



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

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΚΑΙ ΑΔΟΜΗΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΥΡΙΑΚΟΣ Σ. ΠΑΛΑΙΧΩΡΟΣ
ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΧΕΙΜΩΝΙΔΗΣ

Επιβλέπων : ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Δ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ
ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8^η Ιουλίου 2008.

.....
Αθ. Παναγόπουλος
Λέκτορας ΕΜΠ

.....
Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ι. Κανελλόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2008

.....
Κυριάκος Σ. Παλαίχωρος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Π. Χειμωνίδης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Κυριάκος Σ. Παλαίχωρος, Γεώργιος Π. Χειμωνίδης, 2008
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και η προσομοίωση μοντέλων κινητικότητας για την αναπαράσταση της κίνησης των χρηστών σε κυψελωτά και αδόμητα ασύρματα δίκτυα. Αρχικά, έγινε μια επισκόπηση των μοντέλων κινητικότητας που χρησιμοποιούνται σε προσομοιώσεις που αφορούν ασύρματα δίκτυα. Στη συνέχεια, υλοποιήθηκαν σε MATLAB προσομοιώσεις δύο ευρέως διαδεδομένων μοντέλων κινητικότητας, του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης. Επίσης, για σκοπούς αξιολόγησης της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, έγινε θεωρητική ανάλυση κάποιων στοχαστικών ιδιοτήτων του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, καθώς και της διάρκειας και της διαθεσιμότητας ζεύξης σε αδόμητα δίκτυα.

Στα πλαίσια των προσομοιώσεων, εξετάσαμε κάποια μέτρα κινητικότητας που περιελάμβαναν τη χωρική κατανομή των κόμβων, την κατανομή της ταχύτητας των κόμβων καθώς και τις κατανομές του μήκους και του χρόνου μιας μετάβασης. Στη συνέχεια, προχωρήσαμε στη διερεύνηση της επίδρασης της κινητικότητας σε κυψελωτά και αδόμητα δίκτυα. Για τα κυψελωτά δίκτυα, θεωρήσαμε ένα ορθογώνιο πλέγμα κυψελών και μελετήσαμε το ρυθμό αφίξεων/αναχωρήσεων προς/από κάθε κυψέλη και την κατανομή του χρόνου παραμονής ενός χρήστη σε κάθε κυψέλη. Για τα αδόμητα δίκτυα, μελετήθηκε η κατανομή της διάρκειας και η διαθεσιμότητα μιας ζεύξης μεταξύ δύο κινητών κόμβων καθώς και η κατανομή της διάρκειας και η διαθεσιμότητα μονοπατιών δύο και τριών αλμάτων. Όπου ήταν εφικτό, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα θεωρητικά.

Λέξεις Κλειδιά

Μοντέλα κινητικότητας, κινητός κόμβος, προσομοίωση, σημείο στάσης, μήκος και χρόνος μετάβασης, χωρική κατανομή κόμβων, κυψέλη, χρόνος παραμονής, ρυθμός αλλαγών κυψέλης, ζεύξη, μονοπάτι, διάρκεια, διαθεσιμότητα, Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.

Abstract

The goal of this diploma thesis was the study and simulation of mobility models for the representation of users' movement in cellular and ad hoc wireless networks. At first, a survey of mobility models that are used in simulations concerning wireless networks was carried out. Afterwards, two widely used mobility models, the Random Waypoint Mobility Model and the Random Direction Mobility Model, were implemented in MATLAB simulations. Furthermore, in order to evaluate the validity of simulation results, a theoretical analysis of certain stochastic properties of the Random Waypoint Mobility Model as well as link duration and availability in ad hoc networks was performed.

During the simulation process, we examined certain mobility metrics, including the spatial node distribution, the nodes' speed distribution, as well as the transition length and the transition time distribution. In addition, we investigated the mobility's influence on cellular and ad hoc networks. In the case of cellular networks, we assumed a rectangular cell grid and we studied the rate of arrivals/departures for each cell and the sojourn time of a user in each cell. In the case of ad hoc networks, link duration distribution and link availability between two nodes as well as two hop and three hop path duration distribution and availability were examined. Finally, a comparison between simulation results and theoretical results was made, where it was possible.

Keywords

Mobility models, mobile node, simulation, waypoint, transition time and length, spatial node distribution, cell, sojourn time, cell change rate, ad hoc, link, path, duration, availability, Random Waypoint Mobility Model, Random Direction Mobility Model.

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Λέκτορα κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο που με τη συνεχή βοήθεια, τις υποδείξεις και τις κατευθύνσεις του συνέβαλε στην ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Επίσης, ευχαριστούμε τον Καθηγητή κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, θα ήταν παράλειψη αν δεν ευχαριστούσαμε τους γονείς μας για την στήριξη που μας προσέφεραν στα χρόνια των σπουδών μας στο Πολυτεχνείο.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Επισκόπηση των μοντέλων κινητικότητας για ασύρματα δίκτυα..	13
1.1. Εισαγωγή	13
1.2. Ατομικά Μοντέλα Κινητικότητας (Entity Mobility Models).....	13
1.2.1. Τυχαία μοντέλα κινητικότητας (Random-based mobility models)	13
I. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (Random Walk Mobility Model) ..	14
II. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων (Random Waypoint Mobility Model)	
.....	17
III. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης (Random Direction Mobility	
Model).....	20
1.2.2. Μοντέλα κινητικότητας με χρονική εξάρτηση (Mobility models with	
temporal dependency).....	21
I. Μοντέλο Κινητικότητας Gauss – Markov (Gauss – Markov Mobility Model)	21
II. Πιθανοτική εκδοχή του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου	
(Probabilistic Version of Random Walk Mobility Model)	24
III. Ομαλό Τυχαίο Μοντέλο Κινητικότητας (Smooth Random Mobility Model)	26
IV. Μοντέλο Κινητικότητας Περιοχής Προσομοίωσης Χωρίς Σύνορα (Boundless	
Simulation Area Mobility Model)	28
1.2.3. Μοντέλα Κινητικότητας με Γεωγραφικό Περιορισμό (Mobility models with	
Geographic Restriction)	30
I. Μοντέλο Κινητικότητας Τμήματος Πόλης (City Section Mobility Model)	30
II. Μοντέλο Κινητικότητας Μονοπατιού (Pathway Mobility Model).....	32
III. Μοντέλο Κινητικότητας Με Εμπόδια (Obstacle Mobility Model)	33
1.3. Ομαδικά Μοντέλα Κινητικότητας (Group Mobility Models)	34
1.3.1. Ομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας Σημείου Αναφοράς (Reference Point Group	
Mobility Model).....	34
1.3.2. Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης (Column Mobility Model).....	38
1.3.3. Ομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας Καταδίωξης (Pursue Group Mobility	
Model).....	40
1.3.4. Μοντέλο Κινητικότητας Νομαδικής Κοινότητας (Nomadic Community	
Mobility Model).....	41
1.3.5. Τυχαίο Μοντέλο Κινητικότητας Εκθετικής Συσχέτισης (Exponential	
Correlated Random Mobility Model)	42
1.4. Ανακεφαλαίωση.....	43
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1 ^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Υλοποίηση μοντέλων κινητικότητας.....	47
2.1. Εισαγωγή	47
2.2. Περιγραφή – αλγόριθμος της κίνησης των κόμβων	47
2.2.1. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων	47
2.2.2. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.....	48
2.3. Υλοποίηση Μοντέλων Κινητικότητας χωρίς δικτυακή υποδομή.....	49
2.3.1 Κώδικας προγραμμάτων και επεξήγηση	49
I. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων	49
II. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.....	53
2.4. Μελέτη Κινητικότητας σε Κυψελωτά Συστήματα	54
2.4.1. Ένα στοιχειώδες κυψελωτό σύστημα	54
2.4.2. Κώδικας και επεξήγηση προγραμμάτων	54
2.5. Μελέτη Κινητικότητας σε δίκτυα ad hoc	56
2.5.1. Ζεύξεις και μονοπάτια σε ένα δίκτυο ad hoc.....	56
2.5.2. Κώδικας και επεξήγηση προγραμμάτων	57
I. Για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα ζεύξης.....	57
II. Για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα μονοπατιών δύο αλμάτων	59
III. Για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα μονοπατιών τριών αλμάτων	61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.2.....	62
Α.2.1. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων χωρίς δικτυακή υποδομή.....	62
Α.2.2. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης χωρίς δικτυακή υποδομή.....	69
Α.2.3. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε κυψελωτό σύστημα.....	76
Α.2.4. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε κυψελωτό σύστημα.....	81
Α.2.5. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε ad hoc δίκτυο (για μονοπάτια 2 αλμάτων)	87
Α.2.6. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε ad hoc δίκτυο (για μονοπάτια δύο αλμάτων).....	95
Α.2.7. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε ad hoc δίκτυο (για μονοπάτια τριών αλμάτων)	104
Α.2.8. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε ad hoc δίκτυο (για μονοπάτια τριών αλμάτων)	113
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2 ^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Στοχαστικές ιδιότητες του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και ανάλυση της διάρκειας ζεύξης σε δίκτυα ad hoc	123
3.1. Εισαγωγή	123
3.2. Ορισμός των στοχαστικών ιδιοτήτων του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων	123
3.3. Μήκος και διάρκεια μιας μετάβασης.....	125
3.3.1. Στοχαστική διαδικασία του μήκους μετάβασης	126
3.3.2. Μήκος μετάβασης σε ένα μονοδιάστατο τμήμα γραμμής.....	127
3.3.3. Μήκος μετάβασης σε ορθογώνια περιοχή.....	128
3.3.4. Χρόνος μετάβασης.....	132
I. Ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας	133
II. Διακριτή κατανομή ταχύτητας.....	134
III. Βήτα κατανομή ταχύτητας.....	134
3.3.5. Χρόνος μεταξύ δύο αλλαγών κατεύθυνσης.....	135
3.4. Χωρική κατανομή των κόμβων	136
3.4.1. Χωρική κατανομή χωρίς χρόνο παύσης	137
3.4.2. Χωρική κατανομή με χρόνο παύσης.....	138
3.5. Ρυθμός αλλαγής της κυψέλης.....	139
3.5.1. Αλλαγές κυψέλης ανά μετάβαση.....	140
3.5.2. Ρυθμός αλλαγής κυψέλης	142
3.6. Κατανομή διάρκειας ζεύξης και διαθεσιμότητα ζεύξης σε δίκτυο ad hoc	143
3.6.1. Εισαγωγή	143
3.6.2. Αναλυτικό Μοντέλο της Διάρκειας Ζεύξης	143
I. Υποθέσεις και Παραδοχές.....	143
II. Διάρκεια Ζεύξης.....	144
III. Η συνάρτηση κατανομής της διάρκειας ζεύξης.....	145
3.7. Συμπεράσματα	150
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.3.....	151
Α.3.1. Υπολογισμός θεωρητικών σχέσεων για σύγκριση αποτελεσμάτων στην προσομοίωση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων	151
Α.3.1.1. Κατανομή της ταχύτητας των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση	151
Α.3.1.2. Μήκος μετάβασης.....	152
Α.3.1.3. Χρόνος μετάβασης.....	152
Α.3.1.4. Χωρική κατανομή των κόμβων χωρίς χρόνο παύσης.....	153

A.3.1.5. Χωρική κατανομή με χρόνο παύσης.....	153
A.3.2. Υπολογισμός θεωρητικών σχέσεων για σύγκριση αποτελεσμάτων στην προσομοίωση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.....	154
A.3.2.1. Κατανομή της ταχύτητας κόμβων στη μόνιμη κατάσταση	154
A.3.2.2. Μήκος μετάβασης.....	155
A.3.2.3. Χρόνος μετάβασης.....	155
A.3.2.4. Χωρική κατανομή των κόμβων	156
A.3.3. Υπολογισμός θεωρητικών σχέσεων για σύγκριση αποτελεσμάτων στην προσομοίωση του κυψελωτού συστήματος.....	156
A.3.4. Υπολογισμός θεωρητικών σχέσεων για σύγκριση αποτελεσμάτων στην προσομοίωση ad hoc δικτύου	156
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3 ^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	158
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εκτέλεση προσομοιώσεων και συμπεράσματα	161
4.1. Εισαγωγή	161
4.2. Προσομοιώσεις μοντέλων κινητικότητας χωρίς δικτυακή υποδομή.....	161
1 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple.....	162
2 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple.....	166
3 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple.....	170
4 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple.....	174
5 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple.....	178
6 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple.....	182
7 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple.....	185
8 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple.....	189
9 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple.....	192
10 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple.....	196
4.3. Προσομοιώσεις μοντέλων κινητικότητας σε κυψελωτά συστήματα.....	200
11 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_cellular	200
12 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_cellular	205
13 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_cellular	209
14 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_cellular	214
15 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_cellular	219
16 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_cellular	223
4.4. Προσομοιώσεις μοντέλων κινητικότητας σε δίκτυα ad hoc.....	228
17 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_adhoc_path2	229

18 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_adhoc_path3	233
19 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_adhoc_path3	235
20 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_adhoc_path3	239
21 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_adhoc_path2	243
22 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_adhoc_path3	246
23 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_adhoc_path3	248
24 ^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_adhoc_path3	252
4.5. Σύνοψη συμπερασμάτων από τις προσομοιώσεις	256
4.5.1. Προσομοιώσεις Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων χωρίς δικτυακή υποδομή	256
4.5.2. Προσομοιώσεις Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης χωρίς δικτυακή υποδομή.....	257
4.5.3. Προσομοιώσεις Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε κυψελωτά συστήματα.....	258
4.5.4. Προσομοιώσεις Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε αδόμητα δίκτυα.....	260
4.6. Μελλοντική εργασία – προοπτικές.....	262

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Επισκόπηση των μοντέλων κινητικότητας για ασύρματα δίκτυα

1.1. Εισαγωγή

Για την πραγματοποίηση μιας λεπτομερούς και όσο το δυνατόν ακριβέστερης προσομοίωσης της συμπεριφοράς ενός δικτύου ad hoc ή ενός κυψελωτού συστήματος κινητών επικοινωνιών, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη χρήσης ενός μοντέλου κινητικότητας που να παριστάνει με ακρίβεια τους κινητούς κόμβους (ΚΚ) που τελικά θα αποτελέσουν τους χρήστες των συστημάτων αυτών. Προς το παρόν, υπάρχουν δύο είδη μοντέλων κινητικότητας που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση δικτύων: τα μοντέλα ίχνους και τα συνθετικά μοντέλα [1]. Τα μοντέλα ίχνους είναι εκείνα τα διαγράμματα κινητικότητας που παρατηρούνται στα πραγματικά συστήματα και παρέχουν ακριβή πληροφορία για αυτά, ειδικά όταν περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό συμμετεχόντων και μια κατάλληλα μεγάλη περίοδο παρατήρησης. Ωστόσο, τα νέα περιβάλλοντα δικτύων (όπως δίκτυα ad hoc) δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν εύκολα αν τα ίχνη δεν έχουν ήδη δημιουργηθεί. Σε τέτοιου είδους καταστάσεις, είναι απαραίτητη η χρήση συνθετικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά επιχειρούν να αναπαραστήσουν με ρεαλιστικό τρόπο τις συμπεριφορές των ΚΚ χωρίς να χρησιμοποιούν ίχνη.

Ένα μοντέλο κινητικότητας πρέπει να εξομοιώνει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις κινήσεις των πραγματικών ΚΚ. Επιβάλλεται να υπάρχουν σε αυτό αλλαγές στην ταχύτητα και την κατεύθυνση και μάλιστα σε λογικά χρονικά διαστήματα. Για παράδειγμα, δεν επιθυμούμε οι ΚΚ να ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές με σταθερές ταχύτητες καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, επειδή οι πραγματικοί ΚΚ δεν ταξιδεύουν υπό τέτοιους περιορισμούς. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζουμε και μελετούμε διάφορα συνθετικά μοντέλα που έχουν προταθεί (ή χρησιμοποιηθεί) για την εκτίμηση της απόδοσης διαφόρων συστημάτων επικοινωνιών, τα οποία διακρίνουμε αρχικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα Ατομικά και τα Ομαδικά Μοντέλα Κινητικότητας.

1.2. Ατομικά Μοντέλα Κινητικότητας (Entity Mobility Models)

1.2.1. Τυχαία μοντέλα κινητικότητας (Random-based mobility models)

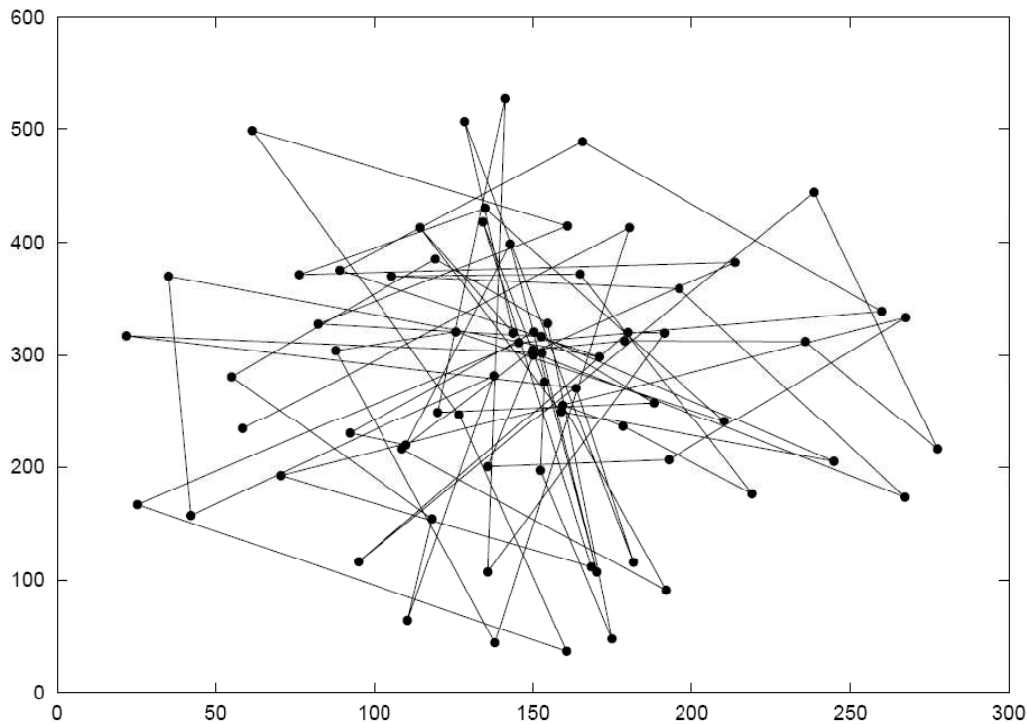
Στα τυχαία μοντέλα κινητικότητας, οι κινητοί κόμβοι (mobile nodes - MN) - τερματικά κινούνται τυχαία και ελεύθερα, χωρίς περιορισμούς στην κίνησή τους. Πιο συγκεκριμένα, τόσο ο προορισμός όσο και η ταχύτητα και η κατεύθυνση κίνησης ενός κόμβου επιλέγονται τυχαία και ανεξάρτητα από τους άλλους κόμβους. Επίσης, κάθε φορά που ένας κόμβος επιλέγει κάποιο χαρακτηριστικό της κίνησής του, η επιλογή του αυτή δεν λαμβάνει υπόψη την προγενέστερη του κίνηση. Δηλαδή, τα μοντέλα αυτά έχουν την ιδιότητα της έλλειψης μνήμης (memoryless). Στη συνέχεια, ακολουθεί μια περιγραφή τριών τυχαίων μοντέλων κινητικότητας που χρησιμοποιούνται ευρέως σε πάρα πολλές μελέτες προσομοίωσης ασύρματων δικτύων.

I. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (Random Walk Mobility Model)

Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου διατυπώθηκε μαθηματικά για πρώτη φορά από τον Einstein το 1926 [2] και αναπτύχθηκε ώστε να προσομοιώσει την εξαιρετικά απρόβλεπτη και ασταθή κίνηση και συμπεριφορά των σωματιδίων στη φύση [3] (στη βιβλιογραφία αναφέρεται επίσης ως Brownian Motion). Σε αυτό το μοντέλο κινητικότητας, ένας κινητός κόμβος (ΚΚ) κινείται από την τρέχουσα θέση του προς μια καινούρια θέση, επιλέγοντας τυχαία την κατεύθυνση $\theta(t)$ και την ταχύτητα $v(t)$ με την οποία θα κινηθεί. Τόσο η τιμή της νέας ταχύτητας $v(t)$ όσο και η τιμή της νέας κατεύθυνσης $\theta(t)$ επιλέγονται τυχαία από ένα προκαθορισμένο σύνολο τιμών $[\text{speedmin}, \text{speedmax}]$ και $[0, 360^\circ]$ αντίστοιχα, ακολουθώντας συνήθως την ομοιόμορφη κατανομή (ή Γκαουσιανή κατανομή όσο αφορά την ταχύτητα). Κάθε κίνηση – μετάβαση στο Μοντέλο Τυχαίου Περιπάτου χαρακτηρίζεται είτε από ένα σταθερό χρονικό διάστημα t είτε από μια σταθερή διανυόμενη απόσταση d , στο τέλος της οποίας υπολογίζονται μια νέα τιμή της κατεύθυνσης και μια νέα τιμή της ταχύτητας. Θεωρώντας την πρώτη περίπτωση, σε κάθε χρονικό διάστημα t , ο κόμβος κινείται με ένα διάνυσμα ταχύτητας $(v_x, v_y) = (v(t)\cos\theta(t), v(t)\sin\theta(t))$. Εάν ένας ΚΚ, ο οποίος κινείται σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, φθάσει σε ένα από τα σύνορα της περιοχής προσομοίωσης, ανακλάται από το σύνορο αυτό πίσω στην περιοχή προσομοίωσης με μια γωνία που καθορίζεται από την κατεύθυνση άφιξης. Ο ΚΚ ακολούθως συνεχίζει την κίνηση του κατά μήκος αυτής της καινούριας διαδρομής (μέχρι την ολοκλήρωση του χρονικού διαστήματος t ή του μήκους d). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο συνόρου (border effect). Υπάρχουν, πέραν της ανάκλασης, και άλλοι τρόποι χειρισμού της περίπτωσης που ένας κόμβος φτάνει στο σύνορο.

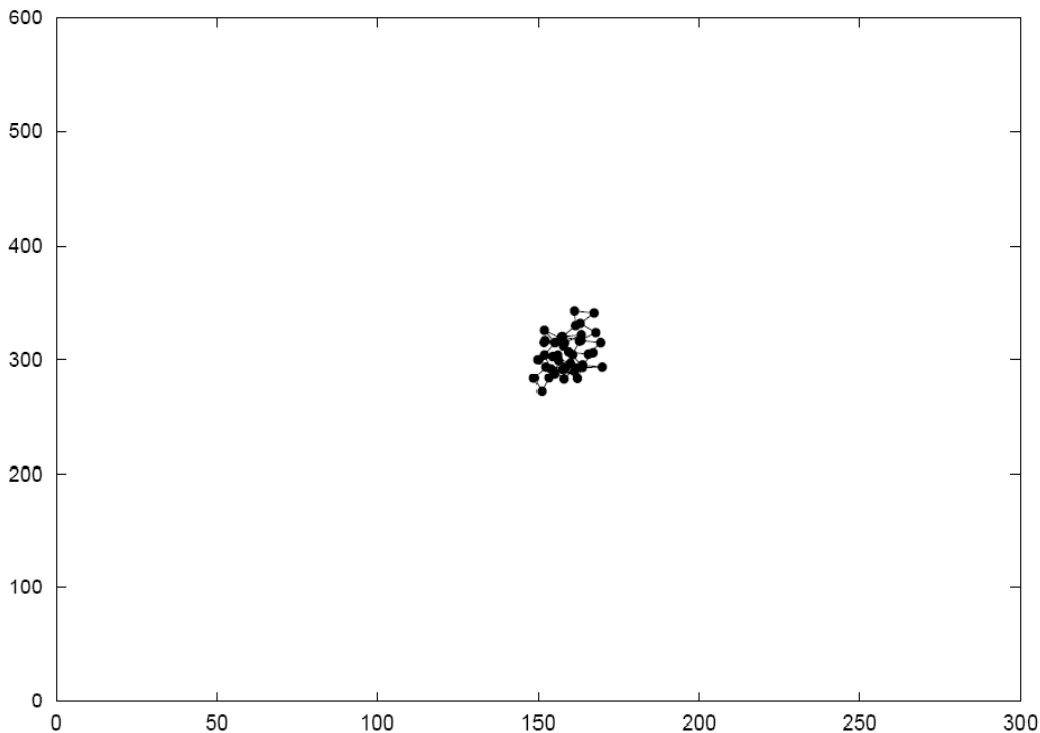
Πολλά παράγωγα του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου έχουν αναπτυχθεί συμπεριλαμβανομένων των 1-Δ, 2-Δ, 3-Δ και n-Δ μοντέλων. Το 1921, ο Polya απέδειξε ότι ένας τυχαίος περίπατος σε μια μονοδιάστατη ή δισδιάστατη επιφάνεια επιστρέφει στην αρχική του θέση με απόλυτη βεβαιότητα, δηλαδή με πιθανότητα ίση με μονάδα [4]. Αυτό το χαρακτηριστικό εξασφαλίζει ότι το Μοντέλο Τυχαίου Περιπάτου αντιπροσωπεύει ένα μοντέλο κινητικότητας, το οποίο εξομοιώνει τις μετακινήσεις οντοτήτων γύρω από τις αφηρημένες τους, χωρίς να υπάρχει η ανησυχία για το αν οι οντότητες που κινούνται σε μακρινές περιοχές δεν επιστρέψουν ποτέ.

Το 2-Δ Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου παρουσιάζει ξεχωριστό ενδιαφέρον, δεδομένου του γεγονότος πως η γήινη επιφάνεια προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας ένα δισδιάστατο μοντέλο. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα της κίνησης που παρατηρείται από αυτό το δισδιάστατο μοντέλο.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα κίνησης ενός ΚΚ που ακολουθεί το 2-Δ Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (με σταθερό το χρόνο μετάβασης)

Στο πιο πάνω σχήμα, ο ΚΚ αρχίζει την κίνησή του από το κέντρο μιας περιοχής προσομοίωσης 300m x 600m, δηλαδή τη θέση (150, 300). Σε κάθε σημείο, ο ΚΚ επιλέγει τυχαία μια τιμή της κατεύθυνσης μεταξύ 0 και 360° και μια τιμή της ταχύτητας μεταξύ 0 και 10 m/s. Ο ΚΚ επιτρέπεται να ταξιδέψει για 60 δευτερόλεπτα (χρόνος μετάβασης) πριν αλλάξει την κατεύθυνση και την ταχύτητα με την οποία κινείται. Στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου, ο ΚΚ μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση αφού έχει διανύσει μια συγκεκριμένη απόσταση αντί ενός καθορισμένου χρόνου. Επεξηγούμε αυτήν την παραλλαγή του μοντέλου στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα κίνησης ενός ΚΚ που ακολουθεί το 2-Δ Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (με σταθερή την απόσταση μετάβασης)

Σε αυτό το παράδειγμα, ο ΚΚ ταξιδεύει για συνολικά 10 μέτρα (αντί 60 δευτερολέπτων) προτού αλλάξει την κατεύθυνση και την ταχύτητά του. Σε αντίθεση με το Σχήμα 1.1, κάθε μετακίνηση του ΚΚ στο Σχήμα 1.2 χαρακτηρίζεται από την ίδια ακριβώς απόσταση.

Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου είναι ένα μοντέλο κινητικότητας χωρίς μνήμη (memoryless) επειδή δε διατηρεί ούτε χρησιμοποιεί καμία πληροφορία σχετικά με την προηγούμενη κατάσταση της κίνησης ώστε να πάρει μια μελλοντική απόφαση [5]. Με άλλα λόγια, η τρέχουσα ταχύτητα και κατεύθυνση ενός ΚΚ είναι ανεξάρτητες από την προηγούμενη τιμή της ταχύτητας και της κατεύθυνσής του. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να παράγει μη ρεαλιστικές κινήσεις, όπως ξαφνικές στάσεις και απότομες στροφές (βλέπε Σχήμα 1.1), ένα πρόβλημα το οποίο επιλύεται με τη χρησιμοποίηση άλλων μοντέλων κινητικότητας, όπως για παράδειγμα το Μοντέλο Κινητικότητας Gauss-Markov.

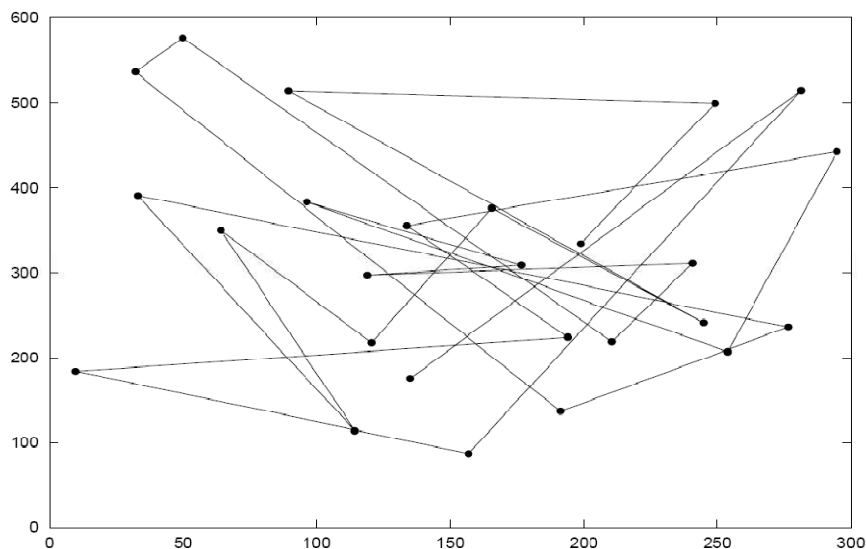
Εάν στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου ο καθορισμένος χρόνος (ή καθορισμένη απόσταση), κατά τον οποίο ένας ΚΚ κινείται μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων (χρόνος ή απόσταση μετάβασης), είναι σύντομος, τότε η κίνηση του ΚΚ περιορίζεται σε ένα μικρό μέρος της περιοχής προσομοίωσης. Ορισμένες μελέτες προσομοίωσης (π.χ. [6, 7]), που χρησιμοποιούν αυτό το μοντέλο κινητικότητας, θέτουν το συγκεκριμένο χρόνο σε ένα κτύπο ρολογιού ή τη συγκεκριμένη απόσταση σε ένα βήμα. Το Σχήμα 1.2 απεικονίζει τη στατική φύση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου όταν ο ΚΚ επιτρέπεται να μετακινηθεί 10 μέτρα προτού αλλάξει κατεύθυνση (σημειώνεται ότι η περιοχή προσομοίωσης έχει διαστάσεις $300 \times 600 \text{m}^2$). Όπως φαίνεται

στο σχήμα, ο ΚΚ δεν περιπλανιέται μακριά από την αρχική του θέση. Συνοψίζοντας, αν ο στόχος της μελέτης επίδοσης είναι η αξιολόγηση ενός ημιστατικού δικτύου, τότε πρέπει να δοθεί μια μικρή τιμή στην παράμετρο (χρόνος ή απόσταση μετάβασης) για την αλλαγή της κατεύθυνσης του ΚΚ, αλλιώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια μεγαλύτερη τιμή.

II. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων (Random Waypoint Mobility Model)

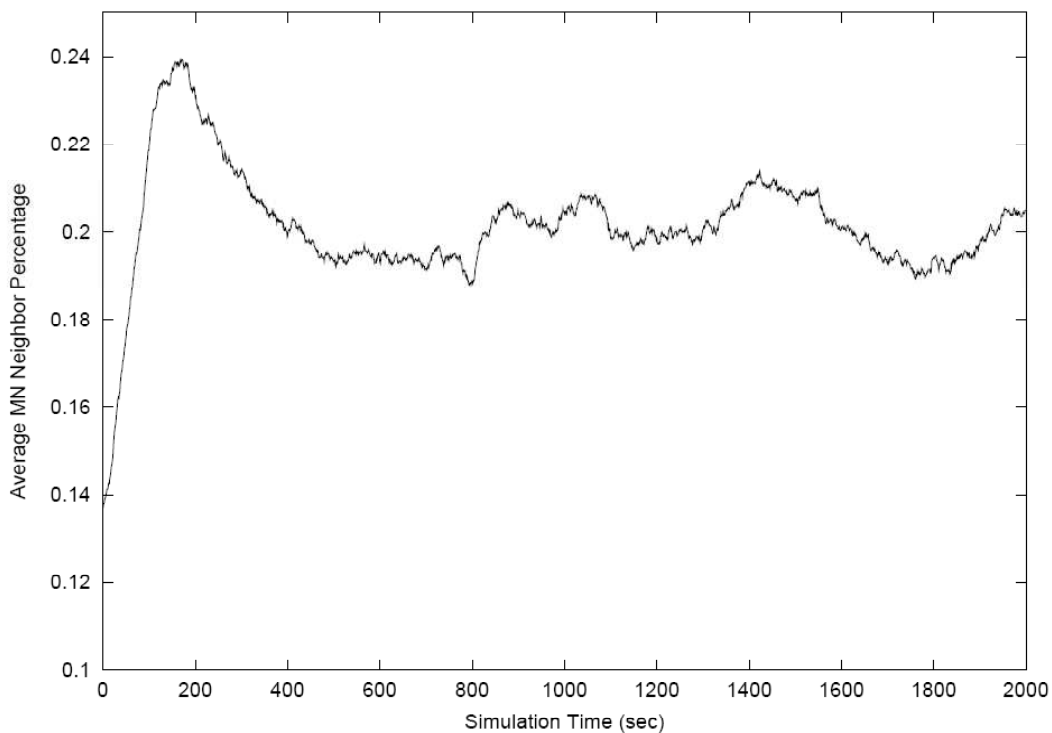
Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Johnson και Maltz [8] και σύντομα η χρήση του διαδόθηκε λόγω της απλότητας του και της ευρείας διαθεσιμότητάς του. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει χρόνους παύσης μεταξύ των αλλαγών στην κατεύθυνση και την ταχύτητα [9]. Ένας ΚΚ παραμένει σε μια θέση για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (χρόνο παύσης, pause time). Μετά τη λήξη της χρονικής αυτής περιόδου, ο ΚΚ διαλέγει έναν τυχαίο προορισμό μέσα στην περιοχή προσομοίωσης καθώς και μια τιμή της ταχύτητας, η οποία συνήθως είναι ομοιόμορφα κατανομημένη εντός του διαστήματος τιμών [minspeed, maxspeed]. Στη συνέχεια, ο ΚΚ κινείται προς τον επιλεγθέντα προορισμό με την επιλεγθείσα ταχύτητα και αφού καταφθάσει εκεί, σταματά για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, προτού ξεκινήσει και πάλι την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε.

Το Σχήμα 1.3 παρουσιάζει ένα παράδειγμα της κίνησης ενός ΚΚ που χρησιμοποιεί το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, ξεκινώντας από ένα τυχαία επιλεγμένο σημείο, τη θέση (133,180). Η ταχύτητα του ΚΚ στο σχήμα επιλέγεται ομοιόμορφα μεταξύ των τιμών 0 και 10 m/s. Παρατηρούμε πως το διάγραμμα κίνησης ενός ΚΚ που ακολουθεί το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων είναι παρόμοιο με το αντίστοιχο ενός ΚΚ που ακολουθεί το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου αν ο χρόνος παύσης στο πρώτο τεθεί ίσος με μηδέν, [minspeed, maxspeed] = [speedmin, speedmax] και το μήκος μετάβασης στο δεύτερο είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις της περιοχής προσομοίωσης.



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα κίνησης ενός κινητού κόμβου που ακολουθεί το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

Στις περισσότερες μελέτες επίδοσης που χρησιμοποιούν το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, τα κινητά τερματικά αρχικά κατανέμονται ομοιόμορφα μέσα στην περιοχή προσομοίωσης. Αυτή η αρχική ομοιόμορφη κατανομή των ΚΚ δεν είναι αντιπροσωπευτική του τρόπου με τον οποίο οι κόμβοι κατανέμονται κατά τη διάρκεια της κίνησής τους στη σταθερή κατάσταση. Το Σχήμα 1.4 παρουσιάζει το συσσωρευτικό μέσο ποσοστό των γειτόνων ενός ΚΚ με την πάροδο του χρόνου (η ταχύτητα είναι 1 m/s και ο χρόνος παύσης είναι ίσος με μηδέν). Το μέσο ποσοστό των γειτόνων του ΚΚ είναι το συσσωρευτικό ποσοστό των συνολικών ΚΚ που είναι γείτονες του συγκεκριμένου ΚΚ. Για παράδειγμα, αν υπάρχουν 50 ΚΚ στο δίκτυο και ένας κόμβος έχει 10 γείτονες, τότε το τρέχον ποσοστό γειτόνων του είναι 20%. Ως γείτονας ενός ΚΚ, θεωρείται οποιοσδήποτε κόμβος βρίσκεται εντός του εύρους εκπομπής του συγκεκριμένου ΚΚ. Όπως παρατηρείται από το σχήμα, υπάρχει μια μεγάλη μεταβλητότητα στο μέσο ποσοστό των γειτόνων ενός ΚΚ κατά τη διάρκεια των πρώτων 600 δευτερολέπτων του χρόνου προσομοίωσης. Αυτή η μεταβλητότητα θα παράγει μια επίσης υψηλή διακύμανση στα αποτελέσματα της επίδοσης εκτός κι αν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπολογίζονται μετά από μεγάλους χρόνους προσομοίωσης [10].

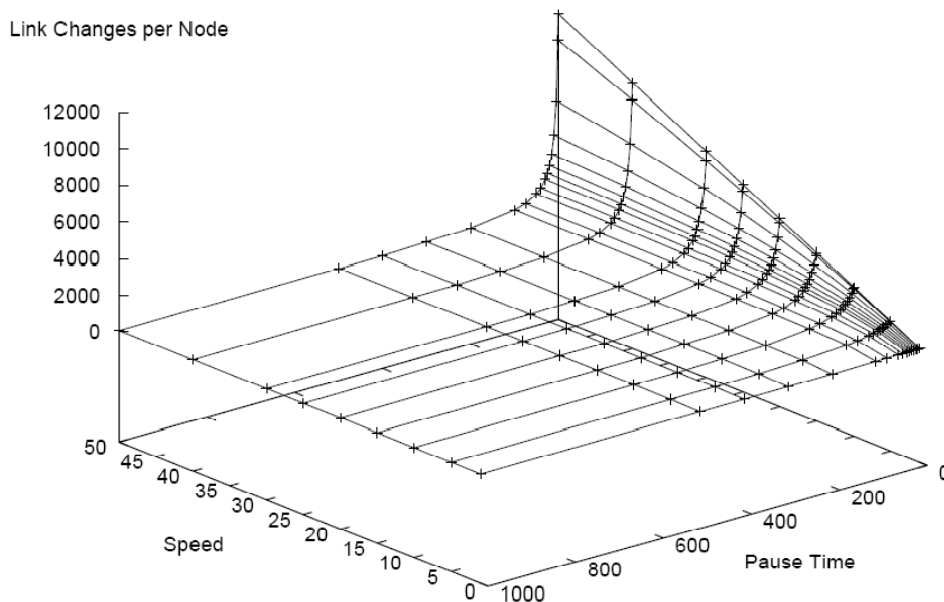


Σχήμα 1.4: Μέσο ποσοστό γειτόνων ενός κόμβου σε σχέση με το χρόνο από την έναρξη της προσομοίωσης

Στη συνέχεια, προτείνονται τρεις πιθανές λύσεις για την αποφυγή αυτού του προβλήματος αρχικοποίησης που διαπιστώθηκε. Μια πρώτη λύση είναι η αποθήκευση των θέσεων των κινητών κόμβων μετά από μια προσομοίωση που διήρκεσε αρκετό χρονικό διάστημα (ώστε να έχει ξεπεραστεί αυτή η αρχική υψηλή μεταβλητότητα) και η χρησιμοποίηση αυτών των θέσεων ως αρχικών θέσεων εκκίνησης των κινητών κόμβων σε όλες τις μελλοντικές προσομοιώσεις. Η δεύτερη λύση συνίσταται στην προσπάθεια να

κατανεμηθούν αρχικά οι κόμβοι με τέτοιο τρόπο ώστε να παραπέμπουν σε μια κατανομή πιο κοντινή σε αυτήν της μόνιμης κατάστασης. Για παράδειγμα, η αρχική τοποθέτηση των κόμβων με βάση την τριγωνική κατανομή, είναι δυνατόν να κατανεμίσει τους κόμβους στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων ακριβέστερα σε σύγκριση με την ομοιόμορφη κατανομή των κινητών κόμβων στην περιοχική προσομοίωση [11]. Τέλος, προτείνεται η απόρριψη των πρώτων 1000 δευτερολέπτων του χρόνου προσομοίωσης που παράγονται από το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε κάθε δοκιμή προσομοίωσης. Η απόρριψη αυτή εγγυάται ότι το πρόβλημα της αρχικοποίησης αφαιρείται ακόμη και αν οι κινητοί κόμβοι κινούνται αργά (για γρηγορότερους κόμβους δηλαδή μπορούμε να απορρίψουμε λιγότερα δευτερόλεπτα του χρόνου προσομοίωσης). Επιπρόσθετα, η απόρριψη των πρώτων 1000 δευτερολέπτων εξασφαλίζει πως κάθε προσομοίωση έχει μια τυχαία αρχική διαμόρφωση, γεγονός που αποτελεί επιπλέον πλεονέκτημα σε σχέση με την πρώτη προτεινόμενη λύση.

