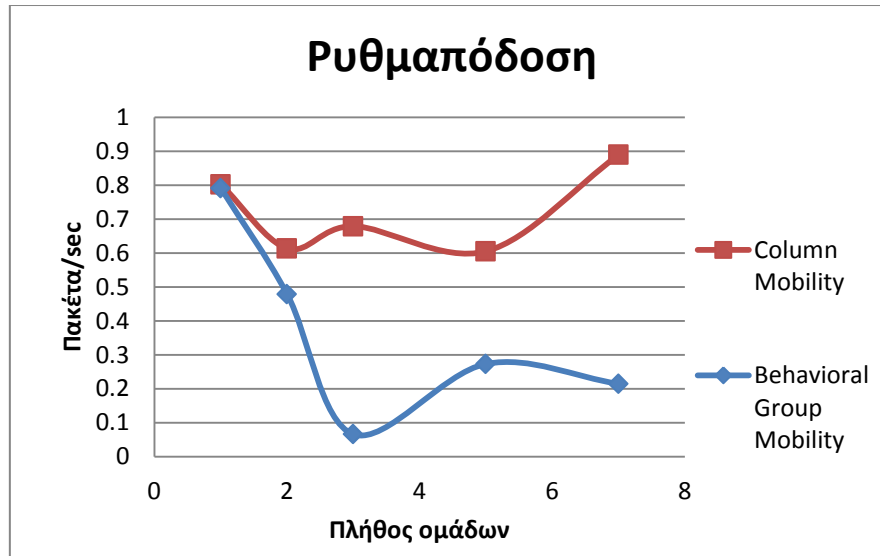
Η μεταβολή των μηνυμάτων σφάλματος έρχεται σε αντιστοιχία με τη μείωση του ποσοστού απώλειας πακέτων, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 21.



Διάγραμμα 21~ Καμπύλες μεταβολής του ποσοστού απώλειας πακέτων δεδομένων ως προς το πλήθος ομάδων κίνησης.

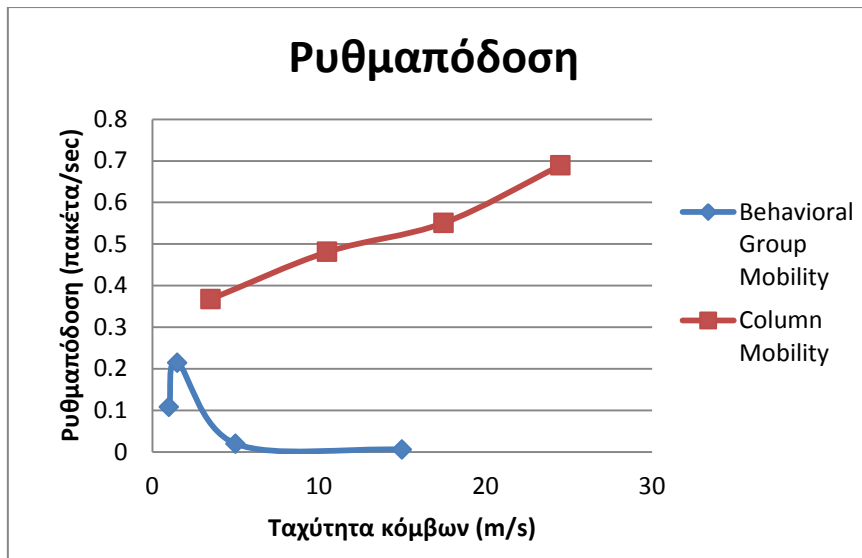
Ο βασικότερος παράγοντας που επιδρά και στα ποσοστά απώλειας πακέτων δεδομένων και στον αριθμό των μηνυμάτων σφάλματος ανεξάρτητα του μοντέλου κινητότητας είναι η ρυθμαπόδοση του δικτύου.

Ρυθμαπόδοση



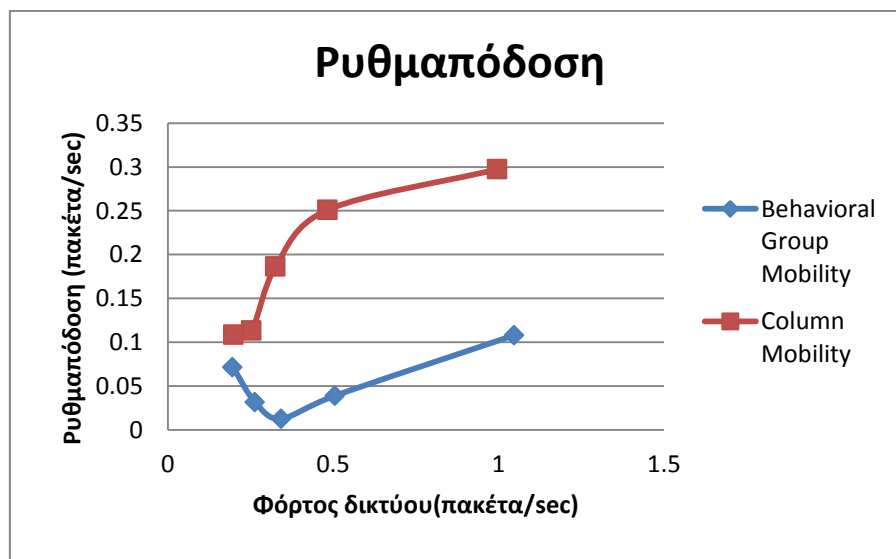
Διάγραμμα 22~ Καμπύλες μεταβολής της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του πλήθους των ομάδων κίνησης για τα μοντέλα Column Mobility και Behavioral Group Mobility.

Όπως φαίνεται καλύτερες επιδόσεις παρουσιάζει το μοντέλο Column Mobility, είτε για την μεταβολή του πλήθους των ομάδων είτε για την μεταβολή του μέτρου της ταχύτητας κίνησης. Η ρυθμαπόδοση του μοντέλου Behavioral Group Mobility μειώνεται με την αύξηση του πλήθους των ομάδων κίνησης, γεγονός που οφείλεται στο ότι ο αποστολέας και ο παραλήπτης ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες. Εξαιτίας της αστάθειας της τοπολογίας του δικτύου, αφού υπάρχουν όλο και περισσότερες ομάδες κίνησης, όλο και περισσότεροι κόμβοι κινούνται με διαφορετικά χαρακτηριστικά οπότε μεταβάλλουν τις συνδέσεις επικοινωνίας τους με τους γειτονικούς τους κόμβους. Η διακύμανση στην καμπύλη του Behavioral Mobility για πλήθος ομάδων 5 με 7 δημιουργείται εξαιτίας μιας ακραίας τιμής στον υπολογισμό του μέσου όρου των πολλαπλών προσομοιώσεων για τις συγκεκριμένες τιμές πλήθους ομάδων, η οποία οφείλεται στο ότι η πηγή και ο προορισμός ανήκαν στην ίδια ομάδα. Όσο για την διακύμανση της καμπύλης του Column Mobility συμβαίνει για παρόμοιο λόγο με την διακύμανση στην καμπύλη του μέσου βαθμού κόμβου.



Διάγραμμα 23~ Απεικόνιση μεταβολής της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του μέτρου της ταχύτητας των κόμβων.

Η μεταβολή της ταχύτητας επιδρά αρνητικά στην ρυθμαπόδοση του δικτύου για το μοντέλο Behavioral Group Mobility σε αντίθεση με το Column Mobility που εμφανίζει ανοδική πορεία. Η διαφοροποίηση αυτή στο μοντέλο Column Mobility αφενός οφείλεται στην διάταξη των κόμβων σε σειρά, αφετέρου προκαλείται και από το γεγονός ότι το διάστημα μετατόπισης για όλες τις ομάδες υπολογίζεται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής για το ίδιο διάστημα, με αποτέλεσμα να μη διαφέρει η κατεύθυνση της ταχύτητας κίνησης όλων των ομάδων. Επομένως σε συνδυασμό της διάταξης και της κατεύθυνσης της ταχύτητας των κόμβων η συνδεσμολογία του δικτύου δεν μεταβάλλεται τόσο πολύ.



Διάγραμμα 24~ Γραφική παράσταση μεταβολής της ρυθμαπόδοσης ως προς τον φόρτο του δικτύου.

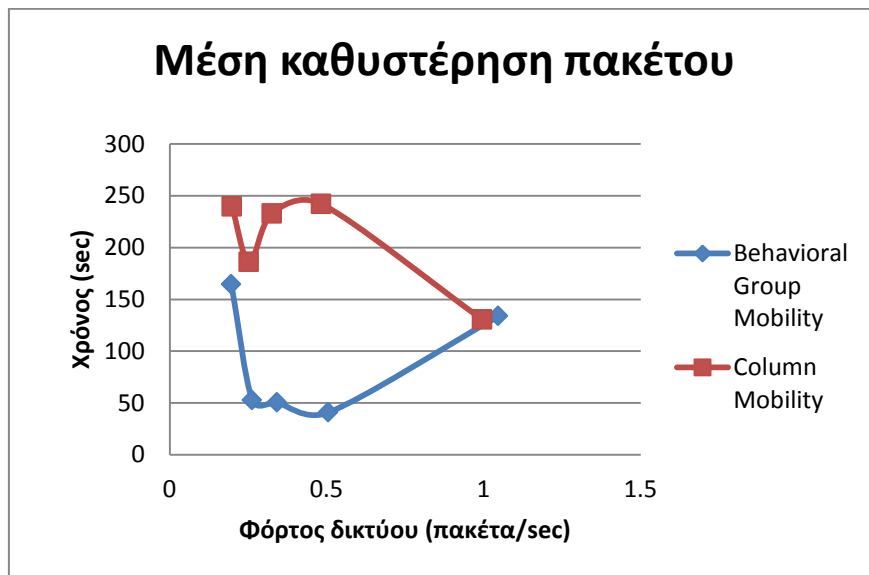
Τέλος ανεξάρτητα του μοντέλου κίνησης, παρατηρείται αύξηση της ρυθμαπόδοσης με την αύξηση του φόρτου του δικτύου, γεγονός αναμενόμενο. Εφόσον αυξάνεται το πλήθος των πακέτων δεδομένων που δημιουργούνται στην πηγή, αυξάνεται και ο αριθμός των πακέτων που φτάνουν επιτυχώς στον παραλήπτη. Και στην περίπτωση αυτή το Column Mobility εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα.