Υπάρχει επίσης μια περίπλοκη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του κόμβου και του χρόνου παύσης στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Για παράδειγμα, ένα σενάριο με γρήγορους ΚΚ και μεγάλους σε διάρκεια χρόνους παύσης παράγει στην πραγματικότητα ένα πιο σταθερό δίκτυο σε σχέση με ένα σενάριο με πιο αργούς ΚΚ και συντομότερους χρόνους παύσης. Το Σχήμα 1.5 παρουσιάζει το ρυθμό διακοπής της ζεύξης, χρησιμοποιώντας το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, ως συνάρτηση του χρόνου παύσης και της ταχύτητας. Από το σχήμα διαπιστώνουμε πως για μεγάλες τιμές του χρόνου παύσης (π.χ. μεγαλύτερες από 20 δευτερόλεπτα) έχουμε τη δημιουργία ενός σταθερού δικτύου (δηλαδή λίγες αλλαγές ζεύξης ανά κόμβο), ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες [10]. Με άλλα λόγια, το σχήμα αυτό υποδεικνύει πως το κινητό δίκτυο είναι αρκετά σταθερό για όλες τις τιμές του χρόνου παύσης που είναι μεγαλύτερες από 20 δευτερόλεπτα.

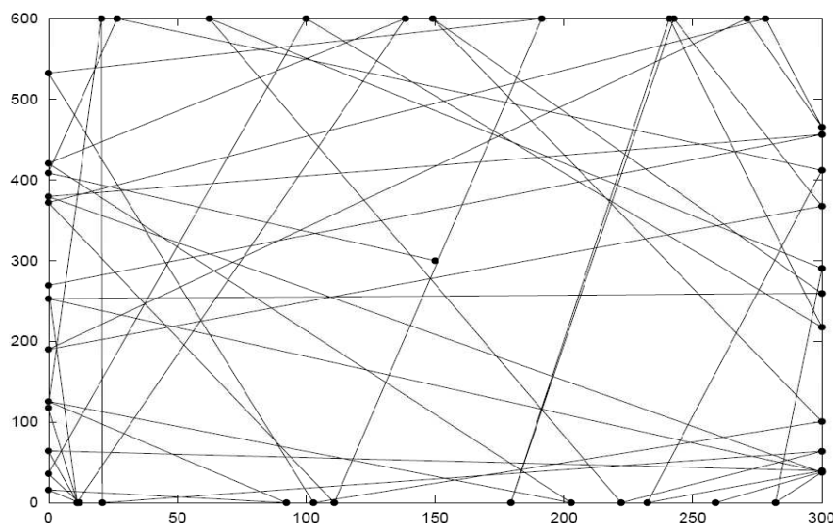


Σχήμα 1.5: Ρυθμός διακοπής ζεύξης σε συνάρτηση με την ταχύτητα και το χρόνο παύσης στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

III. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης (Random Direction Mobility Model)

Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης προτάθηκε από τους Royer, Melliar-Smith και Moser [12]. Αντιμετωπίζει τα προβλήματα της μη ομοιόμορφης χωρικής κατανομής των ΚΚ και των κυμάτων πυκνότητας (density waves) στο μέσο αριθμό των γειτόνων, τα οποία προκύπτουν από το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων [12]. Ένα κύμα πυκνότητας είναι η συσσώρευση (clustering) των κόμβων σε ένα μέρος της περιοχής προσομοίωσης. Στην περίπτωση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων αυτή η συσσώρευση λαμβάνει χώρα κοντά στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης και η πιθανότητα ένας ΚΚ να επιλέξει έναν καινούριο προορισμό, ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης ή έναν προορισμό ο οποίος απαιτεί μια διαδρομή μέσω του κέντρου της περιοχής προσομοίωσης, είναι μεγάλη, όπως εύκολα άλλωστε διαπιστώνεται παρατηρώντας το Σχήμα 1.3. Κατά συνέπεια, οι κινητοί κόμβοι φαίνονται διαδοχικά να συγκλίνουν, να αποκλίνουν και να συγκλίνουν και πάλι.

Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης αναπτύχθηκε λοιπόν για να αποτρέπει αυτού του είδους τη συμπεριφορά των κόμβων και για να προκύπτει ένας ημισταθερός αριθμός γειτόνων για κάθε κόμβο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης [12]. Στο μοντέλο αυτό, ένας ΚΚ επιλέγει μια τυχαία ταχύτητα και μια τυχαία κατεύθυνση στην οποία ταξιδεύει με παρόμοιο τρόπο προς το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου. Ακολούθως, ο ΚΚ κινείται προς το σύνορο της περιοχής προσομοίωσης σε αυτή την κατεύθυνση. Όταν καταφθάσει στο όριο της περιοχής, κάνει στάση για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια επιλέγει μια ταχύτητα και μια κατεύθυνση (μεταξύ 0 και 180 μοίρες σε σχέση με το σύνορο) και συνεχίζει τη διαδικασία. Το Σχήμα 1.6 παρουσιάζει ένα παράδειγμα της διαδρομής ενός ΚΚ, ο οποίος ξεκινά το ταξίδι του από το κέντρο της περιοχής προσομοίωσης, δηλαδή από τη θέση (150, 300), χρησιμοποιώντας το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης. Οι τελείες στο σχήμα απεικονίζουν τη στιγμή που ο ΚΚ έχει φτάσει στο σύνορο, έχει σταματήσει και στη συνέχεια έχει επιλέξει μια καινούρια κατεύθυνση και ταχύτητα.



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα κίνησης ενός κινητού κόμβου σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης

Μια μικρή παραλλαγή του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης είναι το Τροποποιημένο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης (Modified Random Direction Mobility Model) [12], στο οποίο οι κινητοί κόμβοι εξακολουθούν να διαλέγουν τυχαίες κατευθύνσεις, ωστόσο δεν είναι πλέον αναγκασμένοι να φτάσουν στο σύνορο της περιοχής προσομοίωσης προτού σταματήσουν για να αλλάξουν κατεύθυνση κίνησης. Αντιθέτως, κάθε ΚΚ επιλέγει μια τυχαία κατεύθυνση και διαλέγει έναν προορισμό οπουδήποτε πάνω στην κατεύθυνση κίνησης. Στη συνέχεια, σταματά στον προορισμό αυτό για κάποιο χρονικό διάστημα προτού να διαλέξει μια νέα τυχαία κατεύθυνση μεταξύ 0 και 360°. Αυτή η παραλλαγή του μοντέλου, παράγει διαγράμματα κίνησης που θα μπορούσαν να προσομοιωθούν επίσης από το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου με χρόνους παύσης. Και για τις δύο αυτές εκδόσεις του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, οι Royer, Melliar-Smith και Moser αναφέρουν πως στο συγκεκριμένο μοντέλο υφίσταται μια μικρότερη διακύμανση στην πυκνότητα των κόμβων σε σύγκριση με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων.

1.2.2. Μοντέλα κινητικότητας με χρονική εξάρτηση (Mobility models with temporal dependency)

I. Μοντέλο Κινητικότητας Gauss – Markov (Gauss – Markov Mobility Model)

Το Μοντέλο Κινητικότητας Gauss – Markov προτάθηκε αρχικά από τους Liang και Haas στο [5], για την προσομοίωση ενός Προσωπικού Συστήματος Επικοινωνιών (Personal Communication System – PCS), ωστόσο στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε και για την προσομοίωση πρωτοκόλλων ad hoc δικτύων [13]. Το μοντέλο αυτό σχεδιάστηκε ώστε να προσαρμόζεται σε διαφορετικά επίπεδα τυχειότητας μέσω μιας μεταβλητής παραμέτρου. Αρχικά, σε κάθε κινητό κόμβο ανατίθεται μια τρέχουσα ταχύτητα και κατεύθυνση. Σε καθορισμένα διαστήματα του (διακριτού) χρόνου, n , η κίνηση επιτυγχάνεται με την ανανέωση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του κάθε ΚΚ. Συγκεκριμένα, η τιμή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης στη n -οστή στιγμή, υπολογίζεται με βάση την τιμή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης στη $(n-1)$ -οστή στιγμή και μια τυχαία μεταβλητή χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} s_n &= \alpha s_{n-1} + (1-\alpha)\bar{s} + \sqrt{1-\alpha^2} s_{x_{n-1}} \\ d_n &= \alpha d_{n-1} + (1-\alpha)\bar{d} + \sqrt{1-\alpha^2} d_{x_{n-1}} \end{aligned} \quad (1.1)$$

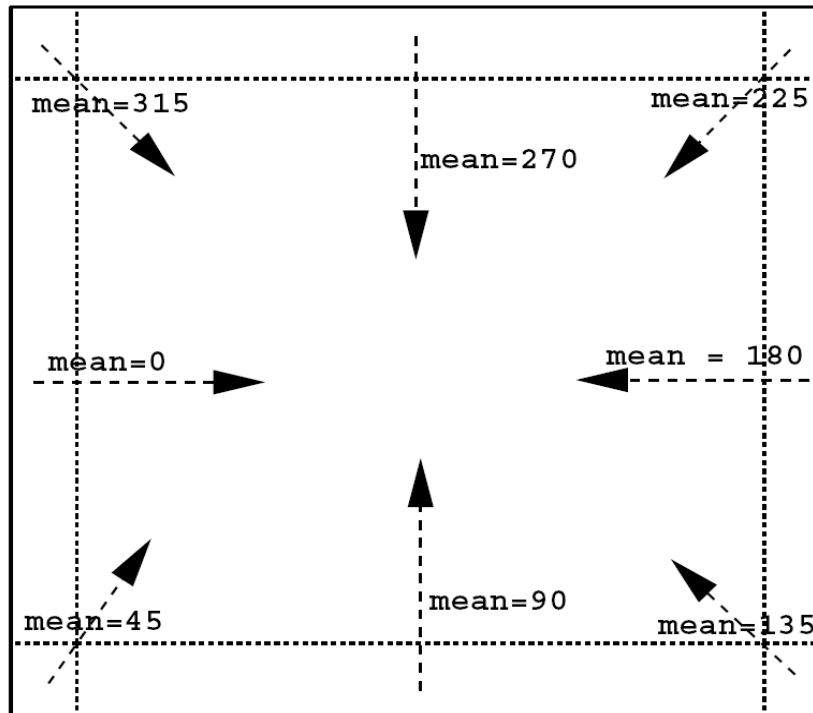
όπου τα s_n και d_n είναι η καινούρια ταχύτητα και κατεύθυνση (γωνία κίνησης) του ΚΚ στο χρονικό διάστημα n , α , όπου $0 < \alpha < 1$, είναι η μεταβλητή παράμετρος που χρησιμοποιείται για να μεταβάλει την τυχειότητα, \bar{s} και \bar{d} είναι σταθερές που αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης καθώς $n \rightarrow \infty$ και $s_{x_{n-1}}$ και $d_{x_{n-1}}$ είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την Γκαουσιανή κατανομή. Θέτοντας $\alpha=0$, παίρνουμε εντελώς τυχαίες τιμές (ή κίνηση Brownian) ενώ θέτοντας $\alpha=1$ παρατηρείται ευθύγραμμη ομαλή κίνηση [5]. Ενδιάμεσα επίπεδα τυχειότητας παρατηρούνται μεταβάλλοντας την τιμή του α μεταξύ 0 και 1.

Σε κάθε χρονικό διάστημα, η επόμενη θέση υπολογίζεται με βάση την τρέχουσα θέση, ταχύτητα και κατεύθυνση της κίνησης. Συγκεκριμένα, στο χρονικό διάστημα n , η θέση ενός ΚΚ δίνεται από τις εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} x_n &= x_{n-1} + s_{n-1} \cos d_{n-1} \\ y_n &= y_{n-1} + s_{n-1} \sin d_{n-1} \end{aligned} \quad (1.2)$$

όπου (x_n, y_n) και (x_{n-1}, y_{n-1}) είναι οι x και y συντεταγμένες της θέσης του ΚΚ στο n -οστό και $(n-1)$ -οστό χρονικά διαστήματα αντίστοιχα και s_{n-1} και d_{n-1} είναι η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ΚΚ αντίστοιχα στο $(n-1)$ -οστό χρονικό διάστημα.

Για να βεβαιωθούμε πως ένας ΚΚ δεν παραμένει κοντά στο άκρο της περιοχής προσομοίωσης για μεγάλη χρονική περίοδο, οι κινητοί κόμβοι εξαναγκάζονται να απομακρυνθούν από το σύνορο όταν κινούνται μέσα σε μια συγκεκριμένη απόσταση από αυτό. Αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας τη μεταβλητή της μέσης κατεύθυνσης \bar{d} στην πιο πάνω εξίσωση της κατεύθυνσης. Για παράδειγμα, όταν ένας ΚΚ βρίσκεται κοντά στο δεξί άκρο της περιοχής προσομοίωσης, η τιμή της μεταβλητής \bar{d} αλλάζει στις 180 μοίρες. Επομένως, η νέα κατεύθυνση του ΚΚ είναι μακριά από το δεξί άκρο της περιοχής προσομοίωσης. Οι τιμές της μέσης κατεύθυνσης για διαφορετικές θέσεις στην περιοχή προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.7.



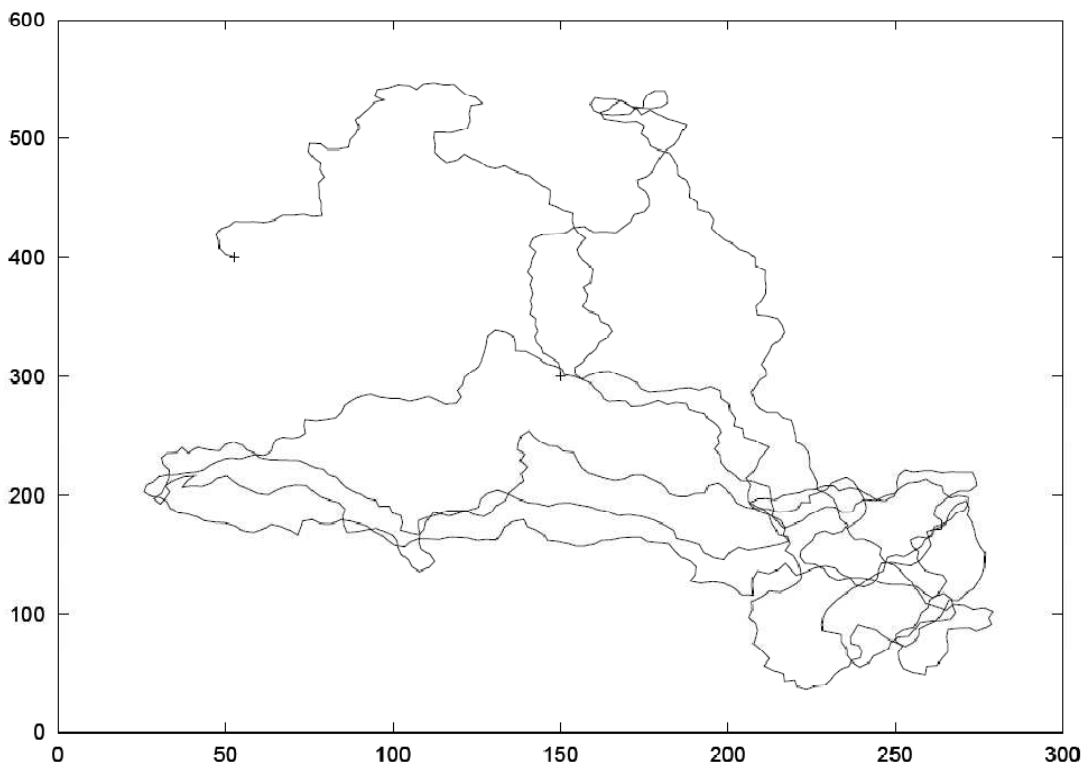
Σχήμα 1.7: Μεταβολή της μέσης κατεύθυνσης (γωνίας κίνησης) κοντά στα όρια της περιοχής προσομοίωσης

Το Σχήμα 1.8 παρουσιάζει ένα παράδειγμα ενός διαγράμματος κίνησης ενός ΚΚ που ακολουθεί το Μοντέλο Κινητικότητας Gauss-Markov. Ο ΚΚ ξεκινά την κίνηση του στο

κέντρο της περιοχής προσομοίωσης, δηλαδή τη θέση (150, 300), και κινείται για 1000 δευτερόλεπτα. Στο Σχήμα 1.8, το χρονικό βήμα είναι 1 δευτερόλεπτο, το α είναι 0.75, και τα $s_{x_{n-1}}$ και $d_{x_{n-1}}$ επιλέγονται από μια τυχαία κατανομή Gauss με μέση τιμή ίση με μηδέν και τυπική απόκλιση ίση με ένα. Η τιμή του \bar{s} ορίζεται σταθερή στα 10 m/s και η τιμή του \bar{d} αρχικοποιείται στις 90 μοίρες, αλλάζει ωστόσο με το χρόνο σύμφωνα με την εγγύτητα του κόμβου στο σύνορο.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8, το Μοντέλο Gauss-Markov έχει τη δυνατότητα να εξουδετερώνει τις ξαφνικές στάσεις και τις απότομες στροφές που προκύπτουν από το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου, αφού επιτρέπει στις προηγούμενες ταχύτητες (και κατευθύνσεις) να επηρεάζουν τις μελλοντικές ταχύτητες (και κατευθύνσεις).

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε πως υπάρχουν και άλλες υλοποιήσεις του συγκεκριμένου μοντέλου. Για παράδειγμα, η διαδικασία Markov μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας στις εξισώσεις για τα x και y αντί μέσω των μεταβλητών ταχύτητας και κατεύθυνσης. Επιπρόσθετα, αντί να χρησιμοποιηθεί μια εξίσωση κατεύθυνσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εξίσωση για το διάνυσμα της ταχύτητας.



Σχήμα 1.8: Διάγραμμα κίνησης ενός κινητού κόμβου σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Gauss – Markov

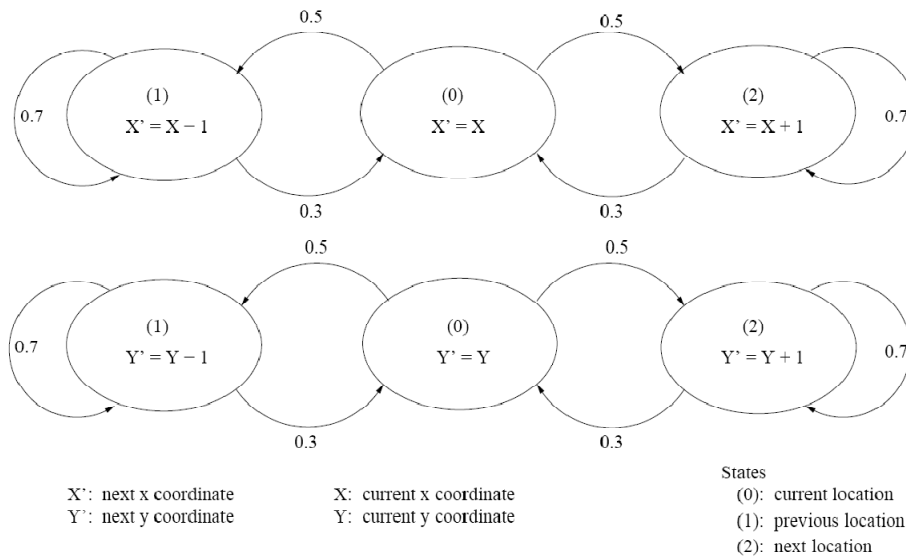
II. Πιθανοτική εκδοχή του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου (Probabilistic Version of Random Walk Mobility Model)

Αυτό το μοντέλο κινητικότητας προτάθηκε από τον Chiang και χρησιμοποιεί ένα πίνακα πιθανοτήτων για να καθορίσει τη θέση ενός συγκεκριμένου ΚΚ στο επόμενο βήμα. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από τρεις διαφορετικές καταστάσεις για τη θέση x και τρεις διαφορετικές καταστάσεις για τη θέση y [14]. Η κατάσταση 0 παριστάνει την παραμονή στην ίδια τρέχουσα (x, y) θέση ενός ΚΚ, η κατάσταση 1 περιγράφει την κίνηση που μειώνει τη $(x \text{ ή } y)$ συνιστώσα της θέσης του ΚΚ και τέλος, η κατάσταση 2, παριστάνει την κίνηση που αυξάνει τη $(x \text{ ή } y)$ συνιστώσα της θέσης. Ο πίνακας πιθανοτήτων που χρησιμοποιείται, και αναφέρεται στις πιθανότητες μετάβασης από μια κατάσταση σε μία άλλη, είναι ο εξής:

$$P = \begin{pmatrix} p(0,0) & p(0,1) & p(0,2) \\ p(1,0) & p(1,1) & p(1,2) \\ p(2,0) & p(2,1) & p(2,2) \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

όπου κάθε στοιχείο του πίνακα $p(a,b)$ αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ο ΚΚ να μεταβεί από την κατάσταση a στην κατάσταση b . Οι τιμές στον πίνακα πιθανοτήτων χρησιμοποιούνται για να ανανεωθούν τόσο η θέση x όσο και η θέση y του ΚΚ. Στον προσομοιωτή του Chiang, κάθε κόμβος κινείται τυχαία με μια προκαθορισμένη μέση ταχύτητα. Ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει τις τιμές που χρησιμοποίησε ο Chiang για τον υπολογισμό των κινήσεων x και y :

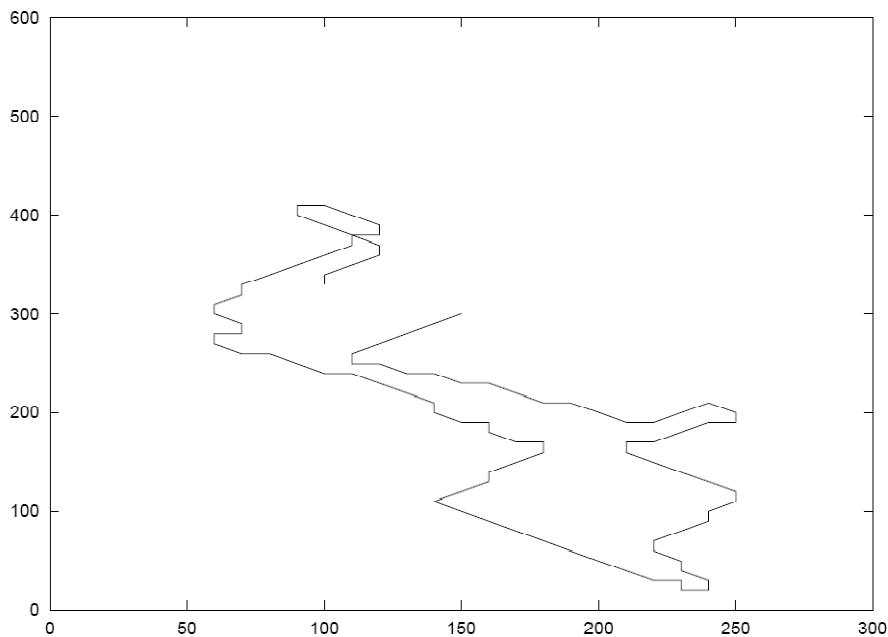
$$P1 = \begin{pmatrix} 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0.7 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$



Σχήμα 1.9: Διάγραμμα καταστάσεων της Πιθανοτικής Εκδοχής του Τυχαίου Περιπάτου

Αυτές οι τιμές παρουσιάζονται μέσω ενός διαγράμματος καταστάσεων στο Σχήμα 1.9. Αφού οι τιμές αυτές έχουν οριστεί, ένας κινητός κόμβος έχει τη δυνατότητα να προχωρήσει ένα βήμα προς οποιαδήποτε από τις τέσσερις δυνατές κατευθύνσεις (δηλαδή βορράς, νότος, ανατολή ή δύση), δεδομένου ότι συνεχίζει να κινείται, δηλαδή ο χρόνος παύσης είναι μηδενικός. Επιπρόσθετα, η πιθανότητα ένας ΚΚ να συνεχίζει να ακολουθεί την ίδια κατεύθυνση είναι πολύ μεγαλύτερη από την πιθανότητα ο ΚΚ να αλλάξει κατεύθυνση. Τέλος, οι τιμές που έχουν οριστεί, εμποδίζουν τις κινήσεις μεταξύ διαφορετικών κατευθύνσεων χωρίς τη μεσολάβηση ενός χρόνου παύσης. Αυτή η υλοποίηση παράγει πιθανοτικές παρά γνήσια τυχαίες κινήσεις, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει περισσότερο ρεαλιστικές συμπεριφορές. Για παράδειγμα, καθώς οι άνθρωποι επιτελούν τις καθημερινές τους εργασίες, τείνουν να συνεχίζουν να κινούνται σε μια ημισταθερή έμπροσθεν κατεύθυνση. Μάλιστα, σπάνια γυρίζουμε πίσω για να ακολουθήσουμε εκ νέου την προηγούμενη διαδρομή μας και σχεδόν ποτέ δεν κάνουμε τυχαία βήματα ελπίζοντας πως τελικά μπορεί να καταλήξουμε κάπου σχετικά κοντά με τον προορισμό μας. Ωστόσο, μπορεί να αποδειχθεί αρκετά δύσκολο, αν όχι απίθανο, να επιλέξουμε κατάλληλες τιμές των $p(a,b)$ για συγκεκριμένες εξομοιώσεις εκτός κι αν τα ίχνη είναι διαθέσιμα για ένα δεδομένο σενάριο κίνησης.

Το Σχήμα 1.10 παρουσιάζει ένα παράδειγμα διαγράμματος κίνησης ενός ΚΚ που χρησιμοποιεί την Πιθανοτική Εκδοχή του Μοντέλου Τυχαίου Περιπάτου. Στο παράδειγμα αυτό, ο ΚΚ ξεκινάει την κίνησή του από το κέντρο της περιοχής προσομοίωσης ή τη θέση (150, 300) και κινείται σύμφωνα με τον πιο πάνω πίνακα πιθανοτήτων και τις καταστάσεις που περιγράφηκαν. Το μέγεθος του βήματος στο παράδειγμα τίθεται ίσο με 10m. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο ΚΚ κινείται σε ευθείες γραμμές στις αντίστοιχες χρονικές περιόδους και δεν παρουσιάζει την έντονα μεταβαλλόμενη κατεύθυνση που παρατηρείται στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου.



Σχήμα 1.10: Διάγραμμα κίνησης ενός κινητού κόμβου που ακολουθεί την Πιθανοτική Εκδοχή του Τυχαίου Περιπάτου

III. Ομαλό Τυχαίο Μοντέλο Κινητικότητας (Smooth Random Mobility Model)

Ένα άλλο μοντέλο κινητικότητας που λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση της ταχύτητας από το χρόνο στις διάφορες χρονικές στιγμές είναι το Ομαλό Τυχαίο Μοντέλο Κινητικότητας (Smooth Random Mobility Model). Όπως έχει περιγραφεί από τον Bettstetter [15], η χωρίς μνήμη φύση των Μοντέλων Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου και Τυχαίων Στάσεων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μη ρεαλιστικές συμπεριφορές κίνησης. Σε αντίθεση με τις απότομες στροφές και την ξαφνική επιτάχυνση ή επιβράδυνση, ο Bettstetter προτείνει τη σταδιακή και ομαλή αλλαγή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης κάθε κόμβου.

Έχει παρατηρηθεί ακόμη πως οι κινητοί κόμβοι στην πραγματικότητα τείνουν να κινούνται με κάποιες συγκεκριμένες προτιμώμενες ταχύτητες $\{V_{\text{πρωτ}}^1, V_{\text{πρωτ}}^2, \dots, V_{\text{πρωτ}}^n\}$, παρά με ταχύτητες που κατανέμονται ομοιόμορφα στο διάστημα $[V_{\text{min}}, V_{\text{max}}]$. Κατά συνέπεια, στο Ομαλό Τυχαίο Μοντέλο Κινητικότητας, η κατανομή πιθανότητας της ταχύτητας ενός κόμβου έχει ως ακολούθως: το γεγονός η ταχύτητα να βρίσκεται μέσα στο σύνολο των προτιμώμενων ταχυτήτων περιγράφεται από μια υψηλή πιθανότητα, ενώ για το υπόλοιπο μέρος ολόκληρου του διαστήματος $[0, V_{\text{max}}]$ υποτίθεται μια ομοιόμορφη κατανομή. Για παράδειγμα, αν ο κόμβος έχει προτιμώμενο σύνολο ταχυτήτων το $\{0, 0.5V_{\text{max}}, V_{\text{max}}\}$, τότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας είναι:

$$f_V(v) = \begin{cases} \Pr(v=0)\delta(v), & v=0 \\ \Pr(v=0.5V_{\text{max}})\delta(v-0.5V_{\text{max}}), & v=0.5V_{\text{max}} \\ \Pr(v=V_{\text{max}})\delta(v-V_{\text{max}}), & v=V_{\text{max}} \\ \frac{1 - \Pr(v=0) - \Pr(v=0.5V_{\text{max}}) - \Pr(v=V_{\text{max}})}{V_{\text{max}}}, & 0 < v < V_{\text{max}}, v \neq \{0, 0.5V_{\text{max}}, V_{\text{max}}\} \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (1.5)$$

όπου θεωρούμε ότι ισχύει $\Pr(v=0) + \Pr(v=0.5V_{\text{max}}) + \Pr(v=V_{\text{max}}) < 1$.

Στο Ομαλό Τυχαίο Μοντέλο Κινητικότητας, η συχνότητα της αλλαγής της ταχύτητας θεωρείται ως μια διαδικασία Poisson. Σε κάθε γεγονός αλλαγής της ταχύτητας μια καινούρια επιδιωκόμενη ταχύτητα v_{n+1} επιλέγεται σύμφωνα με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της πιο πάνω σχέσης. Ακολούθως, η ταχύτητα του κινητού κόμβου αυξάνεται ή μειώνεται σταδιακά από την τρέχουσα ταχύτητα v_n στην καινούρια επιδιωκόμενη ταχύτητα με επιτάχυνση ή επιβράδυνση $a(t)$. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης είναι ομοιόμορφη στα διαστήματα $[0, a_{\text{max}}]$ για επιτάχυνση και $[a_{\text{min}}, 0]$ για επιβράδυνση, δηλαδή:

$$f_A(a) = \begin{cases} 1/a_{\text{max}}, & \text{για επιτάχυνση } 0 \leq a \leq a_{\text{max}} \\ 1/|a_{\text{min}}|, & \text{για επιβράδυνση } a_{\text{min}} \leq a \leq 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (1.6)$$

Για κάθε χρονική στιγμή t , θεωρώντας ότι οι χρονικές στιγμές υπολογισμού της ταχύτητας και της θέσης απέχουν κατά Δt , η καινούρια ταχύτητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v(t) = v(t-\Delta t) + a(t)\Delta t$$

Επομένως, η ταχύτητα είναι δυνατό να ελέγχεται ώστε να αυξάνεται ή να μειώνεται σταδιακά και με διαφορετικό ρυθμό. Αν η $a(t)$ έχει μικρή τιμή, τότε η ταχύτητα μεταβάλλεται αργά και ο βαθμός της χρονικής συσχέτισης αναμένεται να είναι μεγάλος. Σε διαφορετική περίπτωση, η ταχύτητα μπορεί να αλλάζει γρήγορα και η χρονική συσχέτιση είναι σχετικά μικρή.

Σε αντίθεση με την ταχύτητα, η κατεύθυνση της κίνησης στο συγκεκριμένο μοντέλο κινητικότητας θεωρείται πως ακολουθεί μια γνήσια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 2\pi]$, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$f_{\phi}(\varphi) = \frac{1}{2\pi}, \quad \text{όπου } 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (1.7)$$

Από τη στιγμή που έχει επιλεγεί η κατεύθυνση της κίνησης, ο κόμβος κινείται σε μια ευθεία γραμμή μέχρις ότου η κατεύθυνση μεταβληθεί. Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών αλλαγών της κατεύθυνσης θεωρείται πως ακολουθεί μια εκθετική κατανομή [15]. Όταν η κατεύθυνση πρόκειται να αλλάξει, η καινούρια κατεύθυνση της κίνησης επιλέγεται και αυτή σύμφωνα με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της εξίσωσης (1.7). Η μεταβολή της κατεύθυνσης ορίζεται ως η διαφορά της κατεύθυνσης $\Delta\varphi(t)$ μεταξύ της νέας κατεύθυνσης $\varphi(t)$ και της παλιάς κατεύθυνσης $\varphi(t')$ σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta\varphi(t) = \begin{cases} \varphi(t) - \varphi(t') + 2\pi, & \text{όταν } -2\pi \leq \varphi(t) - \varphi(t') \leq -\pi \\ \varphi(t) - \varphi(t'), & \text{όταν } -\pi \leq \varphi(t) - \varphi(t') \leq \pi \\ \varphi(t) - \varphi(t') - 2\pi, & \text{όταν } \pi \leq \varphi(t) - \varphi(t') \leq 2\pi \end{cases} \quad (1.8)$$

Δεδομένου ότι η τιμή της μεταβολής της κατεύθυνσης $\Delta\varphi(t)$ κατανέμεται στο διάστημα $[-\pi, \pi]$, αυτή μπορεί να λάβει μεγάλη τιμή. Ωστόσο, η αλλαγή της κατεύθυνσης κίνησης πρέπει να είναι ομαλή και σταδιακή. Επομένως η μεγάλη τιμή της $\Delta\varphi(t)$ πρέπει να χωρίζεται σε επιμέρους μικρές μεταβολές κατεύθυνσης $\Delta\phi(t)$. Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή της $\Delta\phi(t)$ επιβάλλεται να έχει μια μικρή τιμή και παριστάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της μεταβολής της κατεύθυνσης μεταξύ διαδοχικών χρονικών στιγμών. Κατά συνέπεια, η αλλαγή κατεύθυνσης μπορεί να επιτευχθεί σε $\Delta\varphi(t) / \Delta\phi(t)$ χρονικές στιγμές.

Σε κάθε χρονική στιγμή της περιόδου μεταβολής της κατεύθυνσης, ο κινητός κόμβος αλλάζει την κατεύθυνση της κίνησης του μόνο κατά $\Delta\phi(t)$ μοίρες, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\varphi(t) = \varphi(t - \Delta t) + \Delta\phi(t) \quad (1.9)$$

Αυτή η μικρή μεταβολή στην κατεύθυνση επαναλαμβάνεται για $\Delta\varphi(t) / \Delta\Phi(t)$ χρονικές στιγμές, μέχρι ο κόμβος να αποκτήσει την νέα κατεύθυνση $\varphi(t)$. Ακολούθως, ο κόμβος συνεχίζει να κινείται σε αυτή τη νέα κατεύθυνση.

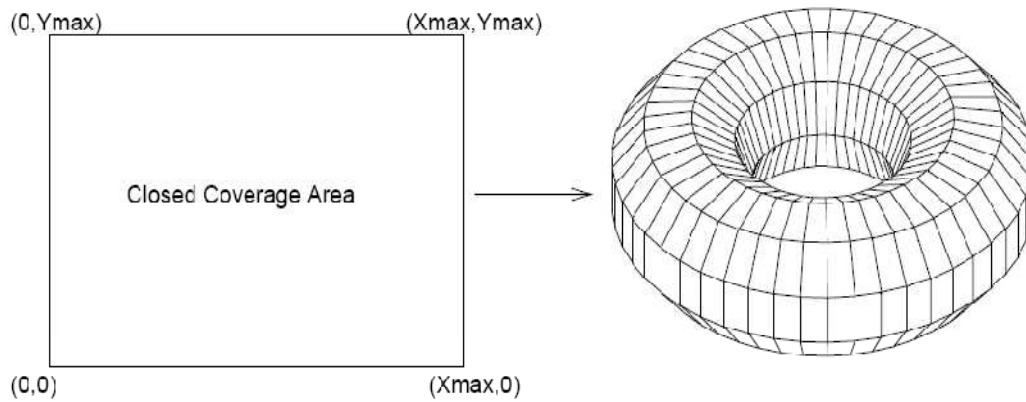
IV. Μοντέλο Κινητικότητας Περιοχής Προσομοίωσης Χωρίς Σύνορα (Boundless Simulation Area Mobility Model)

Στο Μοντέλο Κινητικότητας Περιοχής Προσομοίωσης Χωρίς Σύνορα επικρατεί και εδώ μια σχέση μεταξύ της προηγούμενης κατεύθυνσης και ταχύτητας κίνησης ενός ΚΚ με την τρέχουσα κατεύθυνση και ταχύτητά του [16]. Για την περιγραφή της ταχύτητας καθώς και της κατεύθυνσης θ του ΚΚ, χρησιμοποιείται ένα διάνυσμα ταχύτητας $\bar{v} = (v, \varphi)$, ενώ η θέση του ΚΚ παριστάνεται ως (x, y) . Τόσο το διάνυσμα ταχύτητας όσο και η θέση του κινητού κόμβου, ανανεώνονται κάθε Δt χρονικά βήματα σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} v(t + \Delta t) &= \min[\max(v(t) + \Delta v, 0), V_{max}] \\ \theta(t + \Delta t) &= \theta(t) + \Delta\theta \\ x(t + \Delta t) &= x(t) + v(t)\cos\theta(t) \\ y(t + \Delta t) &= y(t) + v(t)\sin\theta(t) \end{aligned} \tag{1.10}$$

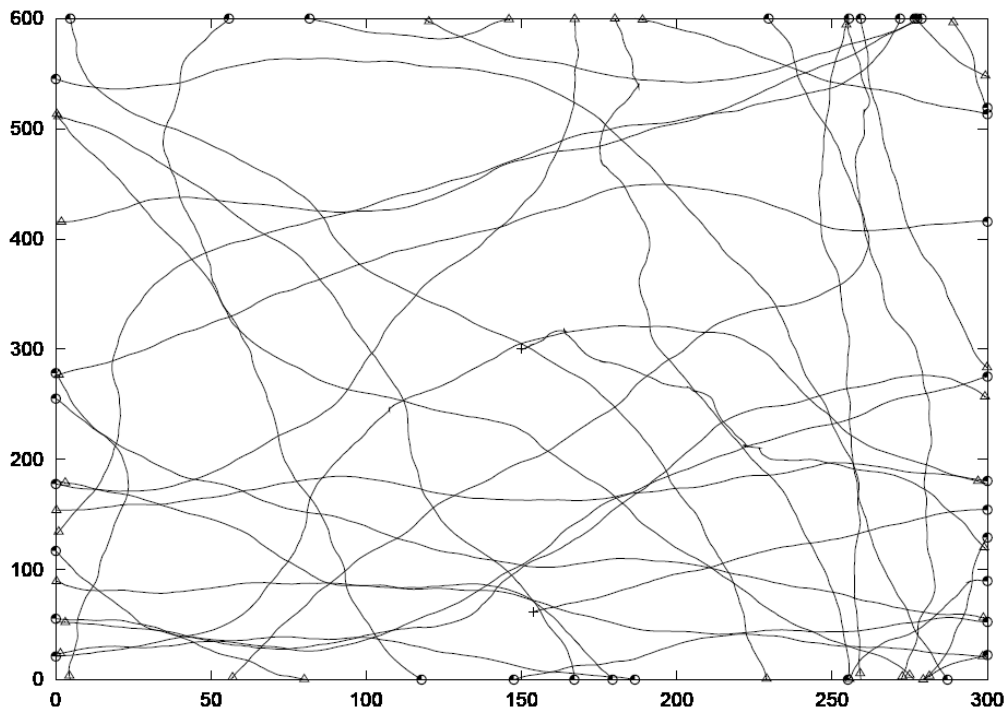
όπου V_{max} είναι η μέγιστη ταχύτητα που ορίζεται στην προσομοίωση, Δv είναι η μεταβολή της ταχύτητας, η οποία είναι ομοιόμορφα κατανομημένη μεταξύ $[-A_{max}\Delta t, A_{max}\Delta t]$, A_{max} είναι η μέγιστη επιτάχυνση/επιβράδυνση ενός συγκεκριμένου ΚΚ, $\Delta\theta$ είναι η μεταβολή στην κατεύθυνση, η οποία ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[-\alpha\Delta t, \alpha\Delta t]$, και α είναι ο μέγιστος ρυθμός αλλαγής στην κατεύθυνση κίνησης ενός ΚΚ.