Μέσος χρόνος ζωής σύνδεσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο μέσος χρόνος ζωής σύνδεσης είναι η χρονική διάρκεια ύπαρξης μιας εγγραφής δρομολογίου είτε προς τον προορισμό είτε προς την πηγή. Εξαρτάται από τον πλήθος των κόμβων στο γράφημα συνδεσιμότητας του δικτύου και από το πλήθος των μηνυμάτων σφάλματος. Οπότε για τις περιπτώσεις μεταβολής είτε της ταχύτητας, είτε του πλήθους των ομάδων κίνησης, μεταβάλλεται κατά αντιστοιχία με το μέσο βαθμό κόμβου.

Μέση καθυστέρηση πακέτου

Η καθυστέρηση πακέτου είναι η συνολική χρονική διάρκεια από τη στιγμή της δημιουργίας του πακέτου δεδομένων μέχρι την επιτυχή λήψη του από τον παραλήπτη. Η μέση καθυστέρηση πακέτου εξαρτάται ομοίως με τα μοντέλα ατομικής κινητότητας από την ρυθμαπόδοση του δικτύου.



Διάγραμμα 25- Διάγραμμα μεταβολής της μέσης καθυστέρησης πακέτου ως προς τον φόρτο του δικτύου.

Οι μέγιστες τιμές που παίρνουν και οι δύο καμπύλες οφείλονται στο γεγονός ότι ο φόρτος του δικτύου είναι πολύ μικρός με αποτέλεσμα να μειώνεται η ρυθμαπόδοση, άρα και το πλήθος των πακέτων που έφτασαν επιτυχώς στον προορισμό γι' αυτό και αυξάνεται η μέση καθυστέρηση πακέτου.

4.4 Εκτίμηση αποτελεσμάτων βάσει του φυσικού περιβάλλοντος του δικτύου

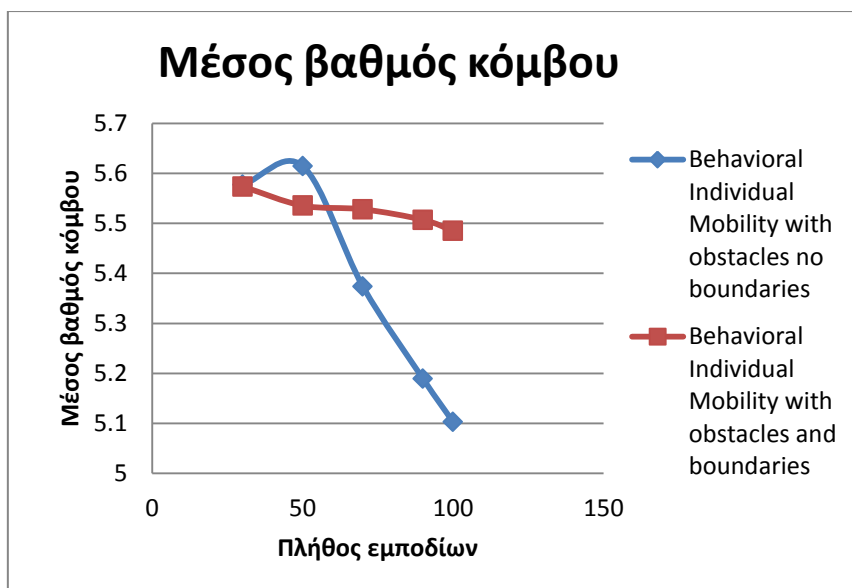
Περιβάλλον και χαρακτηριστικά του δικτύου

Προσομοιώθηκε δίκτυο 50 ασύρματων κινητών κόμβων τοποθετημένων τυχαία σε χώρο διαστάσεων 500 x 500 τετραγωνικά μέτρα. Η εμβέλεια του σήματος κάθε κόμβου ορίστηκε στα 100 μέτρα και η ταχύτητα μετάδοσης θεωρήθηκε 1Mbps. Το μέγεθος των μηνυμάτων ελέγχου και των πακέτων δεδομένων θεωρήθηκε σταθερό στα 1518 bytes και χρόνος μετάδοσής τους στα 0.001447 sec. Μελετήθηκαν σενάρια σχετικά με τον περιβάλλοντα χώρο του δικτύου, με μεταβλητές παραμέτρους το πλήθος των εμποδίων, το ποσοστό απώλειας σήματος επικοινωνίας λόγω παρεμβολής εμποδίου και την ακτίνα των εμποδίων. Το μοντέλο κινητότητας Behavioral Mobility εφαρμόστηκε σε κλειστό και σε ανοιχτό χώρο. Η διάρκεια προσομοίωσης ορίστηκε στα 100 sec. Λόγω των διαστάσεων του χώρου δεν είχε νόημα να μελετηθεί η κίνηση σε ανοιχτό χώρο με εμπόδια για μεγαλύτερη συνολική διάρκεια προσομοίωσης. Τα εμπόδια τοποθετούνται στον αρχικό χώρο που ορίζεται (500 x 500), επομένως στην περίπτωση μεγαλύτερης διάρκειας προσομοίωσης σε ανοιχτό χώρο, οι κόμβοι θα απομακρύνονταν από τον χώρο με τα εμπόδια, με αποτέλεσμα να μην έχει νόημα η μελέτη της κίνησης ως προς το φυσικό περιβάλλον του δικτύου. Αντίστοιχα στην περίπτωση του κλειστού χώρου, λόγω της κίνησης των κόμβων παράλληλα με τον τοίχο στην περίπτωση προσέγγισής του, μετά από κάποια χρονική στιγμή όλοι οι κόμβοι θα αναγκάζονταν να κινούνται παράλληλα στους τοίχους με αποτέλεσμα να συγκεντρωθούν στην ίδια περιοχή του χώρου, φαινόμενο ανούσιο προς μελέτη.

4.4.1 Ατομική κινητότητα με εμπόδια και περιορισμό χώρου

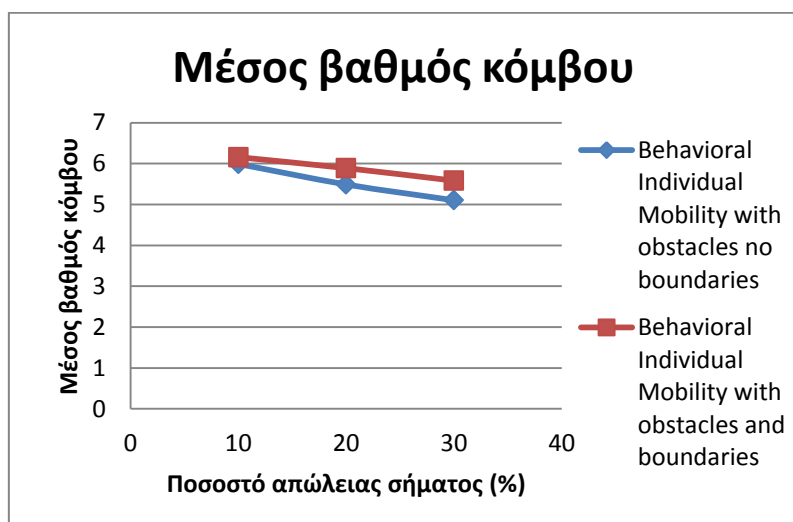
Μέσος βαθμός κόμβου

Ο βαθμός κόμβου όπως ήδη έχουμε αναφέρει και στην μελέτη κινητότητας βάσει του τύπου κίνησης, επηρεάζεται κυρίως από την μεταβολή της θέσης των κόμβων. Στην περίπτωση ύπαρξης εμποδίων, το μοντέλο Individual Behavioral Mobility έχει την δυνατότητα να εκτρέπει την πορεία των κόμβων, αποφεύγοντας την πρόσκρουση με εμπόδια, άλλους κόμβους και τοίχους. Παρατηρούμε ότι ο μέσος βαθμός κόμβου εμφανίζει την ακόλουθη καμπύλη συναρτήσεως του πλήθους των εμποδίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζει η προσομοίωση σε κλειστό χώρο.



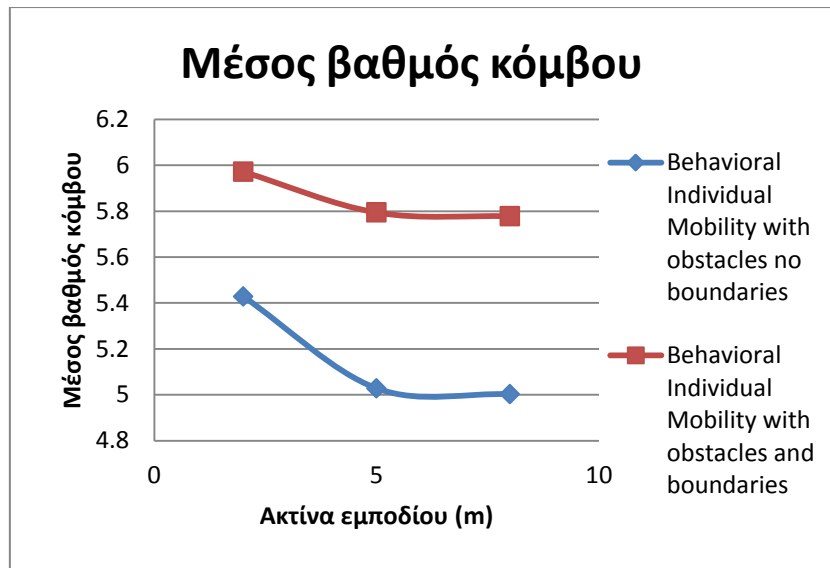
Διάγραμμα 26~ Διάγραμμα μεταβολής του μέσου βαθμού κόμβου ως προς το πλήθος των εμποδίων σε ανοιχτό και κλειστό χώρο.

Όπως φαίνεται η μεταβολή του γραφήματος είναι της τάξης του δεκάτου (10^{-1}). Όπως ήταν αναμενόμενο όσο αυξάνεται το πλήθος των εμποδίων μειώνεται ο μέσος βαθμός κόμβου και στις δύο καμπύλες. Από την άλλη πλευρά η μεταβολή του ποσοστού απώλειας σήματος έχει πολύ μικρότερη επίδραση στον μέσο βαθμό κόμβου όπως φαίνεται και στο ακόλουθο γράφημα.



Διάγραμμα 27 ~ Γράφημα μεταβολής του μέσου βαθμού κόμβου συναρτήσει του ποσοστού απώλειας σήματος επικοινωνίας λόγω παρεμβολής εμποδίου για 30 εμπόδια συνολικό πλήθος εμποδίων .

Και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής του μοντέλου Individual Behavioral Mobility εμφανίζεται μείωση του μέσου βαθμού κόμβου. Ομοίως και για την μεταβολή της ακτίνας των εμποδίων, είτε στην περίπτωση του ανοιχτού είτε στον κλειστό χώρο παρατηρείται μείωση του μέσου βαθμού κόμβου.