Το Μοντέλο Κινητικότητας Περιοχής Προσομοίωσης Χωρίς Σύνορα διαφέρει επίσης στον τρόπο με τον οποίο χειρίζεται το σύνορο της περιοχής προσομοίωσης. Σε όλα τα μοντέλα κινητικότητας που έχουν αναφερθεί προηγουμένως, οι κινητοί κόμβοι ανακλούνται ή σταματούν να κινούνται όταν φτάσουν σε ένα από τα όρια της περιοχής προσομοίωσης. Ωστόσο, στο μοντέλο αυτό, οι κινητοί κόμβοι που φτάνουν σε μια πλευρά της περιοχής προσομοίωσης, συνεχίζουν το ταξίδι τους και επανεμφανίζονται στη συμμετρικά αντίθετη πλευρά της περιοχής προσομοίωσης. Η τεχνική αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας τοροειδούς επιφάνειας προσομοίωσης, επιτρέποντας έτσι στους κινητούς κόμβους να κινούνται ανεμπόδιστα. Το σχήμα 1.11 παρουσιάζει γραφικά αυτό το σκηνικό. Η ορθογώνια περιοχή στα αριστερά του σχήματος μετατρέπεται στο τοροειδές στα δεξιά του σχήματος σε δύο βήματα: πρώτα, διπλώνουμε την περιοχή προσομοίωσης έτσι ώστε το πάνω σύνορο ($y = Y_{max}$) να εφαρμόσει πάνω στο κάτω σύνορο ($y = 0$), σχηματίζοντας έναν κύλινδρο και ακολούθως λυγίζουμε τον κύλινδρο ώστε να ενωθούν τα δύο ανοιχτά του άκρα.



Σχήμα 1.11: Απεικόνιση της ορθογωνικής περιοχής προσομοίωσης σε ένα τόρο στο Μοντέλο Κινητικότητας Περιοχής Προσομοίωσης Χωρίς Σύνορα

Το σχήμα 1.12 απεικονίζει ένα παράδειγμα διαγράμματος κίνησης ενός ΚΚ που χρησιμοποιεί το Μοντέλο Κινητικότητας Περιοχής Προσομοίωσης Χωρίς Σύνορα, με $V_{max} = 10 \text{ m/s}$, $A_{max} = 10 \text{ m/s}^2$, $\alpha = \pi/2 \text{ rad/s} = 90^\circ/\text{s}$ και $\Delta t = 0.1\text{s}$. Ο ΚΚ ξεκινά από το κέντρο της περιοχής προσομοίωσης, δηλαδή τη θέση $(150, 300)$ και κινείται για 500 δευτερόλεπτα. Τα τρίγωνα στο σχήμα υποδεικνύουν το πότε ένας ΚΚ φτάνει σε ένα όριο και οι τελείες το σημείο όπου επανεμφανίζεται.



Σχήμα 1.12. Διάγραμμα κίνησης ενός ΚΚ που ακολουθεί το Μοντέλο Κινητικότητας Περιοχής Προσομοίωσης Χωρίς Σύνορα

1.2.3. Μοντέλα Κινητικότητας με Γεωγραφικό Περιορισμό (Mobility models with Geographic Restriction)

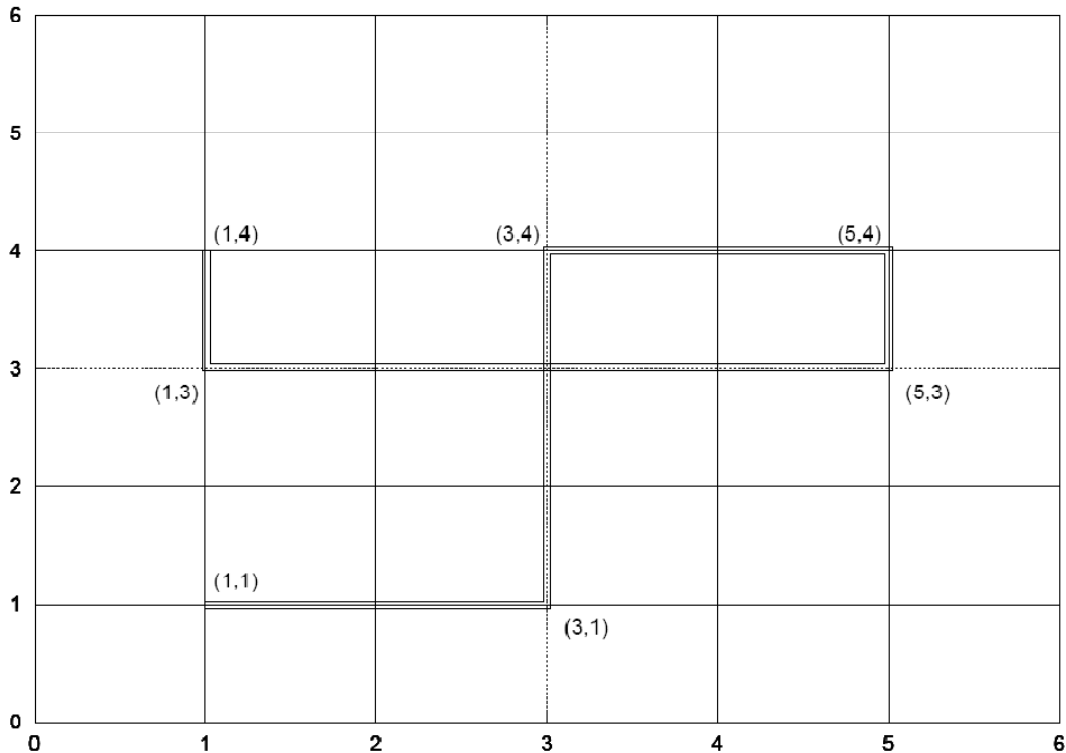
Στην παράγραφο αυτή εξετάζουμε έναν ακόμη περιορισμό που προκύπτει από τα πλήρως τυχαία μοντέλα που περιγράφηκαν στην παράγραφο 1, που είναι η χωρίς περιορισμούς κίνηση των κινητών κόμβων. Οι κινητοί κόμβοι στα προηγούμενα μοντέλα κινητικότητας μπορούσαν να κινούνται ελεύθερα και τυχαία οπουδήποτε στην περιοχή προσομοίωσης. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, παρατηρούμε πως η κίνηση ενός κόμβου υπόκειται σε περιορισμούς σε σχέση με το περιβάλλον του. Κάποια συγκεκριμένα παραδείγματα είναι η κίνηση των οχημάτων, η οποία περιορίζεται στους αυτοκινητόδρομους και στους τοπικούς δρόμους στις αστικές περιοχές και η κίνηση των πεζών σε μια πανεπιστημιούπολη, όπου οι πεζοί πιθανόν να εμποδίζονται στην κίνησή τους από τα κτίρια και διάφορα άλλα εμπόδια. Κατά συνέπεια, σε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο, οι κόμβοι μπορούν να κινηθούν με ένα ψευδοτυχαίο τρόπο σε προκαθορισμένα μονοπάτια στην περιοχή προσομοίωσης. Κάποιες σχετικά πρόσφατες εργασίες αναφέρονται και μελετούν αυτό το χαρακτηριστικό και ενσωματώνουν τα μονοπάτια και τα εμπόδια στα μοντέλα κινητικότητας, τα οποία αποκαλούνται με τη σειρά τους Μοντέλα Κινητικότητας με Γεωγραφικό Περιορισμό. Παρακάτω περιγράφουμε τρία τέτοια μοντέλα κινητικότητας: το Μοντέλο Κινητικότητας Μονοπατιών, το Μοντέλο Κινητικότητας Εμποδίων και το Μοντέλο Κινητικότητας Τμήματος Πόλης.

I. Μοντέλο Κινητικότητας Τμήματος Πόλης (City Section Mobility Model)

Στο Μοντέλο Κινητικότητας Τμήματος Πόλης, η περιοχή προσομοίωσης είναι ένα δίκτυο δρόμων που αναπαριστά ένα τμήμα μιας πόλης, όπου για παράδειγμα μπορεί να υπάρχει ένα δίκτυο ad hoc [3]. Οι δρόμοι και τα όρια ταχύτητας στους δρόμους βασίζονται στον τύπο της πόλης η οποία προσομοιώνεται. Για παράδειγμα, οι δρόμοι είναι δυνατόν να σχηματίζουν ένα πλέγμα στο κέντρο της πόλης και να υπάρχει ένας μεγάλης ταχύτητας περιφερειακός αυτοκινητόδρομος κοντά στο όριο της περιοχής προσομοίωσης. Κάθε ΚΚ ξεκινά την προσομοίωση από ένα προκαθορισμένο σημείο σε κάποιο δρόμο. Στη συνέχεια, ο ΚΚ επιλέγει τυχαία έναν προορισμό, ο οποίος αντιστοιχεί επίσης σε ένα σημείο σε κάποιο δρόμο. Ο αλγόριθμος κίνησης από την τρέχουσα θέση στο νέο προορισμό εντοπίζει ένα μονοπάτι σύμφωνα με το μικρότερο χρόνο ταξιδιού μεταξύ των δύο σημείων. Επιπρόσθετα, πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα χαρακτηριστικά ασφαλούς οδήγησης, όπως τα όρια ταχύτητας και η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ δύο ΚΚ. Όταν ο κινητός κόμβος φτάσει στον προορισμό του, κάνει παύση για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και ακολούθως επιλέγει τυχαία άλλο προορισμό (δηλαδή ένα σημείο σε κάποιο δρόμο) και επαναλαμβάνει την πιο πάνω διαδικασία.

Το Σχήμα 1.13 παρουσιάζει τις κινήσεις ενός ΚΚ, χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα τμήματος πόλης στο Μοντέλο Κινητικότητας Τμήματος Πόλης. Στο παράδειγμα αυτό, οι πιο κεντρικοί κάθετοι και οριζόντιοι δρόμοι καθορίζονται ως δρόμοι μέσης ταχύτητας (π.χ. για $x = 3$ και $y = 3$), και αντιστοιχούν στις κύριες οδούς στο κέντρο μιας πόλης, ενώ οι υπόλοιποι δρόμοι θεωρούνται ως χαμηλής ταχύτητας δρόμοι κατοικημένης περιοχής. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ένας κινητός κόμβος ξεκινά την προσομοίωση στο σημείο (1,1), κινείται στο (5,4) και ακολούθως κινείται στο (1,4). Οι διακεκομμένες

γραμμές στο σχήμα υποδεικνύουν τους δρόμους μέσης ταχύτητας και οι διπλές γραμμές παριστάνουν τους δρόμους που ακολουθεί ο ΚΚ στο παράδειγμά μας. Όπως φαίνεται, και οι δύο κινήσεις από το σημείο (1,1) στο (5,4) και από το σημείο (5,4) στο (1,4) χρησιμοποιούν δρόμους μέσης ταχύτητας.



Σχήμα 1.13: Διάγραμμα κίνησης ενός ΚΚ που ακολουθεί το Μοντέλο Κινητικότητα Τμήματος Πόλης

Το Μοντέλο Κινητικότητα Τμήματος Πόλης παρέχει ρεαλιστικές κινήσεις για ένα τμήμα μιας πόλης γιατί περιορίζει σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά κίνησης ενός ΚΚ. Με άλλα λόγια, όλοι οι κινητοί κόμβοι πρέπει να ακολουθούν προκαθορισμένα μονοπάτια και τρόπους συμπεριφοράς, όπως για παράδειγμα κανόνες οδικής κυκλοφορίας. Αυτό συμβαίνει και στον πραγματικό κόσμο, όπου οι κινητοί κόμβοι δεν έχουν την ικανότητα να περιφέρονται ελεύθερα χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τα εμπόδια και τους κανονισμούς οδικής κυκλοφορίας. Επίσης, οι άνθρωποι τείνουν να ταξιδεύουν με παρόμοιους τρόπους όταν οδηγούν μέσα στην πόλη ή όταν περπατούν μέσα σε μια πανεπιστημιούπολη.

Κάποιες βελτιώσεις για το Μοντέλο Κινητικότητα Τμήματος Πόλης είναι οι ακόλουθες: να περιλαμβάνονται στο μοντέλο χρόνοι παύσης σε συγκεκριμένες διασταυρώσεις και προορισμούς, η ενσωμάτωση επιτάχυνσης και επιβράδυνσης καθώς και η πρόβλεψη για υψηλές και χαμηλές συγκεντρώσεις των κινητών κόμβων σε κάποιες περιοχές της πόλης σε σχέση με την ώρα της ημέρας. Επιπλέον, το μοντέλο μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει μια ευρύτερη περιοχή προσομοίωσης, ένα αυξημένο αριθμό δρόμων, ένα δρόμο υψηλής ταχύτητας κατά μήκος του ορίου της περιοχής προσομοίωσης και άλλους αλγόριθμους εύρεσης μονοπατιού.

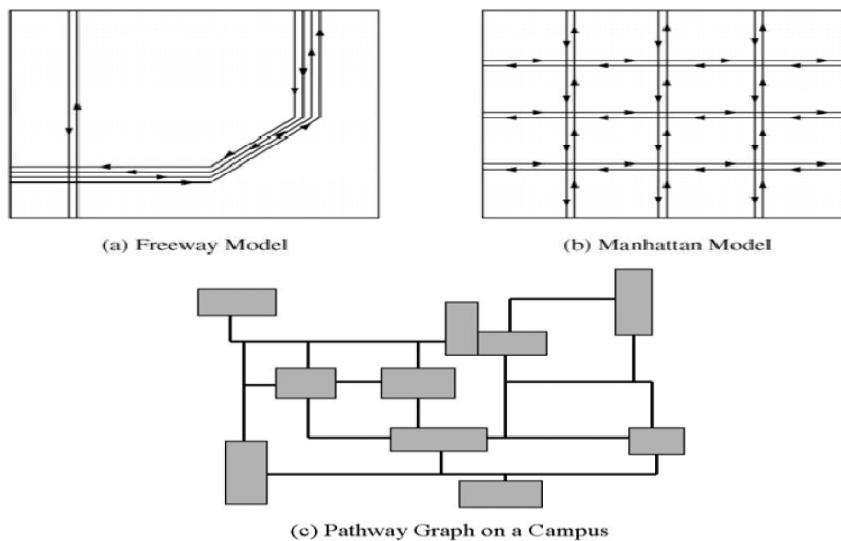
II. Μοντέλο Κινητικότητας Μονοπατιού (Pathway Mobility Model)

Μια παραλλαγή του προηγούμενου μοντέλου κινητικότητας είναι το Μοντέλο Κινητικότητας Μονοπατιού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένας απλός τρόπος να ενσωματωθούν γεωγραφικοί περιορισμοί σε ένα μοντέλο κινητικότητας είναι να περιοριστεί η κίνηση του κόμβου σε μονοπάτια στο χάρτη. Ο χάρτης είναι προκαθορισμένος στο πεδίο προσομοίωσης. Οι Tian, Hahner και Becker στο [17] χρησιμοποίησαν ένα τυχαίο γράφο για να μοντελοποιήσουν το χάρτη μιας πόλης. Αυτός ο γράφος μπορεί είτε να δημιουργείται τυχαία είτε να ορίζεται προσεκτικά, βασισμένος σε ένα συγκεκριμένο χάρτη μιας πραγματικής πόλης. Οι κορυφές του γράφου παριστάνουν τα κτίρια της πόλης και οι ακμές μοντελοποιούν τους δρόμους και τους αυτοκινητόδρομους μεταξύ αυτών των κτιρίων.

Αρχικά, οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία στις ακμές του γράφου. Στη συνέχεια, επιλέγεται τυχαία ο προορισμός για κάθε κόμβο και ο κόμβος κινείται προς τον προορισμό αυτό μέσω της συντομότερης διαδρομής διαμέσου των ακμών. Μόλις καταφθάσει στον προορισμό, ο κόμβος κάνει παύση για χρονικό διάστημα T και επιλέγει ξανά έναν καινούριο προορισμό για την επόμενη κίνησή του. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το τέλος του χρόνου προσομοίωσης.

Σε αντίθεση με το μοντέλο Τυχαίων Στάσεων, όπου οι κόμβοι μπορούν να κινηθούν ελεύθερα, οι κινητοί κόμβοι στο μοντέλο αυτό επιτρέπεται να ταξιδεύουν μόνο στις προκαθορισμένες οδούς. Ωστόσο, από τη στιγμή που ο προορισμός επιλέγεται τυχαία για κάθε φάση κίνησης, συνεχίζει να παραμένει και στο μοντέλο αυτό ένας συγκεκριμένος βαθμός τυχαιότητας. Επομένως, σε αυτό το μοντέλο κινητικότητας που βασίζεται σε γράφο, οι κόμβοι ταξιδεύουν με έναν ψευδοτυχαίο τρόπο πάνω στα μονοπάτια (pathways).

Παρόμοια, στο Μοντέλο Κινητικότητας Freeway και στο Μοντέλο Κινητικότητας Manhattan [18], η κίνηση του κινητού κόμβου επίσης περιορίζεται στα μονοπάτια – διαβάσεις στην περιοχή προσομοίωσης. Το Σχήμα 1.14 παρουσιάζει τους χάρτες που χρησιμοποιούνται από τα μοντέλα Freeway, Manhattan και Pathway.



Σχήμα 1.14: Τα διαγράμματα μονοπατιών που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα Freeway, Manhattan και Pathway

III. Μοντέλο Κινητικότητας Με Εμπόδια (Obstacle Mobility Model)

Ένας άλλος γεωγραφικός περιορισμός, που παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην μοντελοποίηση της κινητικότητας, είναι τα εμπόδια σε μια περιοχή προσομοίωσης. Για να αποφεύγει τα εμπόδια στο δρόμο του, ο κινητός κόμβος αναγκάζεται να αλλάξει την τροχιά του. Επομένως, είναι φανερό πως τα εμπόδια επηρεάζουν τη συμπεριφορά της κίνησης των κινητών κόμβων. Πέρα από αυτό, τα εμπόδια έχουν σημαντική επίδραση και στον τρόπο διάδοσης των ραδιοκυμάτων. Για παράδειγμα, σε εσωτερικό περιβάλλον, το ασύρματο σύστημα δεν μπορεί να μεταδώσει το σήμα διαμέσω εμποδίων χωρίς αυτό να υποστεί σημαντική εξασθένηση. Επίσης, σε εξωτερικό περιβάλλον, τα ραδιοκύματα υπόκεινται στο φαινόμενο της σκίασης. Επομένως, όταν σε ένα μοντέλο κινητικότητας ενσωματώνονται και τα διάφορα εμπόδια, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδρασή τους τόσο στην κινητικότητα των κόμβων όσο και στη διάδοση των ραδιοκυμάτων.

Οι Johansson, Larsson και Hedman [19] έχουν αναπτύξει τρία «ρεαλιστικά» σενάρια κινητικότητας για να αναπαραστήσουν την κίνηση των κινητών χρηστών σε πραγματικές συνθήκες, που περιλαμβάνουν:

1. **Σενάριο συνεδρίου (Conference scenario):** αποτελείται από 50 άτομα που παρευρίσκονται σε ένα συνέδριο. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι στατικοί και μόνο ένας μικρός αριθμός κινούνται με χαμηλή κινητικότητα.
2. **Σενάριο κάλυψης γεγονότος (Event Coverage scenario):** στο σενάριο αυτό, μοντελοποιείται μια ομάδα από άτομα και οχήματα με υψηλή κινητικότητα ως κινητοί κόμβοι, οι οποίοι αλλάζουν αρκετά συχνά τις θέσεις τους.
3. **Σενάρια Βοήθειας σε Καταστροφές (Disaster Relief scenarios) :** στην περίπτωση αυτή, κάποιοι κόμβοι κινούνται πολύ γρήγορα και οι υπόλοιποι κινούνται πολύ αργά.

Σε όλα τα πιο πάνω σενάρια, τα εμπόδια, υπό τη μορφή ορθογωνίων κουτιών, τοποθετούνται τυχαία στην περιοχή προσομοίωσης. Ο κινητός κόμβος απαιτείται να επιλέξει μια κατάλληλη τροχιά κίνησης ώστε να αποφύγει τη σύγκρουση με αυτά τα εμπόδια. Επιπρόσθετα, όταν έχουμε διάδοση σήματος μέσω ενός εμποδίου, το σήμα θεωρείται πως απορροφάται πλήρως από το εμπόδιο. Συγκεκριμένα, εάν ένα εμπόδιο βρίσκεται μεταξύ δύο κόμβων, η ζεύξη μεταξύ των κόμβων αυτών σε ένα ad hoc δίκτυο θεωρείται πως έχει διακοπή μέχρις ότου ένας από αυτούς κινηθεί εκτός της σκιαζόμενης περιοχής του άλλου. Λόγω της ύπαρξης των φαινομένων αυτών, τα τρία προτεινόμενα σενάρια κινητικότητας που περιγράφηκαν, φαίνεται πως διαφέρουν από το ευρέως διαδεδομένο μοντέλο Τυχαίων Στάσεων.