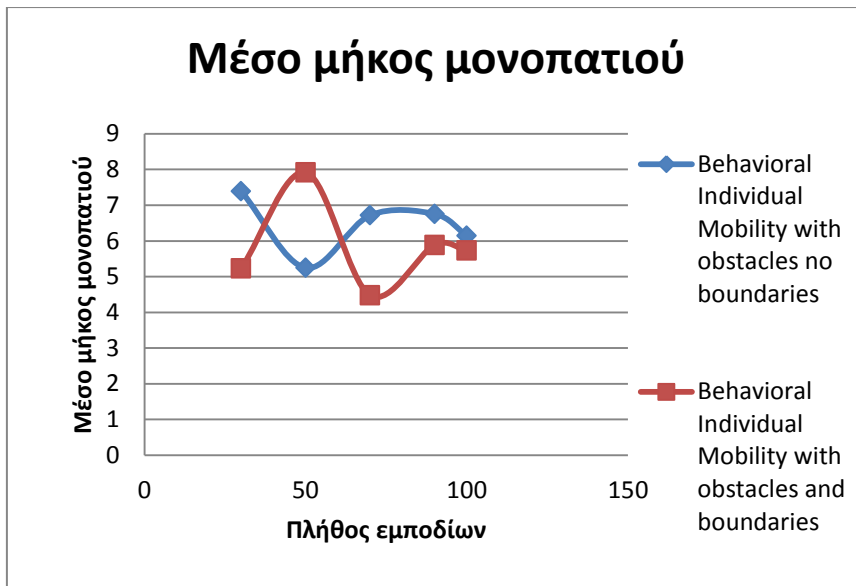


Διάγραμμα 28 ~ Το γράφημα απεικονίζει τις καμπύλες μεταβολής του μέσου βαθμού κόμβου για εφαρμογή του μοντέλου *Individual Behavioral Mobility* σε ανοιχτό και κλειστό χώρο συναρτήσει της ακτίνας των εμποδίων. Το συνολικό πλήθος των εμποδίων στον χώρο είναι 30 εμπόδια.

Όσο αυξάνεται η ακτίνα του εμποδίου είναι πιο εύκολο να παρεμβάλει κάποιο εμπόδιο στην επικοινωνία με αποτέλεσμα να μειώνονται οι συνδέσεις του γραφήματος συνδεσιμότητας του δικτύου και κατά συνέπεια να μειώνεται το αποτέλεσμα. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 28 έχουμε μεγαλύτερες τιμές μέσου βαθμού κόμβου στην περίπτωση κλειστού χώρου. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην παράλληλη κίνηση των κόμβων όταν προσεγγίζουν έναν τοίχο, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται πολύ κοντά ο ένας με τον άλλον.

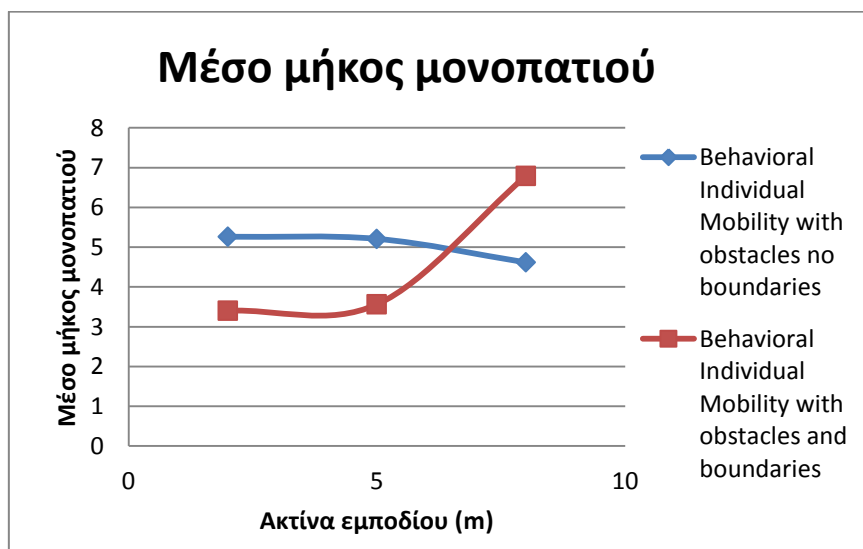
Μέσο μήκος μονοπατιού

Το μήκος του μονοπατιού μεταβάλλεται σε αντιστοιχία με τη μεταβολή των συνδέσεων των κόμβων. Όταν μειώνονται οι συνδέσεις επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και μειώνεται ο αριθμός των γειτόνων κάθε κόμβου τότε αυξάνεται το μέσο μήκος μονοπατιού. Αυτό γίνεται γιατί ο αλγόριθμος δρομολόγησης λόγω του μηχανισμού επιδιόρθωσης κατορθώνει να βρει μονοπάτι επικοινωνίας μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη με μεγαλύτερο πλήθος αλμάτων.



Διάγραμμα 29~ Απεικονίζεται η μεταβολή του μέσου μήκους μονοπατιού συναρτήσει του πλήθους των εμποδίων σε ανοιχτό και κλειστό χώρο.

Το ελάχιστο της καμπύλης Individual Behavioral Mobility with obstacles no boundaries για 50 εμπόδια οφείλεται στην αύξηση του μέσου βαθμού κόμβου στην αντίστοιχη τιμή πλήθους εμποδίων. Όσον αφορά τις διακυμάνσεις της καμπύλης του μοντέλου στον κλειστό χώρο, οφείλονται στην μεταβολή της απόστασης μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Όταν η πηγή και ο προορισμός προσεγγίσουν τους τοίχους και κινούνται παράλληλα με αυτούς, η μεταξύ τους απόσταση ουσιαστικά καθορίζει το μήκος του μονοπατιού. Το μέσο μήκος μονοπατιού στην περίπτωση μεταβολής της ακτίνας των εμποδίων μεταβάλλεται όπως φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα.

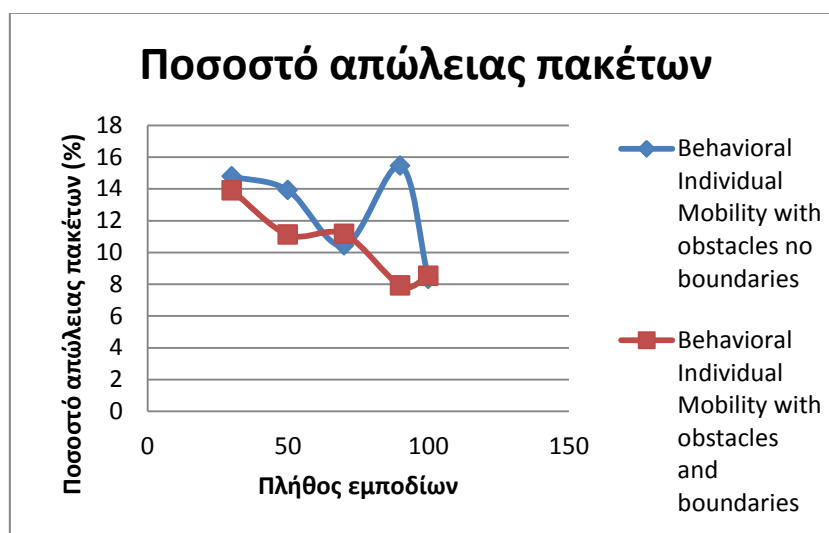


Διάγραμμα 30 ~ Μεταβολή μέσου μήκους μονοπατιού ως προς την ακτίνα του εμποδίου

Στην περίπτωση του ανοιχτού χώρου δεν παρουσιάζεται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή στο μέσο μήκος μονοπατιού . Από την άλλη πλευρά στην περίπτωση του κλειστού χώρου ενώ για ακτίνα εμποδίου 2-5 μέτρα το μέσο μήκος μονοπατιού παραμένει σταθερό, για ακτίνα εμποδίου 8 μέτρα αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει διότι μεγαλώνουν τα εμπόδια, μεγαλώνει και η κλίση της κίνησης των κόμβων ώστε να κινηθούν γύρω από τα εμπόδια και σε συνδυασμό με την παράλληλη κίνηση στον τοίχο να αυξάνεται η απόσταση μεταξύ του ζεύγους πηγής προορισμού, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μέγιστο μέσο μήκος μονοπατιού.

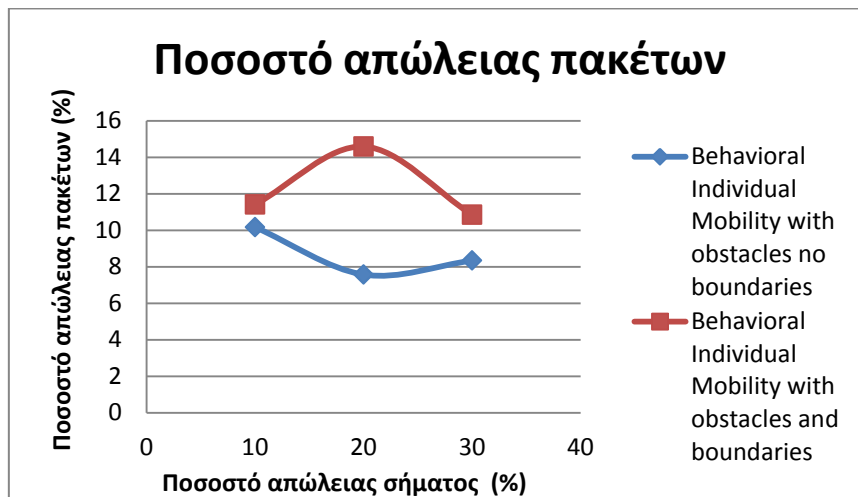
Ποσοστό απώλειας πακέτων

Κατά την μελέτη του ποσοστού απώλειας παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται στην περίπτωση του ανοιχτού χώρου για την μεταβολή του πλήθους των εμποδίων και το αντίστροφο για την μεταβολή του ποσοστού απώλειας σήματος.



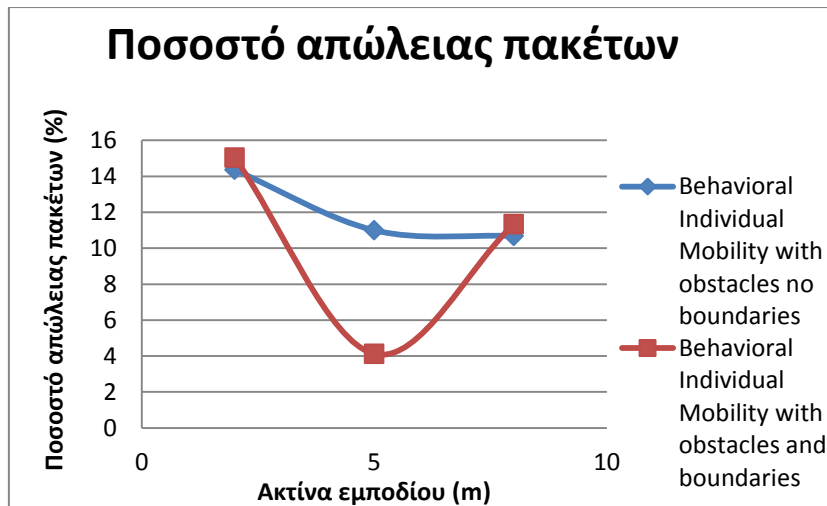
Διάγραμμα 31~ Γραφική παράσταση μεταβολής του ποσοστού απώλειας πακέτων ως προς το πλήθος των εμποδίων.

Η μεταβολή του ποσοστού απώλειας πακέτων δεδομένων στο Διάγραμμα 31 οφείλεται στην μεταβολή της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του πλήθους των εμποδίων. Ουσιαστικά το διαφορετικό πλήθος των πακέτων που στάλθηκαν επιτυχώς επιδρά στην διακύμανση του ποσοστού απώλειας πακέτων.



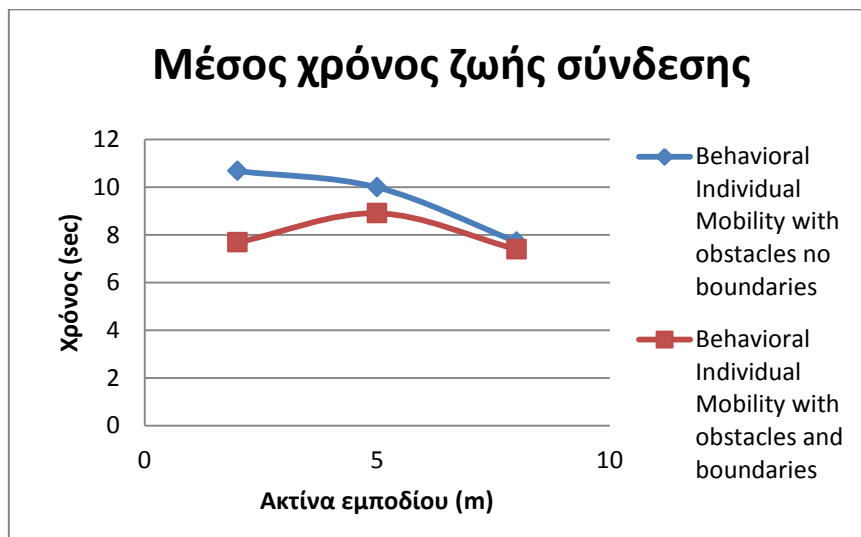
Διάγραμμα 32~ Απεικονίζονται οι καμπύλες μεταβολής του ποσοστού απώλειας πακέτων ως προς το ποσοστό απώλειας σήματος. Το συνολικό πλήθος των εμποδίων στην προσομοίωση αυτή ήταν 30 εμπόδια.

Τα αποτελέσματα του παραπάνω γραφήματος είναι αναμενόμενα στην περίπτωση του κλειστού χώρου με εμπόδια. Η κίνηση των κόμβων γίνεται πιο σύνθετη και έτσι όλο και περισσότερες συνδέσεις διακόπτονται με αποτέλεσμα να χάνονται περισσότερα πακέτα. Η πτώση της καμπύλης του Individual Behavioral Mobility with obstacles and boundaries για ποσοστό απώλειας σήματος 30% δεν οφείλεται στην τιμή του ποσοστού απώλειας σήματος αλλά στην πτώση της ρυθμαπόδοσης στην αντίστοιχη τιμή του ποσοστού απώλειας σήματος. Αποστέλλονται όλο και λιγότερα πακέτα δεδομένων το δευτερόλεπτο με αποτέλεσμα τα περισσότερα πακέτα να αναμένουν στην μνήμη της πηγής. Έτσι ο λόγος $\frac{\text{πακέτα που χάθηκαν}}{\text{συνολικό πλήθος πακέτων}} \cdot 100$ μειώνεται.



Διάγραμμα 33~ Καμπύλες μεταβολής του ποσοστού απώλειας πακέτων δεδομένων συναρτήσει της ακτίνας των εμποδίων για συνολικό πλήθος εμποδίων 30 εμπόδια.

Στο Διάγραμμα 33 το ελάχιστο που εμφανίζει η περίπτωση του Behavioral Individual Mobility with obstacles and boundaries οφείλεται στην προσαρμοστικότητα του αλγορίθμου δρομολόγησης. Στην αντίστοιχη τιμή ακτίνας εμποδίου έστειλε ελάχιστα μηνύματα σφάλματος, όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 35, αφού οι εγγραφές στους πίνακες δρομολόγησης είχαν τον κατάλληλο χρόνο ζωής ώστε να διαγραφούν χωρίς την αποστολή μηνυμάτων σφάλματος. Η μεταβολή του μέσου χρόνου ζωής σύνδεσης φαίνεται στην συνέχεια.



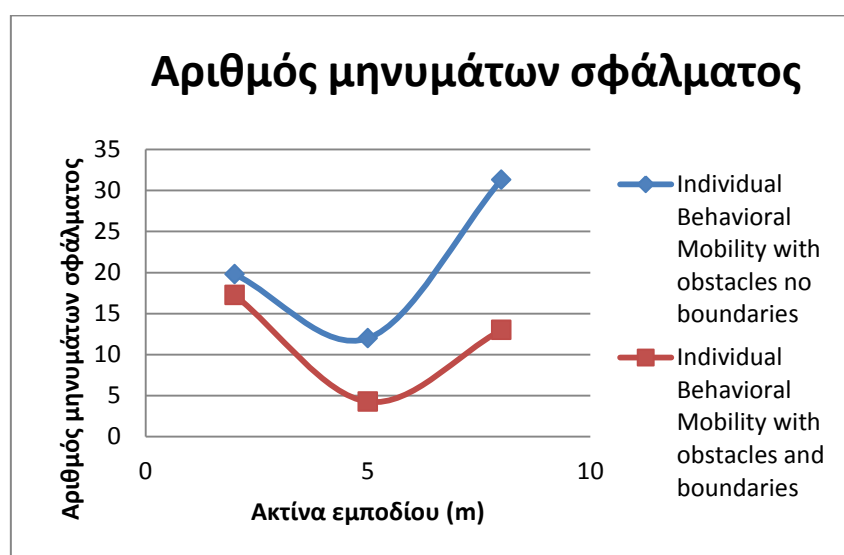
Διάγραμμα 34 ~ Απεικονίζεται η μεταβολή του μέσου χρόνου ζωής σύνδεσης συναρτήσει της ακτίνας του εμποδίου για συνολικό πλήθος 30 εμποδίων στον χώρο προσομοίωσης.

Για μήκος ακτίνας εμποδίου 5 μέτρα παρατηρείται αύξηση του μέσου χρόνου ζωής σύνδεσης στην προσομοίωση σε κλειστό χώρο. Όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος χρησιμοποίησε τον κατάλληλο χρόνο ζωής των εγγραφών στον πίνακα δρομολόγησης με

αποτέλεσμα να μειωθούν τα μηνύματα σφάλματος για την αντίστοιχη τιμή ακτίνας εμποδίου. Για ακτίνα μήκους 8 μέτρων παρατηρούμε ότι μειώθηκε και στις δύο καμπύλες ο μέσος χρόνος ζωής σύνδεσης γεγονός που οφείλεται στην αποστολή περισσότερων μηνυμάτων σφάλματος όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 35.

Αριθμός μηνυμάτων σφάλματος

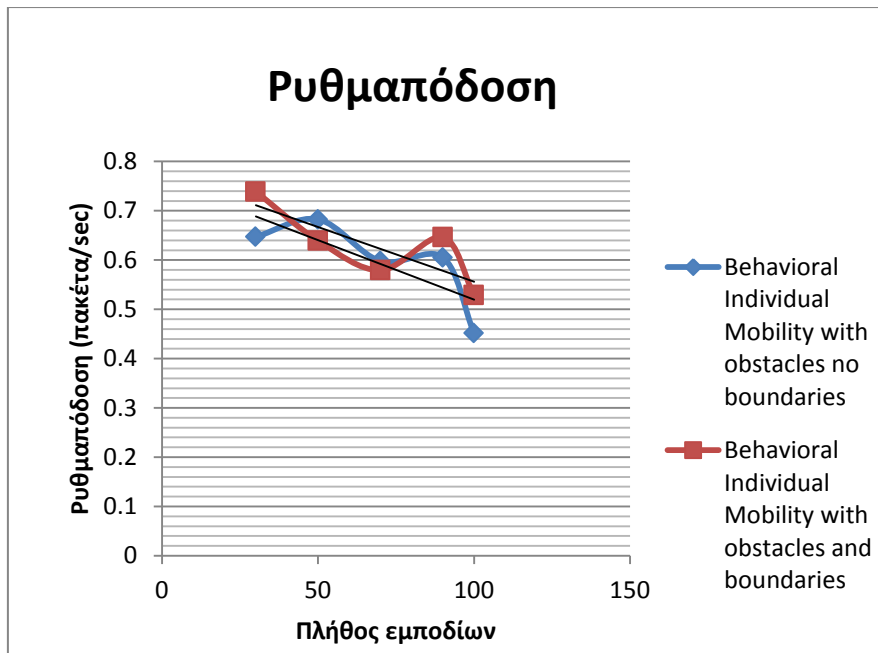
Λόγω της φύσης του μοντέλου κίνησης να αποφεύγεται η πρόσκρουση σε εμπόδια και τοίχο και λόγω της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου δρομολόγησης να αντιμετωπίζει αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου με αποστολή μηνυμάτων σφάλματος, παρατηρούμε ότι αυξάνονται τα μηνύματα σφάλματος κατά την αύξηση της ακτίνας των εμποδίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι περισσότερα μηνύματα σφάλματος αποστέλλονται στην περίπτωση του ανοιχτού χώρου. Το ελάχιστο για μήκος ακτίνας 5 μέτρα οφείλεται στην κατάλληλη επιλογή χρόνου ζωής των εγγραφών, με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η αποστολή μηνυμάτων σφάλματος στους προηγούμενους κόμβους του μονοπατιού, και να ξεκινάει από μόνος του ο μηχανισμός ανακάλυψης διαδρομής.