Οι Jardosh, Belding-Royer και Almeroth [20], μελέτησαν επίσης λεπτομερώς την επίδραση που έχουν τα εμπόδια στη μοντελοποίηση της κινητικότητας. Λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα που προκαλούνται από τα εμπόδια σε ένα μοντέλο κινητικότητας, τόσο οι τροχιές της κίνησης όσο και η ασύρματη μετάδοση των κινητών κόμβων περιορίζονται με κάποιο τρόπο.

Στην περιοχή προσομοίωσης τοποθετείται ένας αριθμός εμποδίων για τη μοντελοποίηση των κτιρίων στο περιβάλλον της Πανεπιστημιούπολης του UCSB. Οι συγγραφείς διαπιστώνουν πως τα άτομα στην καθημερινή ζωή τους ακολουθούν τα προκαθορισμένα μονοπάτια μεταξύ των κτιρίων, αντί να περπατούν τυχαία και να

«ανακλώνται» από τα κτίρια. Επομένως, με βάση τις τοποθεσίες αυτών των κτιρίων ή εμποδίων, υπολογίζεται ένας γράφος Voronoi [21] για την κατασκευή των μονοπατιών. Οι κινητοί κόμβοι επιτρέπεται να κινηθούν μόνο στα μονοπάτια αυτά που αλληλοσυνδέουν τα διάφορα κτίρια. Ο γράφος Voronoi κατασκευάζει μονοπάτια που ισαπέχουν από τα κοντινά κτίρια. Αυτή η παρατήρηση είναι συνεπής με την κοινή λογική ότι τα μονοπάτια τείνουν να βρίσκονται ενδιάμεσα στα παρακείμενα κτίρια. Επιπλέον, στο μοντέλο αυτό, οι κόμβοι (π.χ. οι φοιτητές στην πανεπιστημιούπολη) επιτρέπεται να εισέρχονται και να εξέρχονται από τα κτίρια.

Αφού καθοριστεί ο γράφος, οι κινήσεις των κινητών κόμβων περιορίζονται στα μονοπάτια. Κατά συνέπεια, οι κινητοί κόμβοι είναι πιθανότερο να ταξιδεύουν με ένα ημιορισμένο (δηλαδή ψευδοτυχαίο) τρόπο. Στη συνέχεια, αφού ο κινητός κόμβος επιλέξει τυχαία έναν καινούριο προορισμό στο γράφο των μονοπατιών, κινείται προς αυτόν ακολουθώντας τη συντομότερη διαδρομή μέσω του προκαθορισμένου γράφου μονοπατιών. Η συντομότερη διαδρομή υπολογίζεται με την εφαρμογή του αλγόριθμου του Dijkstra στο διάγραμμα Voronoi.

1.3. Ομαδικά Μοντέλα Κινητικότητας (Group Mobility Models)

Μέχρι τώρα έχουμε μελετήσει μοντέλα κινητικότητας που αναπαριστούσαν πολλούς κινητούς κόμβους, των οποίων οι κινήσεις ήταν εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους. Ωστόσο, σε ένα δίκτυο ad hoc υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των κινητών κόμβων καθώς αυτοί κινούνται μαζί. Για παράδειγμα, σε μια διμοιρία στρατιωτών σε ένα στρατιωτικό σενάριο, είναι δυνατό να ανατεθεί ο στόχος της αναζήτησης ενός συγκεκριμένου κομματιού γης, ώστε να καταστρέψουν νάρκες εδάφους, να αιχμαλωτίσουν εχθρούς που επιτίθενται ή απλά να συνεργαστούν με σκοπό να φέρουν εις πέρας μια κοινή αποστολή. Για την επίτευξη λοιπόν της μοντελοποίησης τέτοιων καταστάσεων είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενός ομαδικού μοντέλου κινητικότητας για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών συνεργασίας μεταξύ των κόμβων. Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε πέντε ομαδικά μοντέλα κινητικότητας. Παρατηρούμε πως τα τέσσερα από τα πέντε ομαδικά μοντέλα κινητικότητας συνδέονται στενά. Το πιο γενικό από τα τέσσερα αυτά μοντέλα είναι το Ομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας Σημείου Αναφοράς (Reference Point Group Mobility model - RPGM). Συγκεκριμένα, τρία από τα ομαδικά μοντέλα κινητικότητας που περιγράφουμε (Στήλες, Νομαδικής Κοινότητας και Καταδίωξης) μπορούν να υλοποιηθούν ως ειδικές περιπτώσεις του μοντέλου RPGM.

1.3.1. Ομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας Σημείου Αναφοράς (Reference Point Group Mobility Model)

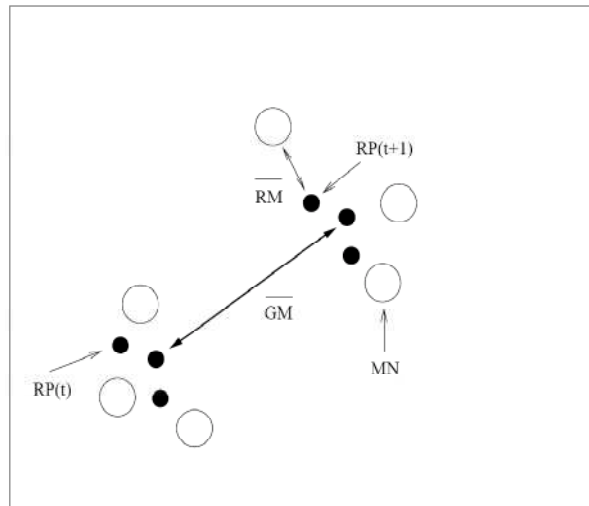
Το Ομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας Σημείου Αναφοράς (RPGM) αναπαριστά την τυχαία κίνηση μιας ομάδας ΚΚ καθώς και την τυχαία κίνηση του κάθε ΚΚ ατομικά μέσα στην ομάδα [22, 23]. Οι κινήσεις της ομάδας βασίζονται στο μονοπάτι που ακολουθείται από ένα λογικό κέντρο για την ομάδα. Το λογικό κέντρο της ομάδας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κίνησης της ομάδας μέσω ενός διανύσματος κίνησης ομάδας, \overline{GM} . Σε κάθε κινητό κόμβο αντιστοιχεί ένα ατομικό σημείο αναφοράς. Η κίνηση του κέντρου

της ομάδας χαρακτηρίζει απόλυτα την κίνηση των σημείων αναφοράς των επιμέρους κόμβων, συμπεριλαμβανομένων της κατεύθυνσης και της ταχύτητας τους. Οι κινητοί κόμβοι κινούνται ατομικά και με τυχαίο τρόπο γύρω από τα προκαθορισμένα σημεία αναφοράς τους. Καθώς τα ξεχωριστά σημεία αναφοράς κινούνται από τη χρονική στιγμή $t-1$ στη χρονική στιγμή t , οι θέσεις τους ανανεώνονται με βάση το λογικό κέντρο της ομάδας. Μετά τον υπολογισμό των ανανεωμένων σημείων αναφοράς, RP_i^t , για κάθε κινητό κόμβο, αυτά συνδυάζονται με ένα τυχαίο διάνυσμα κίνησης, \overline{RM}_i^t , για την αναπαράσταση της τυχαίας κίνησης κάθε επιμέρους ΚΚ γύρω από το δικό του σημείο αναφοράς.

Το Σχήμα 1.15 απεικονίζει τρεις κινητούς κόμβους που κινούνται με βάση το μοντέλο RPGM. Σύμφωνα με το σχήμα, τη χρονική στιγμή t οι τρεις μαύρες τελείες που υπάρχουν, αναπαριστούν τα σημεία αναφοράς, για τους τρεις κινητούς κόμβους. Όπως φαίνεται, το μοντέλο RPGM, χρησιμοποιεί ένα διάνυσμα κίνησης ομάδας \overline{GM}^t για τον υπολογισμό του νέου σημείου αναφοράς του κάθε κόμβου, RP_i^t , τη χρονική στιγμή t . Όπως έχει αναφερθεί, το \overline{GM}^t μπορεί να επιλεγεί τυχαία ή να προκαθοριστεί. Στη συνέχεια, η νέα θέση, P_i^t του κάθε ΚΚ υπολογίζεται με την πρόσθεση ενός τυχαίου διανύσματος κίνησης, \overline{RM}_i^t στο νέο σημείο αναφοράς. Το μήκος του \overline{RM}_i^t κατανέμεται ομοιόμορφα σε μια συγκεκριμένη ακτίνα με κέντρο στο RP_i^t και η κατεύθυνση του ακολουθεί και αυτή ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα μεταξύ 0 και 2π . Σε μαθηματική μορφή, τα πιο πάνω περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

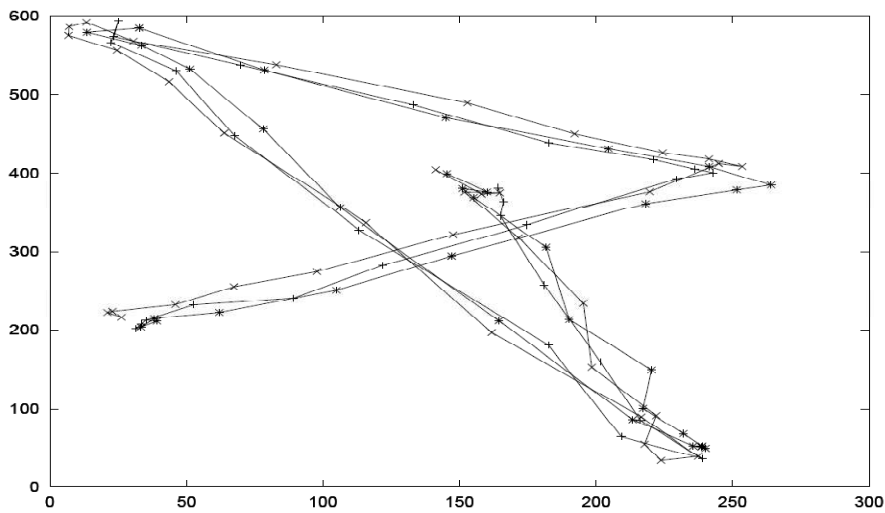
$$RP_i^t = RP_i^{t-1} + \overline{GM}^t \tag{1.11}$$

$$P_i^t = RP_i^t + \overline{RM}_i^t \tag{1.12}$$

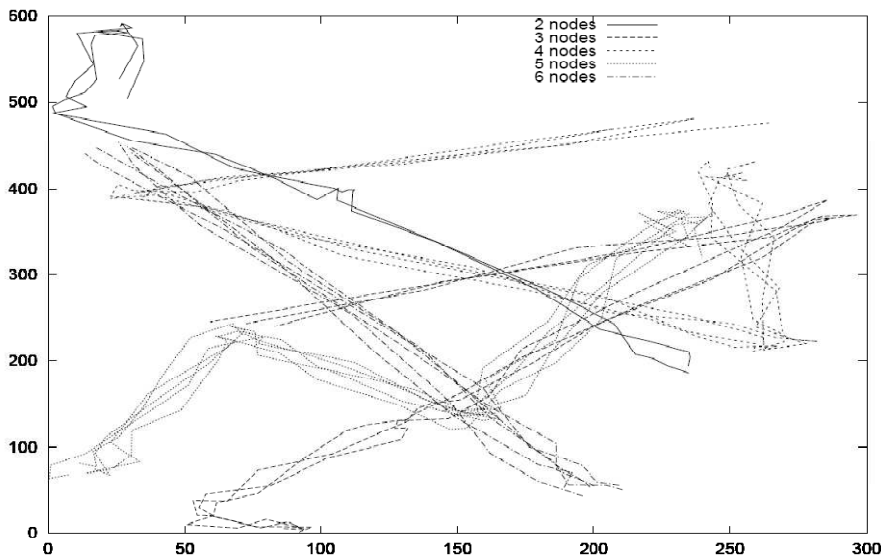


Σχήμα 1.15: Κίνηση τριών κινητών κόμβων που ακολουθούν το Ομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας Σημείου Αναφοράς (RPGM model)

Στα Σχήματα 1.16 και 1.17 παρουσιάζονται διαγράμματα κίνησης που χρησιμοποιούν το μοντέλο RPGM. Στο Σχήμα 1.16 παρουσιάζονται τρεις κινητοί κόμβοι που κινούνται μαζί ως μια ομάδα. Στο Σχήμα 1.17 έχουμε μια απεικόνιση πέντε κινούμενων ομάδων, όπου κάθε ομάδα διαθέτει διαφορετικό αριθμό κινητών κόμβων. Τόσο η κίνηση του λογικού κέντρου για κάθε ομάδα, όσο και τυχαία κίνηση του κάθε κόμβου ατομικά μέσα στην ομάδα, υλοποιούνται μέσω του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Ωστόσο, μια διαφορά είναι πως οι κινητοί κόμβοι ξεχωριστά δε χρησιμοποιούν χρόνους παύσης καθώς κινείται η ομάδα. Χρόνοι παύσης χρησιμοποιούνται μόνο όταν το σημείο αναφοράς της ομάδας φτάνει σε έναν προορισμό και όλοι οι κόμβοι της ομάδας σταματούν για ίδιο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 1.16: Διάγραμμα κίνησης μιας ομάδας τριών κινητών κόμβων που χρησιμοποιούν το μοντέλο RPGM



Σχήμα 1.17: Διάγραμμα κίνησης πέντε ομάδων με χρήση του μοντέλου RPGM

Το μοντέλο RPGM σχεδιάστηκε για να εξομοιώσει σενάρια όπως μια διάσωση από χιονοστιβάδα. Κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας διάσωσης, η ομάδα επιχείρησης, αποτελούμενη από ανθρώπινο δυναμικό και σκυλιά διάσωσης, δουλεύει με συνεργασία ανάμεσα στα μέλη της. Οι άνθρωποι - οδηγοί τείνουν να θέτουν ένα γενικό μονοπάτι που θα ακολουθήσουν τα σκυλιά, αφού συνήθως γνωρίζουν εκ των προτέρων περίπου την τοποθεσία των θυμάτων. Τα σκυλιά δημιουργούν από μόνα τους τα δικά τους «τυχαία» μονοπάτια γύρω από τη γενική περιοχή που έχουν διαλέξει οι άνθρωποι – συνεργάτες τους.

Με κατάλληλη επιλογή των προκαθορισμένων μονοπατιών για τον ηγέτη της ομάδας και άλλες παραμέτρους, το μοντέλο RPGM είναι δυνατό να εξομοιώσει μια ποικιλία συμπεριφορών κινητικότητας. Για παράδειγμα, στο [22], οι Hong, Gerla, Pei και Chiang παρουσιάζουν την ιδέα πως το μοντέλο RPGM έχει την δυνατότητα να αναπαραστήσει διάφορα σενάρια κινητικότητας, όπως τα ακόλουθα:

- **Μοντέλο Κινητικότητας Χώρου Ευθύνης (In-Place Mobility Model):** Ολόκληρο το πεδίο χωρίζεται σε κάποιες παρακείμενες υποπεριοχές. Κάθε υποπεριοχή καταλαμβάνεται αποκλειστικά από μια μοναδική ομάδα, η οποία στη συνέχεια κινείται και λειτουργεί μέσα σε αυτή τη γεωγραφική υποπεριοχή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η επικοινωνία σε πεδίο μάχης.
- **Μοντέλο Κινητικότητας Επικάλυψης (Overlap Mobility Model):** Διαφορετικές ομάδες με διαφορετικούς σκοπούς και πιθανόν διαφορετικά χαρακτηριστικά, ταξιδεύουν στο ίδιο πεδίο με ένα επικαλυπτόμενο τρόπο. Ένα καλό παράδειγμα είναι η επιχείρηση διάσωσης σε περίπτωση καταστροφής.
- **Μοντέλο Κινητικότητας Συνεδρίου (Convention Mobility Model):** Αυτό το σενάριο χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τη συμπεριφορά κινητικότητας σε ένα συνέδριο. Το πεδίο προσομοίωσης χωρίζεται και πάλι σε κάποιες επιμέρους περιοχές ενώ κάποιες ομάδες επιτρέπεται να ταξιδέψουν μεταξύ των περιοχών αυτών. Όπως και στο Μοντέλο Κινητικότητας Επικάλυψης, κάποιες ομάδες στο Μοντέλο Κινητικότητας Συνεδρίου μπορούν να ταξιδεύουν γρηγορότερα από κάποιες άλλες.

Στο [24], προτείνεται μια επέκταση του Ομαδικού Μοντέλου Κινητικότητας Σημείου Αναφοράς, το Πλαίσιο Εργασίας Διανύσματος Κινητικότητας (Mobility Vector framework). Σε αυτό το πλαίσιο, οι Hong, Kwon, Gerla και άλλοι επισημαίνουν πως πολλά ρεαλιστικά σενάρια μπορούν να μοντελοποιηθούν και να παραχθούν με αυτό, επιλέγοντας κατάλληλα τα σημεία ελέγχου κατά μήκος της προτιμώμενης διαδρομής της κίνησης του ηγέτη της ομάδας. Αν αυτά τα σημεία ελέγχου μπορούν να αποδώσουν σωστά τη συμπεριφορά κινητικότητας σε ρεαλιστικά σενάρια, τότε το μοντέλο Διανύσματος Κινητικότητας παρέχει ένα γενικό και ευέλικτο πλαίσιο για την περιγραφή και μοντελοποίηση διαγραμμάτων κινητικότητας. Ωστόσο, στην πράξη, δεν είναι τετριμμένο πρόβλημα η παραγωγή αυτών των σημείων ελέγχου.

Λόγω του έμφυτου χαρακτηριστικού της χωρικής εξάρτησης μεταξύ των κόμβων, το μοντέλο RPGM αναμένεται να συμπεριφέρεται διαφορετικά από το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Οι Hong, Gerla, Pei και Chiang αναφέρουν πως το μοντέλο RPGM υφίσταται λιγότερες διασπάσεις ζεύξεων και επιτυγχάνει καλύτερη

απόδοση για διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης [22], σε σχέση με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων.

Οι Sanchez και Manzoni πρότειναν ένα σύνολο μοντέλων κινητικότητας στο οποίο οι κινητοί κόμβοι συνεργάζονται μεταξύ τους κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους. Αυτό το σύνολο μοντέλων κινητικότητας, που περιλαμβάνει το Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης (Column Mobility Model), το Μοντέλο Κινητικότητας Καταδίωξης (Pursue Mobility Model) και το Νομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας (Nomadic Mobility Model), αναμένεται να παρουσιάζει ισχυρή χωρική εξάρτηση μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Το σύνολο αυτό των μοντέλων που περιγράφηκε, έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης πρωτοκόλλων. Τόσο οι Hu και Johnson [25] όσο και οι Camp, Boleng και Davies [26] αναφέρουν πως η ομάδα αυτή των μοντέλων κινητικότητας έχει διαφορετική συμπεριφορά από αυτή του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων.

1.3.2. Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης (Column Mobility Model)

Το Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης [1] παριστάνει ένα σύνολο κινητών κόμβων, οι οποίοι κινούνται προς τα εμπρός, γύρω από μια συγκεκριμένη γραμμή (ή στήλη), σε μια σταθερή κατεύθυνση (για παράδειγμα στρατιώτες που βαδίζουν συντεταγμένα προς τον εχθρό τους). Επίσης, αυτό το μοντέλο κινητικότητας αποδεικνύεται χρήσιμο για την εξομοίωση δραστηριοτήτων αντίληψης και σάρωσης, όπως καταστροφή ναρκών από στρατιωτικά ρομπότ. Μια ελαφρά τροποποίηση του μοντέλου επιτρέπει στους επιμέρους κινητούς κόμβους να ακολουθούν ο ένας τον άλλο (π.χ. μια ομάδα από παιδιά που περπατούν σε μια παράταξη γραμμής προς την τάξη τους).