Διάγραμμα 35~ Η γραφική παράσταση παρουσιάζει την μεταβολή του αριθμού των μηνυμάτων σφάλματος ως προς την ακτίνα των εμποδίων για συνολικό πλήθος εμποδίων 30 εμπόδια.

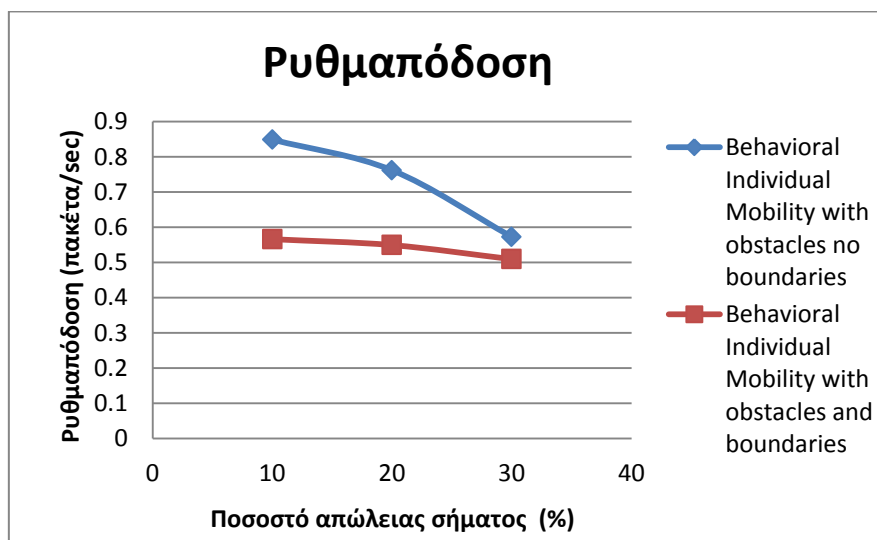
Ρυθμαπόδοση

Όπως ήταν αναμενόμενο με την αύξηση των εμποδίων παρατηρήθηκε μείωση της ρυθμαπόδοσης. Παρόλο που ο αλγόριθμος δρομολόγησης περιλαμβάνει μηχανισμούς επιδιόρθωσης του δικτύου σε περίπτωση διακοπών, δεν κατάφερε να αποτρέψει την μείωση της ρυθμαπόδοσης.



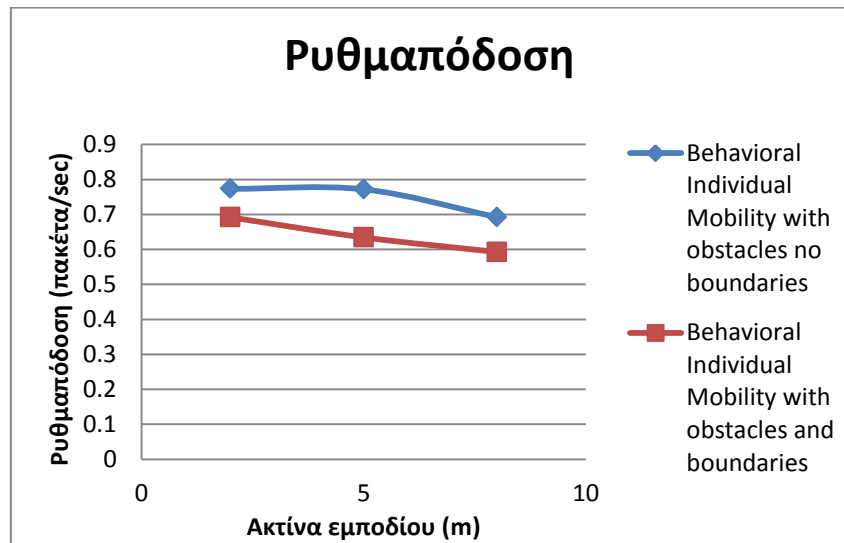
Διάγραμμα 36~ Το διάγραμμα απεικονίζει την μεταβολή της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του πλήθους των εμποδίων σε ανοιχτό και κλειστό χώρο προσομοίωσης.

Το μέγιστο που εμφανίζεται για τα 50 εμπόδια οφείλεται στον μέγιστο μέσο βαθμό κόμβου για την αντίστοιχη τιμή εμποδίων στην εφαρμογή του μοντέλου Individual Behavioral Mobility with obstacles no boundaries. Ομοίως στην περίπτωση της μεταβολής του ποσοστού απώλειας του σήματος, παρατηρείται μείωση της ρυθμαπόδοσης όπως φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα.



Διάγραμμα 37~ Διάγραμμα μεταβολής της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του ποσοστού απώλειας σήματος για συνολικό πλήθος εμποδίων 30 εμπόδια.

Κατά την μεταβολή του μεγέθους των εμποδίων, αυξάνοντας την ακτίνα τους, η ρυθμαπόδοση και στις δύο εφαρμογές του μοντέλου κίνησης σε κλειστό και ανοιχτό χώρο, παρουσίασε ελάχιστη μεταβολή.

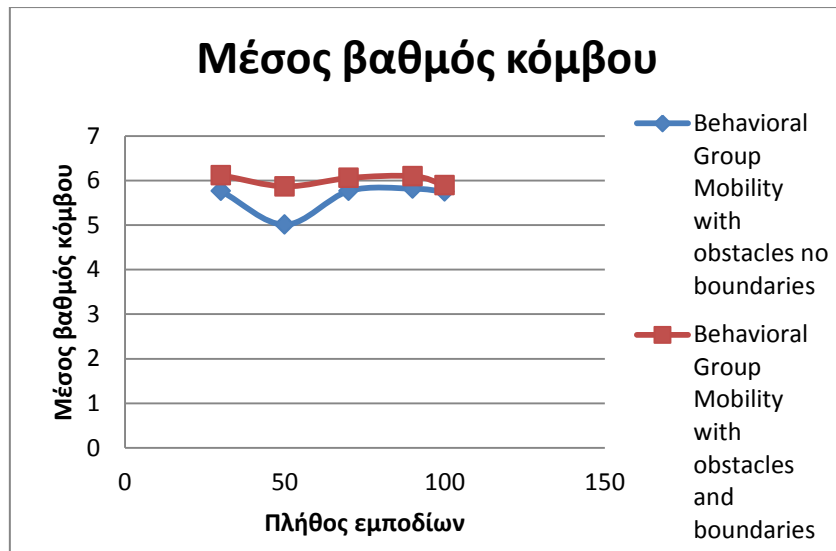


Διάγραμμα 38~ Το διάγραμμα απεικονίζει την μεταβολή της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει της ακτίνας των εμποδίων που υπάρχουν στον χώρο προσομοίωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πλήθος των εμποδίων στον χώρο προσομοίωσης είναι 30 εμπόδια.

4.4.2 Ομαδική κινητικότητα με εμπόδια και περιορισμό χώρου

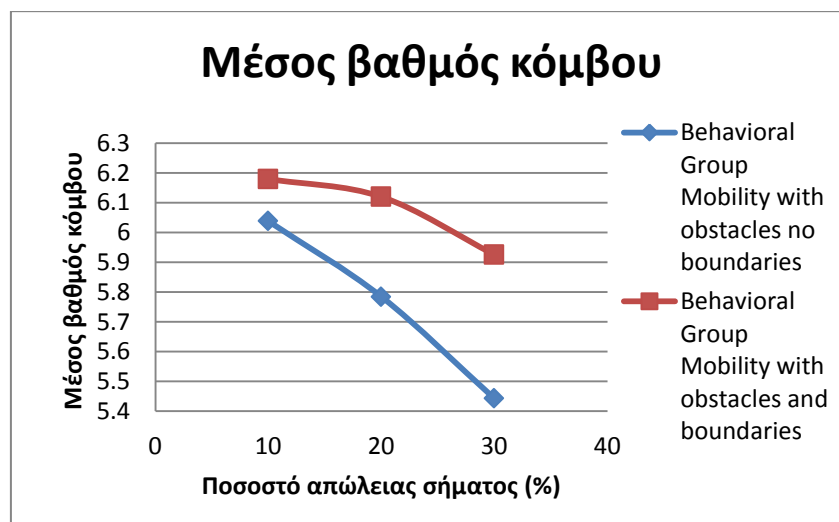
Μέσος βαθμός κόμβου

Όπως φαίνεται και από τις καμπύλες μεταβολής του μέσου βαθμού κόμβου, δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στην εφαρμογή του μοντέλου σε ανοιχτό και σε κλειστό χώρο προσομοίωσης. Στην πρώτη περίπτωση η καμπύλη του μέσου βαθμού κόμβου παρουσιάζει πτωτική πορεία, για πλήθος εμποδίων 50 εμπόδια. Η διακύμανση της καμπύλης οφείλεται στους κανόνες κίνησης που εφαρμόζει το μοντέλο Group Behavioral Mobility. Για πλήθος εμποδίων 50 έχει μεγαλύτερη επίδραση ο κανόνας της αποφυγής εμποδίων και όχι τόσο της ομαδικότητας γι' αυτό εμφανίζεται η συγκεκριμένη τιμή μέσου βαθμού κόμβου.



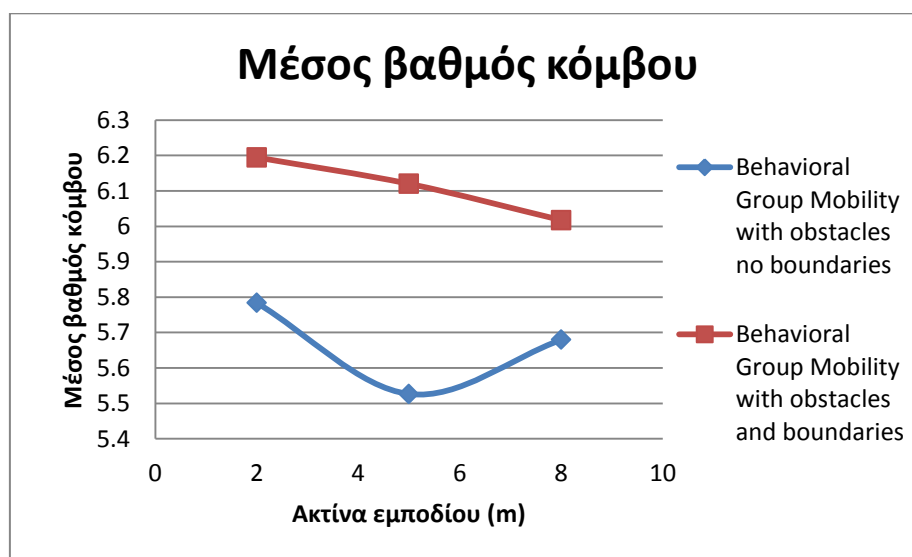
Διάγραμμα 39- Απεικονίζεται η μεταβολή του μέσου βαθμού κόμβου ως προς το πλήθος των εμποδίων που υπάρχουν στον χώρο προσομοίωσης.

Αντίθετα στη περίπτωση του κλειστού χώρου παρατηρούμε ότι ο μέσος βαθμός κόμβου παραμένει περίπου σταθερός με ελάχιστες διακυμάνσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές μέσου βαθμού κόμβου εξαιτίας του συνδυασμού των κανόνων κίνησης της ομαδικότητας και της αποφυγής τοίχου. Στην αποφυγή πρόσκρουσης με τοίχο οι κόμβοι κινούνται παράλληλα με τον τοίχο με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι γείτονες κάθε κόμβου, άρα να αυξάνεται και ο μέσος βαθμός κόμβου. Στην συνέχεια μελετώντας την επίδραση της μεταβολής του ποσοστού απώλειας σήματος καταγράφηκαν τα εξής αποτελέσματα μέσου βαθμού κόμβου.



Διάγραμμα 40- Μεταβολή του μέσου βαθμού κόμβου συναρτήσει του ποσοστού απώλειας σήματος για συνολικό πλήθος εμποδίων στον χώρο 30 εμπόδια.

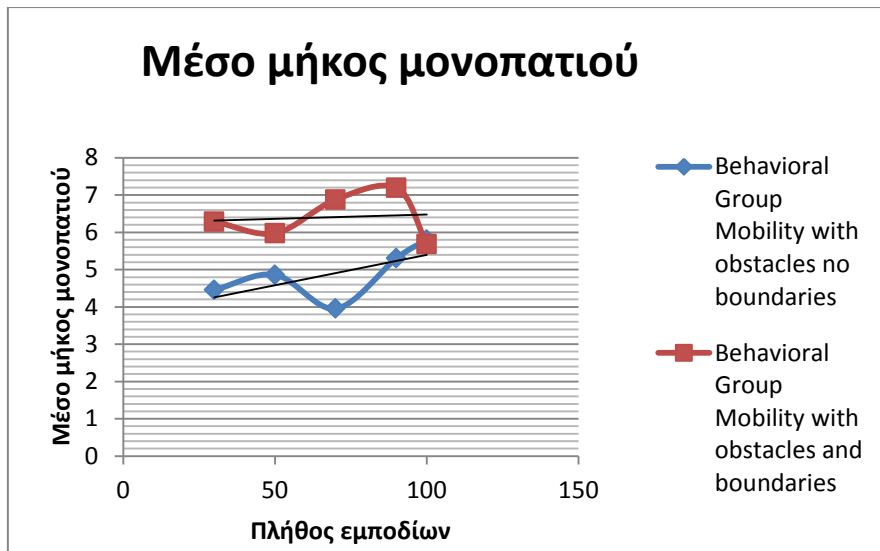
Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 40, όσο αυξάνεται το ποσοστό απώλειας σήματος μειώνεται και ο μέσος βαθμός κόμβου, γεγονός αναμενόμενο διότι όσο αυξάνεται το ποσοστό απώλειας σήματος μειώνεται ακόμα περισσότερο η εμβέλεια του σήματος κάθε κόμβου με αποτέλεσμα να εμφανίζονται περισσότερες διακοπές στην επικοινωνία των γειτονικών κόμβων. Ομοίως η μεταβολή του μεγέθους των εμποδίων είχε σημαντική επιρροή στην μεταβολή των αποτελεσμάτων του μέσου βαθμού κόμβου. Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα ο μέσος βαθμός μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους των εμποδίων, με εξαίρεση στην περίπτωση εφαρμογής του μοντέλου κίνησης σε ανοιχτό χώρο για μήκος ακτίνας εμποδίου 8 μέτρα. Στο σημείο αυτό η τιμή του μέσου βαθμού κόμβου, οφείλεται στη σύνθετη κίνηση που δημιουργεί το μοντέλο. Στην εφαρμογή σε ανοιχτό χώρο οι κόμβοι εφαρμόζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τον κανόνα αποφυγής εμποδίων συγκριτικά με την περίπτωση του κλειστού χώρου. Η ύπαρξη εμποδίων ακτίνας 8 μέτρων περιορίζει τον χώρο κίνησης των κόμβων ακόμα περισσότερο, με αποτέλεσμα να πλησιάζουν ακόμα περισσότερο οι κόμβοι μεταξύ τους. Σε συνδυασμό με τον κανόνα κοινού προορισμού το δίκτυο εμφάνισε μεγαλύτερες τιμές βαθμού κόμβου για το συγκεκριμένο μήκος ακτίνας εμποδίου.



Διάγραμμα 41~ Διάγραμμα μεταβολής του μέσου βαθμού κόμβου συναρτήσει της ακτίνας των εμποδίων για συνολικό πλήθος εμποδίων 30 εμπόδια.

Μέσο μήκος μονοπατιού

Το μέσο μήκος μονοπατιού συναρτήσει του πλήθους των εμποδίων έχει υψηλές τιμές και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής του μοντέλου κινητότητας.

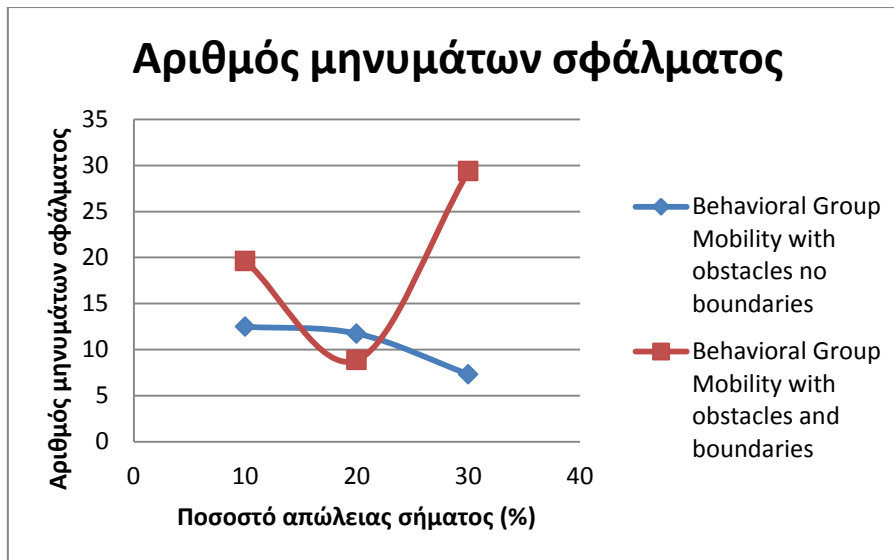


Διάγραμμα 42- Φαίνεται η μεταβολή του μέσου μήκους μονοπατιού συναρτήσει του πλήθους των εμποδίων που υπάρχουν στον χώρο.

Στην περίπτωση του κλειστού χώρου το μέσο μήκος μονοπατιού εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές, διότι με την σύνθετη κίνηση των κόμβων αυξάνεται η απόσταση αποστολέα παραλήπτη, ειδικά εάν ανήκουν σε διαφορετική ομάδα. Στην καμπύλη της εφαρμογής του μοντέλου σε ανοιχτό χώρο δημιουργείται μια διακύμανση για συνολικό πλήθος εμποδίων 70 εμπόδια, εξαιτίας ακραίων τιμών αποτελεσμάτων του μέσου μήκους μονοπατιού, οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι η πηγή και ο προορισμός δεν ανήκουν στην ίδια ομάδα κίνησης.

Αριθμός μηνυμάτων σφάλματος

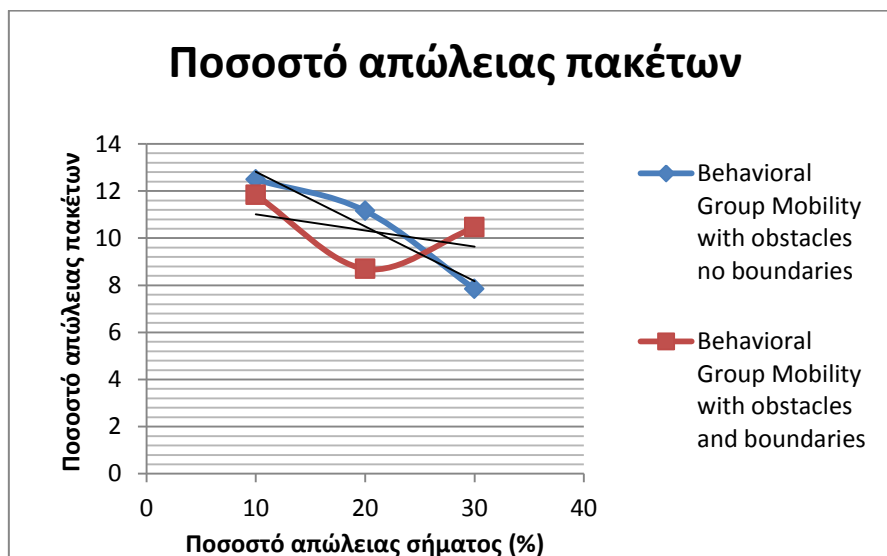
Όπως φαίνεται στο ακόλουθο γράφημα, η αύξηση του ποσοστού απώλειας σήματος προκάλεσε την ενεργοποίηση του μηχανισμού επιδιόρθωσης του αλγορίθμου. Με την αύξηση του ποσοστού αυτού αυξήθηκε ο αριθμός των διακοπών των συνδέσεων με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός των μηνυμάτων σφάλματος. Στην περίπτωση της κίνησης σε ανοιχτό χώρο δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή, ενώ στην κίνηση σε κλειστό χώρο βλέπουμε ότι για ποσοστό απώλειας σήματος 30% εμφανίζεται μέγιστο, γεγονός που αποδεικνύει ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό απώλειας σήματος λόγω της παρεμβολής εμποδίου στην επικοινωνία των κόμβων, δημιουργούνται περισσότερες διακοπές μεταξύ γειτονικών κόμβων.



Διάγραμμα 43~ Φαίνεται η μεταβολή του αριθμού μηνυμάτων σφάλματος συναρτήσει του ποσοστού απώλειας σήματος για 30 εμπόδια τοποθετημένα τυχαία στον χώρο προσομοίωσης.