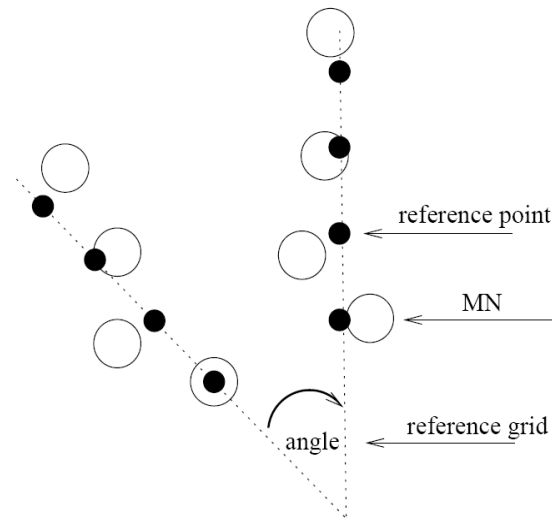
Τη χρονική στιγμή t , ο κινητός κόμβος i ανανεώνει το σημείο αναφοράς του, $RP_i^t = (X_i^t, Y_i^t)$, με την προσθήκη ενός διανύσματος προώθησης, a_i^t , στο προηγούμενο σημείο αναφοράς του, RP_i^{t-1} :

$$RP_i^t = RP_i^{t-1} + a_i^t, \quad (1.13)$$

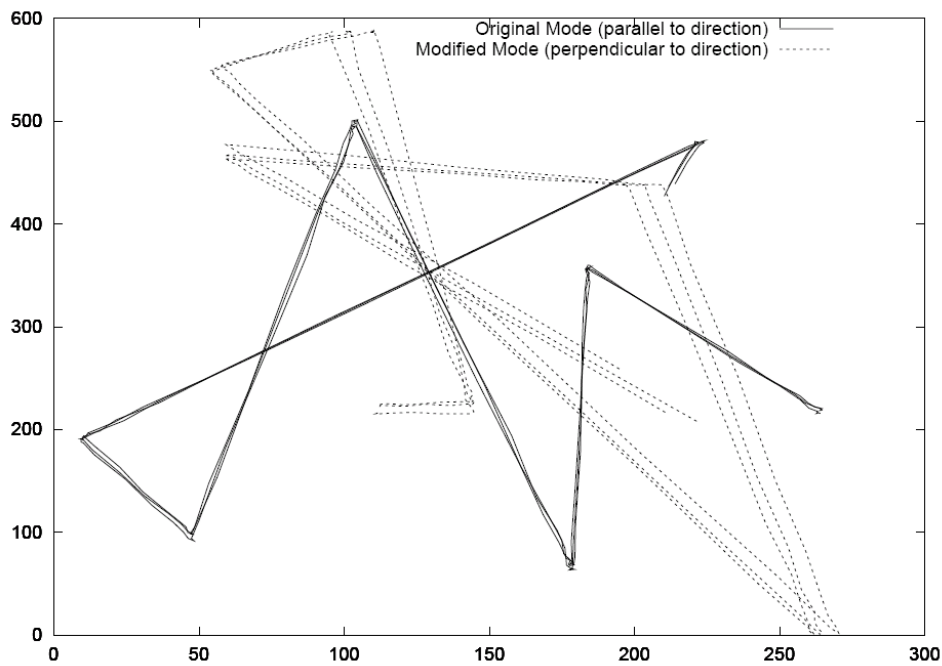
όπου το διάνυσμα προώθησης a_i^t είναι η προκαθορισμένη μετατόπιση που χρησιμοποιείται για να μετακινήσει το πλέγμα αναφοράς του κόμβου i τη χρονική στιγμή t . Αυτή η μετατόπιση υπολογίζεται μέσω μιας τυχαίας απόστασης και μιας τυχαίας γωνίας (μεταξύ 0 και π αφού πρόκειται για κίνηση με κατεύθυνση μόνο προς τα εμπρός). Από τη στιγμή που χρησιμοποιείται η ίδια προκαθορισμένη μετατόπιση για όλους τους κινητούς κόμβους, το πλέγμα αναφοράς είναι μια μονοδιάστατη γραμμή. Μετά τη ανανέωση του σημείου αναφοράς, η καινούρια θέση του κινητού κόμβου i αποκλίνει τυχαία από το ανανεωμένο σημείο αναφοράς κατά ένα τυχαίο διάνυσμα, w_i^t :

$$P_i^t = RP_i^t + w_i^t, \quad (1.14)$$

Καθώς ο κινητός κόμβος φτάνει στο όριο της περιοχής προσομοίωσης και ετοιμάζεται να ταξιδέψει πέρα από αυτό, η κατεύθυνση κίνησης αλλάζει κατά 180 μοίρες. Επομένως, ο κινητός κόμβος μπορεί να κινηθεί προς το κέντρο της περιοχής προσομοίωσης στην καινούρια αυτή κατεύθυνση.



Σχήμα 1.18: Κινήσεις μιας ομάδας τριών κινητών κόμβων που χρησιμοποιούν το Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης



Σχήμα 1.19: Διάγραμμα κίνησης κινητών κόμβων που χρησιμοποιούν το Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης

Το Σχήμα 1.18 απεικονίζει τέσσερις κινητούς κόμβους που κινούνται με βάση το Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι ΚΚ περιπλανιούνται γύρω από τα αντίστοιχα σημεία αναφοράς τους. Όταν το πλέγμα αναφοράς κινείται (με βάση μια τυχαία απόσταση και μια τυχαία γωνία), οι κινητοί κόμβοι ακολουθούν το

πλέγμα και συνεχίζουν την περιπλάνησή τους γύρω από τα αντίστοιχα σημεία αναφοράς τους. Το Σχήμα 1.19 παρουσιάζει την προσομοιωμένη κίνηση δύο ομάδων (από τρεις κινητούς κόμβους η κάθε ομάδα) που χρησιμοποιούν το Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης. Η μια ομάδα στο σχήμα χρησιμοποιεί το αρχικό Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης, όπου οι κόμβοι κινούνται κάθετα προς την κατεύθυνση της κίνησης της ομάδας. Η δεύτερη ομάδα χρησιμοποιεί το τροποποιημένο Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης, όπου οι κόμβοι κινούνται παράλληλα προς την κατεύθυνση της κίνησης της ομάδας. Παρατηρούμε πως αυτά τα διαγράμματα κίνησης για το Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης χρησιμοποιούν μια παραλλαγή της υλοποίησης του μοντέλου RPGM.

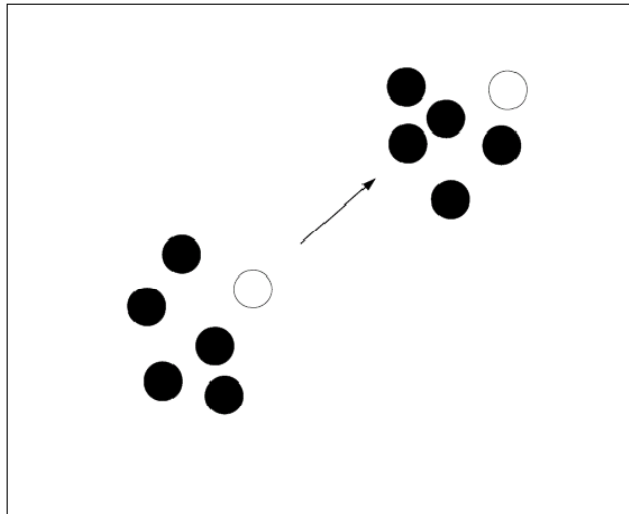
1.3.3. Ομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας Καταδίωξης (Pursue Group Mobility Model)

Το Μοντέλο Κινητικότητας Καταδίωξης ορίζεται στα [2, 27]. Όπως υπονοεί το όνομα, το Μοντέλο Κινητικότητας Καταδίωξης, εξομοιώνει σενάρια που παριστάνουν αρκετούς κινητούς κόμβους που καταδιώκουν ένα συγκεκριμένο κόμβο - στόχο που προπορεύεται, και χρησιμοποιείται γενικά σε περιπτώσεις καταδίωξεων και επιβολής του νόμου. Για παράδειγμα, το μοντέλο μπορεί να αναπαριστά αστυνομικούς που προσπαθούν να συλλάβουν έναν εγκληματία που έχει δραπετεύσει. Το Μοντέλο Κινητικότητας Καταδίωξης αποτελείται από μια μοναδική εξίσωση ανανέωσης της καινούριας θέσης του κάθε κόμβου:

$$P_i^t = P_i^{t-1} + v_i^t (P_{\text{target}}^t - P_i^{t-1}) + w_i^t, \quad (1.15)$$

όπου P_i^t και P_i^{t-1} η καινούρια και η προηγούμενη θέση του κινητού κόμβου i , αντίστοιχα, P_{target}^t είναι η αναμενόμενη θέση του καταδιωκόμενου κόμβου τη χρονική στιγμή t και w_i^t είναι ένα μικρό τυχαίο διάνυσμα που χρησιμοποιείται για να μετατοπίσει την κίνηση του κινητού κόμβου i . Η τιμή του τυχαίου διανύσματος αποκτάται μέσω ενός ατομικού μοντέλου κινητικότητας (π.χ. του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου) και το ποσοστό της τυχειότητας για κάθε κινητό κόμβο περιορίζεται, έτσι ώστε να διατηρηθεί ο αποτελεσματικός εντοπισμός του καταδιωκόμενου κινητού κόμβου. Η τρέχουσα θέση ενός κινητού κόμβου, το τυχαίο διάνυσμα και η συνάρτηση της επιτάχυνσης συνδυάζονται για τον υπολογισμό της επόμενης θέσης του κινητού κόμβου.

Το Σχήμα 1.20 παρουσιάζει έξι κινητούς κόμβους, οι οποίοι κινούνται με το Μοντέλο Κινητικότητας Καταδίωξης. Ο λευκός κόμβος παριστάνει τον καταδιωκόμενο κόμβο και οι μαύροι κόμβοι παριστάνουν τους κόμβους που καταδιώκουν τον πρώτο. Και στην περίπτωση αυτή, το διάγραμμα προσομοίωσης για το Μοντέλο Κινητικότητας Καταδίωξης μπορεί να παραχθεί από την υλοποίηση του μοντέλου RPGM.



Σχήμα 1.20: Διάγραμμα κίνησης έξι κινητών κόμβων που χρησιμοποιούν το Ομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας Καταδίωξης

1.3.4. Μοντέλο Κινητικότητας Νομαδικής Κοινότητας (Nomadic Community Mobility Model)

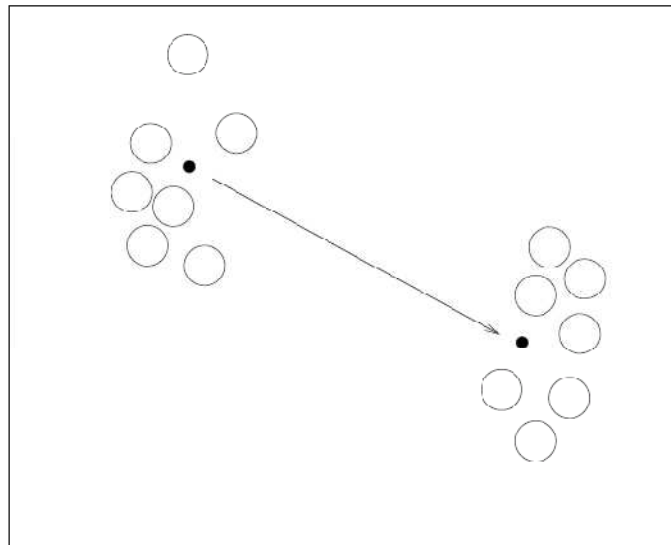
Το Μοντέλο Κινητικότητας Νομαδικής Κοινότητας χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση σεναρίων κινητικότητας στα οποία ομάδες κινητών κόμβων κινούνται συλλογικά από ένα σημείο σε ένα άλλο, όπως ακριβώς μετακινούνταν οι αρχαίες νομαδικές κοινωνίες από μια τοποθεσία σε μια άλλη [2, 27]. Μέσα σε κάθε κοινότητα ή ομάδα κινητών κόμβων, οι κόμβοι διατηρούν το δικό τους ξεχωριστό προσωπικό χώρο, όπου κινούνται με τυχαίο τρόπο. Υπάρχουν πολυάριθμες εφαρμογές για αυτού του είδους τα σενάρια. Για παράδειγμα, το μοντέλο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί στην κινητή επικοινωνία σε ένα συνέδριο ή σε μια στρατιωτική εφαρμογή. Επίσης, ένα άλλο παράδειγμα είναι μια τάξη μαθητών σε ένα μουσείο, η οποία θα κινείται από μια τοποθεσία σε μια άλλη μαζί, ωστόσο οι μαθητές της τάξης, ατομικά, θα περιπλανιούνται γύρω από μια συγκεκριμένη τοποθεσία.

Στο Μοντέλο Κινητικότητας Νομαδικής Κοινότητας, κάθε κινητός κόμβος χρησιμοποιεί ένα ατομικό μοντέλο κινητικότητας (π.χ. το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίου Περιπάτου) για να κινείται γύρω από ένα δοσμένο σημείο αναφοράς. Όταν το σημείο αναφοράς αλλάξει, όλοι οι κινητοί κόμβοι στην ομάδα ταξιδεύουν στην καινούρια περιοχή που ορίζεται από το σημείο αναφοράς και ξεκινούν να περιπλανιούνται γύρω από το νέο σημείο αναφοράς. Οι παράμετροι του ατομικού μοντέλου κινητικότητας καθορίζουν την απόσταση στην οποία περιπλανιέται ένας κινητός κόμβος από το σημείο αναφοράς. Τα πιο πάνω περιγράφονται από την ακόλουθη σχέση:

$$P'_i = RP' + w'_i, \quad (1.16)$$

όπου P_i' η καινούρια θέση του κινητού κόμβου i , RP' το προκαθορισμένο σημείο αναφοράς του κινητού κόμβου (ίδιο για όλους τους κινητούς κόμβους) και w_i' είναι ένα μικρό τυχαίο διάνυσμα που χρησιμοποιείται για να μετατοπίσει την κίνηση του κινητού κόμβου i .

Συγκρινόμενο με το Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης, το οποίο επίσης βασίζεται σε πλέγμα αναφοράς, παρατηρείται στο [26] ότι στο Μοντέλο Κινητικότητας Νομαδικής Κοινότητας οι κόμβοι μοιράζονται ένα κοινό σημείο αναφοράς (κοινό πλέγμα αναφοράς) σε αντίθεση με το ατομικό σημείο αναφοράς σε μια στήλη. Κατά συνέπεια, αναμένουμε οι κινητοί κόμβοι στο Μοντέλο Κινητικότητας Νομαδικής Κοινότητας να περιορίζονται λιγότερο στην κίνησή τους γύρω από το καθορισμένο σημείο αναφοράς και επομένως η κίνησή τους να είναι πιο σποραδική. Για παράδειγμα, στο Μοντέλο Κινητικότητας Στήλης, οι κινητοί κόμβοι μπορούν να ταξιδέψουν μόνο για δύο δευτερόλεπτα προτού να αλλάξουν κατεύθυνση και ταχύτητα ενώ στο Μοντέλο Κινητικότητας Νομαδικής Κοινότητας επιτρέπεται να ταξιδέψουν για 60 δευτερόλεπτα προτού αλλάξουν κατεύθυνση και ταχύτητα. Το Σχήμα 1.21 απεικονίζει επτά κινητούς κόμβους που κινούνται με βάση το Μοντέλο Κινητικότητας Νομαδικής Κοινότητας. Όπως φαίνεται, το σημείο αναφοράς (που παριστάνεται από μια μικρή μαύρη τελεία) κινείται από μια θέση σε μια άλλη και οι κινητοί κόμβοι ακολουθούν την κίνησή του.



Σχήμα 1.21: Διάγραμμα κίνησης επτά κινητών κόμβων που χρησιμοποιούν το Ομαδικό Μοντέλο Κινητικότητας Νομαδικής Κοινότητας

1.3.5. Τυχαίο Μοντέλο Κινητικότητας Εκθετικής Συσχέτισης (Exponential Correlated Random Mobility Model)

Σύμφωνα με το [22], ένα από τα πρώτα ομαδικά μοντέλα κινητικότητας που προτάθηκε είναι το Τυχαίο Μοντέλο Κινητικότητας Εκθετικής Συσχέτισης. Στο μοντέλο αυτό, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση κίνησης για τη δημιουργία κινήσεων κινητών

κόμβων. Δεδομένης μια θέσης (ενός ΚΚ ή μιας ομάδας) τη χρονική στιγμή t , το διάνυσμα $b(t)$ χρησιμοποιείται για να καθορίσει την επόμενη θέση (του ΚΚ ή της ομάδας) στη χρονική στιγμή $t+1$, $b(t+1)$:

$$b(t+1) = b(t)e^{-\frac{1}{\tau}} + \left(\sigma \sqrt{1 - \left(e^{-\frac{1}{\tau}} \right)^2} \right) r \quad (1.17)$$

όπου, η παράμετρος τ ρυθμίζει το ρυθμό μεταβολής της προηγούμενης θέσης του ΚΚ από την καινούρια θέση του (δηλαδή μικρό τ ισοδυναμεί με μεγάλη μεταβολή) και r είναι μια τυχαία Γκαουσιανή μεταβλητή με μεταβλητότητα σ . Δυστυχώς, δεν είναι εύκολη η δημιουργία ενός συγκεκριμένου διαγράμματος κίνησης με την επιλογή κατάλληλων τιμών για τα (τ, σ) στο Τυχαίο Μοντέλο Κινητικότητας Εκθετικής Συσχέτισης.

1.4. Ανακεφαλαίωση

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκε μια επισκόπηση των διαφόρων μοντέλων κινητικότητας που χρησιμοποιούνται σε προσομοιώσεις ασυρμάτων δικτύων. Όπως έγινε φανερό, υπάρχει μια πληθώρα μοντέλων από τα οποία μπορεί να επιλεγεί το καταλληλότερο για τις εκάστοτε συνθήκες κινητικότητας και το συγκεκριμένο είδος δικτύου που μοντελοποιείται. Το ζητούμενο, σε κάθε περίπτωση, είναι το επιλεγθέν μοντέλο να έχει συμπεριφορά όσο το δυνατόν πλησιέστερη σε αυτή των πραγματικών κινούμενων χρηστών.

Στο επόμενο κεφάλαιο, υλοποιούμε δύο συγκεκριμένα μοντέλα κινητικότητας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προσομοιώσεις που αφορούν ασύρματα κυψελωτά και αδόμητα δίκτυα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] M. Sanchez and P. Manzoni. A java-based ad hoc networks simulator. In Proceedings of the SCS Western Multiconference Web-based Simulation Track, Jan. 1999.
- [2] M. Sanchez and P. Manzoni. Anejos: A java based simulator for ad-hoc networks. *Future Generation Computer Systems*, 17(5):573–583, 2001.
- [3] V. Davies. Evaluating mobility models within an ad hoc network. Master's thesis, Colorado School of Mines, 2000.
- [4] E. W. Weisstein. *The CRC Concise Encyclopedia of Mathematics*. CRC Press, 1998.
- [5] B. Liang and Z. Haas. Predictive distance-based mobility management for PCS networks. In Proceedings of the Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), March 1999.
- [6] S. Basagni, I. Chlamtac, V.R. Syrotiuk and B.A. Woodward. A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM). In Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), σελίδες 76–84, 1998.
- [7] J.J. Garcia-Luna-Aceves and E.L. Madruga. A multicast routing protocol for ad-hoc networks. In Proceedings of the Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), σελίδες 784–792, 1999.
- [8] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom98), ACM, October 1998.
- [9] D. Johnson and D. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In T. Imelinsky and H. Korth, editors, *Mobile Computing*, σελίδες 153–181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [10] J. Boleng. Normalizing mobility characteristics and enabling adaptive protocols for ad hoc networks. In Proceedings of the Local and Metropolitan Area Networks Workshop (LANMAN), σελίδες 9–12, March 2001.
- [11] T.X. Brown. Personal correspondence. April 2001.
- [12] E. M. Royer, P. M. Melliar-Smith and L. E. Moser. An Analysis of the Optimum Node Density for Ad hoc Mobile Networks. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Helsinki, Finland, June 2001.

- [13] V. Tolety. Load reduction in ad hoc networks using mobile servers. Master's thesis, Colorado School of Mines, 1999.
- [14] C. Chiang. Wireless Network Multicasting. PhD thesis, University of California, Los Angeles, 1998.
- [15] C. Bettstetter. Smooth is Better than Sharp: A Random Mobility Model for Simulation of Wireless Networks. In Proc. ACM Intern. Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Rome, Italy, July 2001.
- [16] Z. Haas. A new routing protocol for reconfigurable wireless networks. In Proceedings of the IEEE International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC), σελίδες 562–565, Oct. 1997.
- [17] J. Tian, J. Hahner, C. Becker, I. Stepanov and K. Rothermel. Graph-based Mobility Model for Mobile Ad Hoc Network Simulation, in the Proceedings of 35th Annual Simulation Symposium, in cooperation with the IEEE Computer Society and ACM. San Diego, California. April 2002.
- [18] F. Bai, N. Sadagopan and A. Helmy. Important: a framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for ad hoc networks. In Proceedings of IEEE Information Communications Conference (INFOCOM 2003), San Francisco, Apr. 2003.
- [19] P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek and M. Degermark. Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks. In International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99), 1999, σελίδες 195–206.
- [20] A. Jardosh, E. M. Belding-Royer, K. C. Almeroth and S. Suri. Towards Realistic Mobility Models for Mobile Ad hoc Networks. In Proceedings of Ninth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2003), San Diego, CA, σελίδες 217-229, September 2003.
- [21] M. de Bergg, M. van Kreveld, M. Overmars and O. Schwarzkopf. Computational Geometry: Algorithms and Applications, Springer Verlag, 2000.
- [22] X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and C. Chiang. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In Proceedings of the ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), August 1999.
- [23] G. Pei, M. Gerla, X. Hong, and C. Chiang. A wireless hierarchical routing protocol with group mobility. In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), September 1999.