Ποσοστό απώλειας πακέτων

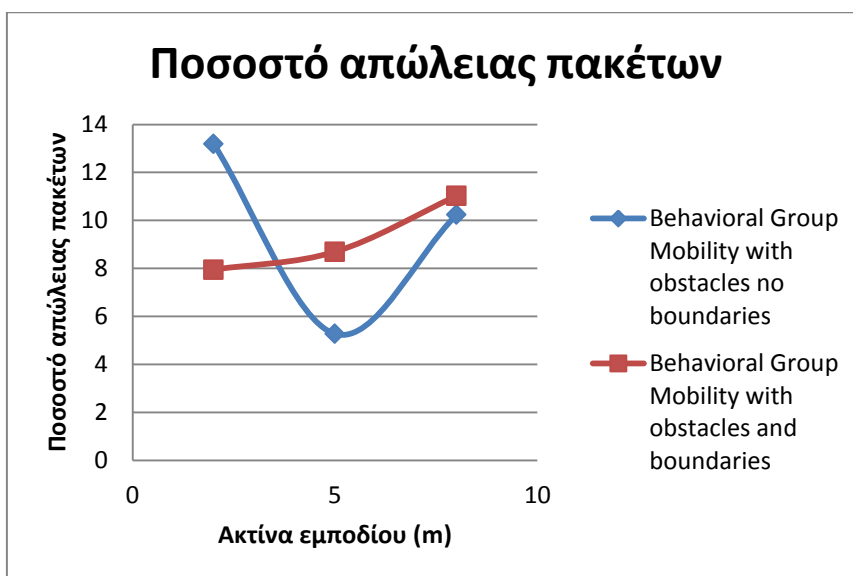
Η εφαιπόμενη των καμπυλών του ποσοστού απώλειας πακέτων δεδομένων συναρτήσει του ποσοστού απώλειας σήματος όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 44 οφείλει την κλίση της στην μεταβολή της ρυθμαπόδοσης για τις αντίστοιχες τιμές ποσοστού απώλειας σήματος όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 46.



Διάγραμμα 44~ Απεικονίζεται η μεταβολή του ποσοστού απώλειας πακέτων δεδομένων ως προς το ποσοστό απώλειας σήματος για συνολικό πλήθος εμποδίων 30 εμπόδια.

Κατά την μεταβολή του μεγέθους των εμποδίων, το ποσοστό απώλειας πακέτων δεδομένων παρουσιάζει υψηλές τιμές και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής του μοντέλου

κίνησης. Η τιμή του για το Behavioral Group Mobility with obstacles no boundaries για μήκος ακτίνας εμποδίου 5 μέτρα οφείλεται στον αριθμό μηνυμάτων σφάλματος για την αντίστοιχη τιμή του μήκους ακτίνας του εμποδίου, στην οποία ο αλγόριθμος δρομολόγησης έστειλε κατά μέσο όρο μόνο 5.25 μηνύματα σφάλματος, πολύ λιγότερα από ότι έστειλε για τιμές ακτίνας του εμποδίου 2 και 8 μέτρα.

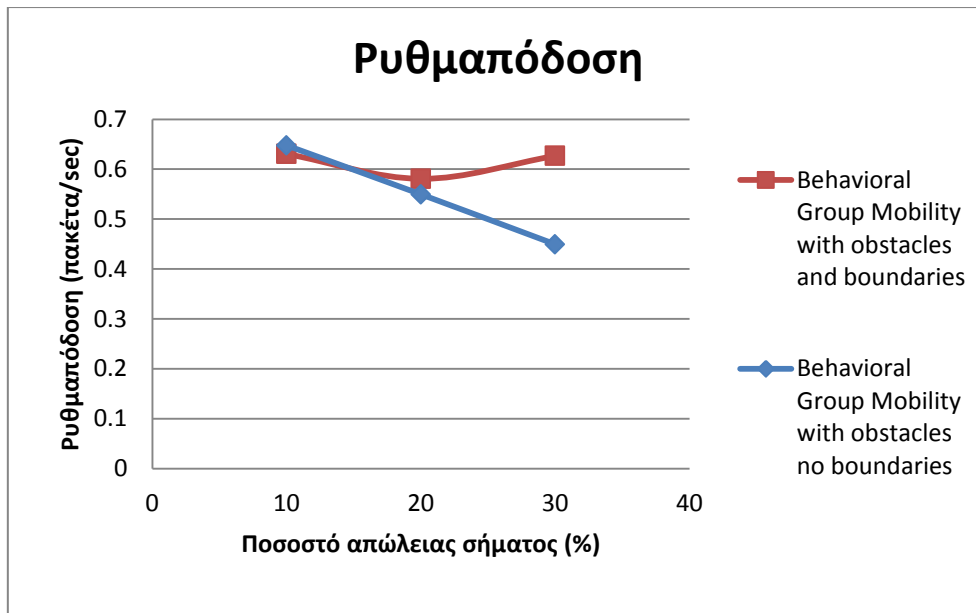


Διάγραμμα 45- Φαίνεται η μεταβολή του ποσοστού απώλειας πακέτων ως προς την ακτίνα του εμποδίου για 30 εμπόδια τοποθετημένα τυχαία στον χώρο.

Για κλειστό χώρο προσομοίωσης παρατηρούμε αύξηση του ποσοστού απώλειας πακέτων δεδομένων, γεγονός αναμενόμενο καθώς όσο μεγαλώνει το μέγεθος των εμποδίων, μειώνεται ο μέσος βαθμός κόμβου.

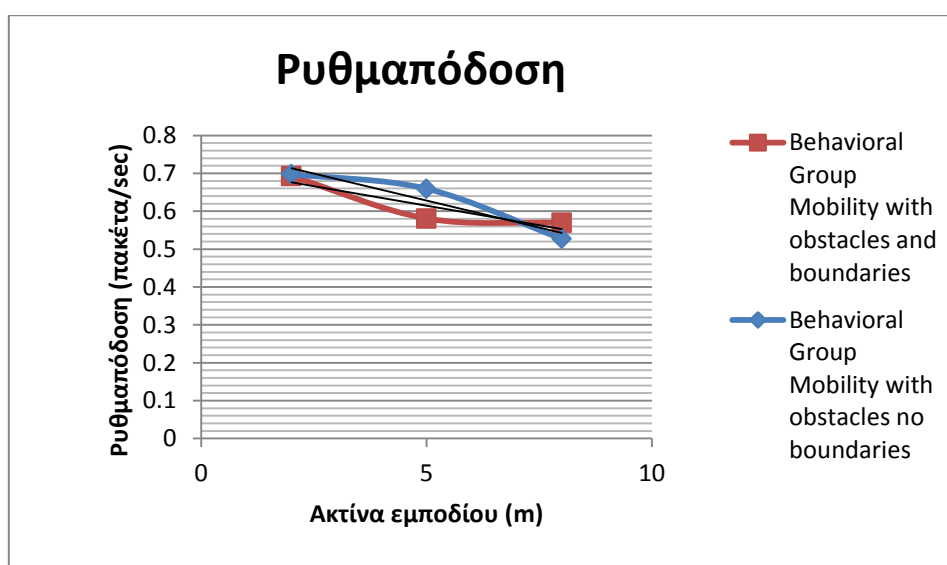
Ρυθμαπόδοση

Η ύπαρξη εμποδίων στον χώρο προσομοίωσης συνέβαλε στην μείωση της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει και των τριών μεταβλητών προσομοίωσης, του πληθους των εμποδίων, του ποσοστού απώλειας σήματος και της ακτίνας των εμποδίων. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν, σε κάποιες περιπτώσεις εμφάνισε μεγαλύτερες τιμές, γεγονός που οφείλεται στην ικανότητα του αλγορίθμου δρομολόγησης να προσαρμόζεται όσο καλύτερα γίνεται στις αλλαγές της τοπολογίας που προκαλεί η κίνηση των κόμβων.



Διάγραμμα 46~ Φαίνεται η μεταβολή της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του ποσοστού απώλειας σήματος για χώρο προσομοίωσης με 30 εμπόδια.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, για ποσοστό απώλειας 30% εμφανίζεται αύξηση της ρυθμαπόδοσης. Η αύξηση αυτή δεν οφείλεται στην μεταβολή του ποσοστού απώλειας σήματος αλλά στο πλήθος των πακέτων που έφτασαν επιτυχώς στον προορισμό. Για την αντίστοιχη τιμή του ποσοστού απώλειας σήματος έχουμε μικρότερη μέση καθυστέρηση πακέτου γεγονός που δικαιολογεί την συγκεκριμένη διακύμανση, αλλά και μικρότερο ποσοστό απώλειας πακέτων. Αντίθετα στην περίπτωση του ανοιχτού χώρου παρατηρείται σταθερή μείωση της ρυθμαπόδοσης. Ανάλογα αποτελέσματα εμφανίζει η μεταβολή της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει της ακτίνας του εμποδίου.



Διάγραμμα 47~ Φαίνεται η μεταβολή της ρυθμαπόδοσης ως προς την ακτίνα του εμποδίου σε χώρο προσομοίωσης όπου τοποθετήθηκαν τυχαία 30 εμπόδια.

Κεφάλαιο 5^ο - Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της μελέτης των αποτελεσμάτων των μοντέλων κίνησης, είτε βάσει του τύπου της κίνησης είτε βάσει του φυσικού περιβάλλοντος τους χώρου προσομοίωσης, καταλήξαμε σε κάποια βασικά συμπεράσματα.

Όσον αφορά στην ατομική κινητικότητα, εκτιμήθηκε ποιος είναι ο βέλτιστος συνδυασμός πιθανοτήτων μετάβασης κατάστασης για το μοντέλο Probabilistic Random Walk. Για μικρή διαφορά τιμών στις πιθανότητες μετάβασης κατάστασης παρατηρήθηκε μεγαλύτερη σταθερότητα στο δίκτυο, λόγω της πιο «ομαλής» κίνησης που δημιουργεί το μοντέλο. Χαρακτηριστικά, για συνδυασμό πιθανοτήτων (0.3, 0.4, 0.3) μετρήθηκαν καλύτερα αποτελέσματα στην ρυθμαπόδοση, μικρότερα ποσοστά απώλειας πακέτων δεδομένων και λιγότερα μηνύματα σφάλματος. Σε όλες τις προσομοιώσεις σεναρίων του Probabilistic Random Walk επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος συνδυασμός πιθανοτήτων ώστε το δίκτυο να εμφανίζει καλύτερες επιδόσεις. Στη συνέχεια μελετώντας την επίδραση της κίνησης που δημιουργούν κα τα δύο μοντέλα ατομικής κινητότητας, Probabilistic Random Walk και Individual Behavioral Mobility στην δικτυακή συμπεριφορά, διαπιστώθηκε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα των οντοτήτων του δικτύου μειώνεται η ρυθμαπόδοσή του και το δίκτυο καθίσταται πιο ασταθές. Οι συνδέσεις μεταξύ των γειτονικών κόμβων λόγω της κίνησής τους μεταβάλλονται και στην χειρότερη περίπτωση διακόπτονται, με αποτέλεσμα να αλλάζει η τοπολογία του δικτύου.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων ατομικής κινητότητας, διαπιστώσαμε ότι εφαρμόζοντας το μοντέλο Probabilistic Random Walk επιτυγχάνονται καλύτερες τιμές ρυθμαπόδοσης για μικρές τιμές ταχύτητας κίνησης, παρόλο που το μοντέλο Individual Behavioral Mobility δημιουργεί πιο σταθερές συνδέσεις επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Η συγκεκριμένη διαφοροποίηση στην ρυθμαπόδοση οφείλεται στο γεγονός ότι η κίνηση που δημιουργεί ο Probabilistic Random Walk ευνοεί την ύπαρξη περισσότερων συνδέσεων συγκριτικά με τον Individual Behavioral Mobility, αφού ο πρώτος εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές μέσου βαθμού κόμβου στις αντίστοιχες τιμές ταχύτητας κίνησης. Για ταχύτητες κίνησης μεγαλύτερες των 5 m/sec και τα δύο μοντέλα εμφανίζουν ίδιες τιμές ρυθμαπόδοσης. Επιπλέον μεταβάλλοντας τον φόρτο του δικτύου, εκτιμήθηκε πως η επιλογή του μοντέλου Probabilistic Random Walk είναι η βέλτιστη καθώς και σε αυτή τη περίπτωση παρουσιάζει υψηλότερες τιμές ρυθμαπόδοσης. Από άποψη ρεαλισμού στην κίνηση, πιο αντιπροσωπευτικό θεωρείται το μοντέλο Individual Behavioral Mobility στην περίπτωση που μελετάται η κίνηση σε έναν εσωτερικό χώρο. Το είδος της κίνησης που δημιουργεί στις οντότητες του δικτύου, προσεγγίζει την πραγματική κίνηση ενός ατόμου είτε στον χώρο εργασίας του, είτε στο σπίτι, ενώ ο Probabilistic Random Walk εκτιμάται ότι είναι πιο κατάλληλος για προσομοίωση κίνησης σε εξωτερικό χώρο.

Όσον αφορά στην ομαδική κινητικότητα, διαπιστώθηκε ότι μεταβάλλοντας το πλήθος των ομάδων επηρεάζεται η δικτυακή συμπεριφορά ανάλογα με το αν έχουν κοινά χαρακτηριστικά κίνησης οι ομάδες ή όχι. Όταν οι περισσότερες οντότητες του δικτύου έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά κίνησης, εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές στα αποτελέσματα της ρυθμαπόδοσης και του μέσου βαθμού κόμβου. Επομένως το πλήθος των ομάδων θα πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε τα χαρακτηριστικά της κίνησης για το σύνολο των κόμβων να μη προσεγγίζουν τα χαρακτηριστικά της ατομικής κινητότητας.

Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα ομαδικής κινητότητας, Column Mobility και Behavioral Group Mobility συνάγεται το συμπέρασμα ότι το μοντέλο Column Mobility εμφανίζει τις καλύτερες επιδόσεις στο δίκτυο. Λόγω της κίνησης που δημιουργεί στις οντότητες του δικτύου, εμφανίζονται μικρότερα μονοπάτια επικοινωνίας μεταξύ πηγής και προορισμού. Επιπλέον μεταβάλλοντας την ταχύτητα των ομάδων κίνησης και τον δικτυακό φόρτο εμφανίζει καλύτερες τιμές ρυθμαπόδοσης. Από άποψη ρεαλισμού στην κίνηση, και τα δύο μοντέλα εμφανίζουν αντιπροσωπευτικά στοιχεία ομαδικής κίνησης. Επομένως εξαρτάται καθαρά από τον ερευνητή και το είδος του δικτύου που θέλει να προσομοιώσει, η επιλογή του μοντέλου κίνησης. Το μοντέλο Column Mobility λόγω της διάταξης των κόμβων που δημιουργεί, θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε προσομοίωση κίνησης σε αυτοκινητόδρομο, όπου όλα τα αυτοκίνητα κινούνται σε ομάδες (αριστερή και δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας) το ένα πίσω από το άλλο με συγκεκριμένη ταχύτητα και κατεύθυνση και προσπαθούν να ανταλλάξουν ενδεχομένως πληροφορίες σχετικές με την κίνηση της κυκλοφορίας. Αντίθετα το μοντέλο Behavioral Group Mobility δημιουργεί ένα είδος κίνησης που θα ταίριαζε περισσότερο σε ομάδες ανθρώπων που κινούνται σε εσωτερικούς χώρους και αποφεύγουν εμπόδια, τοίχους ή αμοιβαίες συγκρούσεις μεταξύ τους, όπως παραδείγματος χάρη ομάδες ξενάγησης σε μουσείο, όπου τα άτομα θα μπορούσαν να ανταλλάσουν πληροφορίες σχετικές με τη ξενάγηση στους εσωτερικούς χώρους του μουσείου.

Μελετώντας την κίνηση βάσει του φυσικού περιβάλλοντος του δικτύου, διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου Behavioral Mobility με εμπόδια είτε για ατομική είτε για ομαδική κινητότητα διαφέρουν στην προσομοίωση ανοικτού και κλειστού χώρου. Οι οντότητες του δικτύου εμφανίζουν τελείως διαφορετική κίνηση στις δύο περιπτώσεις, γεγονός που οφείλεται στην εφαρμογή ή όχι του κανόνα αποφυγής πρόσκρουσης σε τοίχο, του μοντέλου. Αυτό που συμπεραίνουμε είναι ότι, παρόλο που το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζει την αποφυγή πρόσκρουσης σε εμπόδια, η ύπαρξή τους στον χώρο δυσχεραίνει την επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων του δικτύου. Η παρεμβολή εμποδίων στην επικοινωνία των οντοτήτων του δικτύου, επιφέρει μείωση στην εμβέλεια του σήματός τους με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διακοπές στις συνδέσεις επικοινωνίας τους. Μελετώντας την επίδραση του πλήθους των εμποδίων, της ακτίνας εμποδίου και του ποσοστού απώλειας σήματος που προκαλεί ένα εμπόδιο, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι επιδρούν αρνητικά στις επιδόσεις του δικτύου. Η ακτίνα και το πλήθος των εμποδίων επηρεάζουν ταυτόχρονα και την κίνηση των οντοτήτων αλλά και την εμβέλεια του σήματός τους, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται διακυμάνσεις στα αποτελέσματα των μετρήσεων της ρυθμαπόδοσης, του μέσου μήκους μονοπατιού και του μέσου βαθμού κόμβου, ενώ το ποσοστό απώλειας σήματος επιδρά μόνο στην εμβέλεια του σήματος. Συγκεκριμένα η αύξηση των δύο πρώτων παραμέτρων επιφέρει πιο σύνθετη κίνηση, λόγω της ταυτόχρονης εφαρμογής όλων των κανόνων κίνησης του Behavioral Mobility, γεγονός που την καθιστά απρόβλεπτη. Παράλληλα αυξάνεται την πιθανότητα παρεμβολής εμποδίου μεταξύ των συνδέσεων των κόμβων και κατά συνέπεια να μειώνεται η ρυθμαπόδοση και να αυξάνεται το ποσοστό απώλειας πακέτων δεδομένων. Η αύξηση του ποσοστού απώλειας σήματος επιφέρει μείωση του μέσου βαθμού κόμβου η οποία επιδρά αρνητικά στην μεταβολή των υπόλοιπων αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Συμπερασματικά, για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου κίνησης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο τύπος της κίνησης, είτε ομαδική είτε ατομική, ο περιβάλλον χώρος του δικτύου και φυσικά ο ρόλος του δικτύου στο οποίο πρόκειται να εφαρμοστεί το μοντέλο κίνησης.

Βιβλιογραφία

- [1] Sudip Misra, Isaac Woungang, Subhas Chandra Misra, “Self-Configuring, Self-Organizing, and Self-Healing Schemes in Mobile Ad Hoc Network” in *Guide to Wireless Ad Hoc Networks*, Springer, 2009.
- [2] Charles E. Perkins, Elizabeth M. Belding-Royer, *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing* University of California, Santa Barbara, Ian D. Chakeres University of California, Santa Barbara, in IETF Internet Draft, February, 2003.
- [3] Elizabeth M. Royer, “The Ad hoc On – Demand Distance Vector Routing Protocol” in *Routing in Ad hoc Mobile Networks: On-Demand and Hierarchical Strategies*, University of California, Santa Barbara, December 2000.
- [4] Frank Legendre, Vincent Borrel, Marcelo Dias de Amorim, and Serge Fdida, *Reconsidering Microscopic Mobility Modeling for Self-Organizing Networks*, Laboratoire d’Informatique de Paris 6 (LIP6/CNRS) Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, IEEE Network, November/December 2006
- [5] Fan Bai and Ahmed Helmy, *A survey of Mobility Models in Wireless Ad hoc Networks*, University of Southern California, USA, Infocom 2003.
- [6] Hong, M. Gerla, G. Pei, and C.-C. Chiang, *A group mobility model for ad hoc wireless networks*, Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), August 1999.
- [7] Vincent Lenders, Jorg Wagner, Simon Heimlicher, Martin May, Bernhard Platner, *An empirical Study of the Impact of Mobility on Link Failures in an 802.11 Ad Hoc Network*, IEEE wireless Communications, December 2008.
- [8] Vanessa Ann Davies, *Evaluating Mobility Models within an Ad hoc Network*, Thesis, Colorado School of Mines, 2000.
- [9] Tracy Camp, Jeff Boleng, Vanessa Davies, *A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research*, Dept. of Math. And Computer Sciences, Colorado School of Mines, Golden, CO, 10 September 2002.
- [10] M. Sanchez and P. Manzoni, *A Java-Based Ad Hoc Networks Simulator*, in Proceedings of the SCS Western Multi-conference Web-based Simulation Track, Jan. 1999