- [24] X. Hong, T. Kwon, M. Gerla, D. Gu and G. Pei. A mobility framework for ad hoc wireless networks. In ACM Second International Conference on Mobile Data Management (MDM), January 2001.
- [25] Y.-C. Hu and D. B. Johnson. Caching Strategies in On-Demand Routing Protocols for Wireless Ad Hoc Networks. In Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000), ACM, Boston, MA, August 2000.
- [26] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. In Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, vol. 2, no. 5, σελίδες 483-502, 2002.
- [27] M. Sanchez. Mobilitymodels. <http://www.disca.upv.es/misan/mobmodel.htm>. Page accessed on May 30th, 2002.
- [28] F. Bai and A. Helmy. A Survey of Mobility Models in Wireless Ad hoc Networks. University of Southern California, USA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Υλοποίηση μοντέλων κινητικότητας

2.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε τη διαδικασία υλοποίησης δύο μοντέλων κινητικότητας, του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, η οποία έγινε στο πρόγραμμα MATLAB. Αρχικά, υλοποιήθηκαν τα δύο μοντέλα κινητικότητας χωρίς κάποια δικτυακή υποδομή και λήφθηκαν στατιστικά στοιχεία που αφορούν κάποια μέτρα κινητικότητας (mobility metrics) στη μόνιμη κατάσταση: τη χωρική κατανομή των κόμβων στην περιοχή προσομοίωσης, την κατανομή της ταχύτητας των κόμβων την κατανομή του μήκους και του χρόνου μετάβασης. Τα μεγέθη αυτά χαρακτηρίζουν την κινητικότητα με βάση το μοντέλο που επιλέχθηκε και είναι ανεξάρτητα της δομής του δικτύου των κόμβων (κυβελωτό σύστημα ή ad hoc δίκτυο).

Στη συνέχεια, προχωρήσαμε στην υλοποίηση ενός στοιχειώδους κυβελωτού συστήματος με ορθογωνικές κυψέλες, στο οποίο οι κόμβοι ακολουθούν τα πιο πάνω μοντέλα κινητικότητας και λάβαμε στατιστικά στοιχεία σχετικά με το κυβελωτό σύστημα, όπως την κατανομή και τη μέση τιμή του χρόνου παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη και το ρυθμό εισόδου και εξόδου από κάθε κυψέλη.

Τέλος, υλοποιήσαμε ένα ad hoc δίκτυο και μελετήσαμε, λαμβάνοντας στατιστικά από την προσομοίωση, την κατανομή της διάρκειας και της διαθεσιμότητας των ζευξεων καθώς και την κατανομή της διάρκειας και της διαθεσιμότητας μονοπατιών δύο και τριών αλμάτων.

2.2. Περιγραφή – αλγόριθμος της κίνησης των κόμβων

2.2.1. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων χρησιμοποιείται, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, σε πολλά ερευνητικά δοκίμια και όπως είναι λογικό, κάποιες διαφορές στον ορισμό του μοντέλου είναι αναπόφευκτες. Ωστόσο, κοινά στοιχεία ανάμεσα σε όλους τους ορισμούς, είναι ο περιορισμός της κίνησης σε μια περιοχή προσομοίωσης, η ανεξαρτησία της κίνησης ενός χρήστη από τους υπόλοιπους χρήστες και η διαδοχική αλλαγή κατάστασης μεταξύ παύσης και κίνησης. Ο ορισμός, ή με άλλα λόγια ο αλγόριθμος, που ακολουθήσαμε για την υλοποίηση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων είναι ο ακόλουθος:

Αρχικοποίηση: Για κάθε κόμβο (1,2,...,N):

Διάλεξε μια αρχική θέση και ένα αρχικό χρόνο παύσης.

Επαναληπτικός βρόχος: Για κάθε κόμβο (1,2,...,N):

1. Μόλις λήξει ο χρόνος παύσης, διάλεξε ένα καινούριο προορισμό (στάση – waypoint) στην περιοχή προσομοίωσης και μια καινούρια ταχύτητα σύμφωνα με τις κατανομές για επιλογή προορισμού και ταχύτητας αντίστοιχα.

2.Κινήσου προς τον προορισμό σε μια ευθεία γραμμή με την ταχύτητα που επιλέχθηκε προηγουμένως μέχρι να φτάσεις σε αυτόν.

3.Μόλις φτάσεις στον προορισμό καθόρισε τον χρόνο παύσης σύμφωνα με την κατανομή του χρόνου παύσης. Επανάλαβε τα βήματα 1-3 μέχρι το τέλος του χρόνου προσομοίωσης.

Με βάση λοιπόν τον πιο πάνω ορισμό, οι παράμετροι του μοντέλου είναι η κατανομή του χρόνου παύσης, η χωρική κατανομή των προορισμών – σημείων στάσης (waypoints) στην περιοχή προσομοίωσης και η κατανομή της ταχύτητας που επιλέγεται σε κάθε προορισμό. Επίσης, πρέπει να επιλεγούν και οι κατανομές αρχικοποίησης, οι οποίες ενδέχεται να είναι διαφορετικές από τις προηγούμενες, όπως αναφέρεται στο [1], για να ξεκινήσει η προσομοίωση στη μόνιμη (σταθερή) της κατάσταση και να αποφευχθούν μεταβατικά φαινόμενα. Ωστόσο, οι κατανομές αρχικοποίησης δεν αλλάζουν τις κατανομές στη μόνιμη κατάσταση. Όλες οι κατανομές είναι ανεξάρτητες του χρόνου και της τρέχουσας θέσης του κάθε χρήστη.

Η κατανομή που χρησιμοποιείται πιο συχνά ως κατανομή επιλογής προορισμού είναι η ομοιόμορφη. Αυτή μπορεί να υλοποιηθεί σε μια ορθογώνια περιοχή προσομοίωσης επιλέγοντας ένα ομοιόμορφα κατανομημένο αριθμό για τη συντεταγμένη x και ένα δεύτερο (ανεξάρτητο) ομοιόμορφα κατανομημένο αριθμό για τη συντεταγμένη y . Συνήθως, οι κατανομές του χρόνου παύσης και της ταχύτητας χρησιμοποιούνται για την παραμετροποίηση της κινητικότητας του χρήστη. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη κατανομή, τόσο για το χρόνο παύσης όσο και για την ταχύτητα ενός κόμβου, είναι, όπως και για την επιλογή προορισμού, η ομοιόμορφη κατανομή, στα διαστήματα $t_p \in [0, t_{p,\max}]$ και $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$, αντίστοιχα.

Στην προσομοίωση που υλοποιήσαμε, επιλέξαμε την ομοιόμορφη κατανομή τόσο για τα σημεία στάσης - προορισμούς όσο και για την ταχύτητα και το χρόνο παύσης. Επίσης, οι αρχικές θέσεις των κόμβων επιλέχθηκαν από την ομοιόμορφη κατανομή, αν και όπως θα δούμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και όπως θα αποδειχθεί και θεωρητικά στο κεφάλαιο 3, η χωρική κατανομή των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση δεν είναι ομοιόμορφη. Το γεγονός ότι η αρχική κατανομή των κόμβων είναι διαφορετική από την κατανομή τους στη μόνιμη κατάσταση δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, εφόσον ο χρόνος προσομοίωσης είναι αρκετά μεγάλος ώστε να εξαλείφονται τα μεταβατικά φαινόμενα.

2.2.2. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης

Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης χρησιμοποιείται πολύ συχνά ως εναλλακτική επιλογή για την μοντελοποίηση της κινητικότητας των κόμβων. Υλοποιείται το ίδιο εύκολα και έχει μάλιστα, όπως θα δούμε στη συνέχεια, μια πιο απλή χωρική κατανομή χρηστών στη μόνιμη κατάσταση. Όπως και στο μοντέλο Τυχαίων Στάσεων, η κίνηση προσομοιώνεται σε μια οριοθετημένη περιοχή. Η διαδικασία – αλγόριθμος της παραγωγής κίνησης μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως:

Αρχικοποίηση: Για κάθε κόμβο (1,2,...,N):

 Διάλεξε μια αρχική θέση και ένα αρχικό χρόνο παύσης.

Επαναληπτικός βρόχος: Για κάθε κόμβο (1,2,...,N):

1.Μόλις λήξει ο χρόνος παύσης, διάλεξε μια κατεύθυνση και μια ταχύτητα σύμφωνα με τις κατανομές της κατεύθυνσης και ταχύτητας αντίστοιχα. Διάλεξε επίσης το μήκος της μετάβασης από την κατανομή για το μήκος μετάβασης.

2.Κινήσου με βάση την κατεύθυνση και την ταχύτητα που επέλεξες, για απόσταση ίση με το μήκος μετάβασης που επέλεξες, σε μια ευθεία γραμμή.

3.Μόλις ολοκληρώσεις τη μετάβαση (έχεις διανύσει το μήκος μετάβασης), καθόρισε το χρόνο παύσης σύμφωνα με την κατανομή του χρόνου παύσης. Επανάλαβε τα βήματα 1-3 μέχρι το τέλος του χρόνου προσομοίωσης.

Στην προσομοίωση που υλοποιήσαμε, χρησιμοποιούμε ομοιόμορφη κατανομή για το μήκος μετάβασης L στο διάστημα $L \in [L_{\min}, L_{\max}]$ καθώς και για την κατανομή του χρόνου παύσης στο διάστημα $t_p \in [t_{p,\min}, t_{p,\max}]$.

Ενώ οι χρήστες στο μοντέλο Τυχαίων Στάσεων δεν μπορούν να εγκαταλείψουν την περιοχή προσομοίωσης λόγω του αλγόριθμου που περιγράφει το μοντέλο και του συνήθως κυρτού σχήματος της περιοχής προσομοίωσης, οι χρήστες στο μοντέλο Τυχαίας Κατεύθυνσης είναι δυνατό να χτυπήσουν στο σύνορο της περιοχής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να συμπεριφερθεί ένας χρήστης ο οποίος χτυπά σε ένα σύνορο. Οι πιο συχνές προσεγγίσεις που γίνονται είναι είτε να ανακλαστεί ο χρήστης σαν μια ακτίνα φωτός, κρατώντας το μέτρο της ταχύτητάς του σταθερό ή να επανατοποθετηθεί ο υπάρχων χρήστης στην απέναντι (αντι-συμμετρική) πλευρά της περιοχής προσομοίωσης, κρατώντας σταθερή τόσο την ταχύτητα όσο και την κατεύθυνση της κίνησής του. Και οι δύο προσεγγίσεις παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ωστόσο οδηγούν και οι δύο σε σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή χρηστών στη μόνιμη κατάσταση. Μια τρίτη προσέγγιση είναι η εισαγωγή ενός νέου χρήστη σε ένα σημείο με βάση την κατανομή αρχικοποίησης με τυχαία ταχύτητα και κατεύθυνση. Αυτό μπορεί να συμβεί αμέσως μόλις ο χρήστης εγκαταλείψει την περιοχή προσομοίωσης ή με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο οι χρήστες εξέρχονται από την περιοχή. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατό να μειωθεί το φαινόμενο ενός τεχνητού συνόρου. Στην προσομοίωσή μας, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο της ανάκλασης, διότι παράγει τη μικρότερη διαφορά σε σχέση με το μοντέλο Τυχαίων Στάσεων, όπου οι χρήστες ταξιδεύουν πάντα σε συνεχόμενες τροχιές.

2.3. Υλοποίηση Μοντέλων Κινητικότητας χωρίς δικτυακή υποδομή

2.3.1 Κώδικας προγραμμάτων και επεξήγηση

I. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

Πιο κάτω, επεξηγούμε τον κώδικα του προγράμματος σε MATLAB που υλοποιεί την προσομοίωση της κίνησης των κόμβων για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, καθώς και τη λήψη στατιστικών στοιχείων για κάποια μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών.

Κώδικας:

Βλέπε παράρτημα A.2 (A.2.1).

Περιγραφή – επεξήγηση του κώδικα:

Αρχικά ορίζονται κάποιες παράμετροι σε σχέση με το μοντέλο κινητικότητας. Αυτές είναι τα όρια της περιοχής προσομοίωσης (η οποία είναι ένα ορθογώνιο) στους άξονες x και y ($\min X$, $\max X$, $\min Y$, $\max Y$), ο ελάχιστος και ο μέγιστος χρόνος παύσης ($\min \text{PauseTime}$, $\max \text{PauseTime}$), η ελάχιστη και η μέγιστη ταχύτητα ενός κόμβου ($\min V$, $\max V$), το πλήθος των κόμβων (N), ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης (simulationTime) και το βήμα (κβάντο χρόνου) dt . Το βήμα dt καθορίζει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμιοτύπων του επαναληπτικού βρόχου, μέσα στον οποίο ανανεώνονται οι θέσεις των κόμβων αλλά και δειγματοληπτούνται διάφορα μεγέθη από τα οποία προκύπτουν τα στατιστικά αποτελέσματα μετά το τέλος της προσομοίωσης. Υπολογίζεται επίσης το μέγιστο δυνατό μήκος μιας μετάβασης (διαγώνιος του ορθογωνίου), και ο μέγιστος δυνατός χρόνος μιας μετάβασης που αντιστοιχεί σε μέγιστο μήκος μετάβασης και ελάχιστη ταχύτητα.

Στη συνέχεια, ορίζονται κάποιες μεταβλητές και κάποιοι πίνακες που θα χρησιμεύσουν στη λήψη στατιστικών στοιχείων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και στην παρουσίασή τους σε μορφή διαγραμμάτων μετά το τέλος της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, έχουμε τις εξής μεταβλητές για κάθε ένα από τα μέτρα κινητικότητας:

(α) για τη χωρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των κόμβων: Οι μεταβλητές numOfPixelsX και numOfPixelsY καθορίζουν την πυκνότητα του ορθογωνικού πλέγματος στο οποίο υποδιαιρείται η επιφάνεια της περιοχής προσομοίωσης. Οι μεταβλητές pixelSizeX και pixelSizeY καθορίζουν τις δύο διαστάσεις του κάθε στοιχειώδους ορθογωνίου (pixel) του πλέγματος. Ο πίνακας $[X, Y]$ είναι ουσιαστικά το ορθογώνιο πλέγμα που αντιστοιχεί στην περιοχή προσομοίωσης και ο πίνακας pdfPosition , διάστασης $\text{numOfPixelsX} \times \text{numOfPixelsY}$, θα αποθηκεύει τη χωρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των κόμβων. Ο τρόπος με τον οποίο θα γίνεται η δειγματοληψία και η ενημέρωση του πίνακα αυτού θα περιγραφούν στη συνέχεια. Η ιδέα είναι πάντως ότι σε κάθε στοιχειώδες ορθογώνιο του πλέγματος θα αντιστοιχεί μια πιθανότητα να βρεθεί ένας κόμβος εκεί.

(β) για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων: Η μεταβλητή counter μετρά το πλήθος των μετρήσεων – δειγμάτων των ταχυτήτων που έχουν ληφθεί. Η μεταβλητή $\text{numOfSpeedDivisions}$ καθορίζει το πλήθος των υποδιαιρέσεων του άξονα των ταχυτήτων, δηλαδή το πλήθος των διαστημάτων στα οποία θα χωρίσουμε το εύρος τιμών των ταχυτήτων, το οποίο εκτείνεται από $\min V$ ως $\max V$. Το μέγεθος κάθε διαστήματος δίνεται από τη μεταβλητή divisionVSize . Για την αποθήκευση των τιμών της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας χρησιμοποιείται το διάνυσμα pdfV , ενώ για την αποθήκευση των κβαντισμένων τιμών των ταχυτήτων (κέντρα των αντίστοιχων διαστημάτων), χρησιμοποιείται ο πίνακας V . Κάθε τιμή $\text{pdfV}(m)$ αντιστοιχεί στην τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας στην ταχύτητα $V(m)$.

(γ) για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης: Έχουμε τις αντίστοιχες μεταβλητές όπως και για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της

ταχύτητας. Η μεταβλητή counterL μετρά το πλήθος των μετρήσεων που λήφθηκαν για τα μήκη μετάβασης.

(δ) για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης: Έχουμε τις αντίστοιχες μεταβλητές όπως για τα (β) και (γ). Το πλήθος των μετρήσεων για το χρόνο μετάβασης είναι ίσο με το πλήθος των μετρήσεων για τα μήκη μετάβασης, εφόσον κάθε φορά που ένας κόμβος επιλέγει ένα μήκος μετάβασης για την επόμενη μετάβασή του, αυτόματα υπολογίζεται και ένας χρόνος μετάβασης με βάση το επιλεγμένο μήκος μετάβασης και την ταχύτητα.

Ακολουθώς, έχουμε τη δημιουργία και την αρχικοποίηση ενός διανύσματος (με όνομα nodes) από δομές (structures), καθεμία από τις οποίες αποθηκεύει πληροφορίες σχετικές με κάθε κόμβο. Δηλαδή, η διάσταση του διανύσματος ισούται με το πλήθος των κόμβων και κάθε στοιχείο του διανύσματος είναι μια δομή που περιέχει όλες τις πληροφορίες που αφορούν την τρέχουσα κατάσταση ενός κόμβου. Τα στοιχεία – πεδία που περιλαμβάνει η συγκεκριμένη δομή είναι τα εξής:

(α) curX: Είναι η τετμημένη (x) της τρέχουσας θέσης του κόμβου.

(β) curY: Είναι η τεταγμένη (y) της τρέχουσας θέσης του κόμβου.

(γ) destX: Είναι η τετμημένη (x) του επόμενου προορισμού (waypoint).

(δ) destY: Είναι η τεταγμένη (y) του επόμενου προορισμού (waypoint).

(ε) speed: Είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται ο κόμβος αν βρίσκεται σε κίνηση, ή η ταχύτητα που είχε κατά την αμέσως προηγούμενη κίνησή του αν κάνει παύση.

(στ) pauseT: Είναι ο χρόνος παύσης που υπολείπεται μέχρι ο κόμβος να ολοκληρώσει την παύση του αν κάνει παύση ή είναι ίσος με -1 (επιλογή υλοποίησης) αν ο κόμβος βρίσκεται σε κίνηση.

(ζ) speedAngle: Είναι η γωνία του διανύσματος της ταχύτητας, η οποία καθορίζεται από τον προηγούμενο και τον επόμενο προορισμό. Χρησιμεύει στην ανανέωση της θέσης του κόμβου σε κάθε στιγμιότυπο.

(η) transLength: Είναι το μήκος της τρέχουσας μετάβασης αν ο κόμβος βρίσκεται σε κίνηση ή της αμέσως προηγούμενης αν ο κόμβος βρίσκεται σε παύση.

(θ) epsilon: Είναι η απόσταση που διανύει ο κόμβος σε χρόνο dt. Χρησιμεύει για να μπορούμε να καταλάβουμε αν ένας κόμβος έφτασε (πολύ κοντά) στον προορισμό του.

Κατόπιν, αρχικοποιούμε την εικόνα στην οποία θα παρουσιάζεται η περιοχή προσομοίωσης με τους κινούμενους κόμβους. Οι θέσεις των κόμβων θα ανανεώνονται σε κάθε στιγμιότυπο της προσομοίωσης και έτσι στον χρήστη θα δίνεται η εντύπωση της κίνησης. Στην εικόνα αυτή παρουσιάζουμε επίσης το χρόνο που έχει περάσει από την αρχή της προσομοίωσης.

Το επόμενο τμήμα του κώδικα είναι το πιο σημαντικό, καθώς σε αυτό περιέχεται ο αλγόριθμος του Μοντέλου Κινητικότητας όπως επίσης και η δειγματοληψία των μεγεθών για τα οποία θέλουμε να πάρουμε στατιστικά αποτελέσματα. Πρόκειται για έναν επαναληπτικό βρόχο που επαναλαμβάνεται $\text{totalTimeSteps} = \text{simulationTime}/dt$ φορές. Στην αρχή του επαναληπτικού βρόχου γίνεται μια παύση και ξανασχεδιάζονται στην οθόνη οι νέες θέσεις των κόμβων. Επίσης εμφανίζεται ο χρόνος που έχει περάσει από την αρχή της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, ανανεώνουμε τις πληροφορίες που αφορούν όλους τους κόμβους, ανάλογα με το αν αυτοί κάνουν παύση ή βρίσκονται σε κίνηση και λαμβάνουμε στατιστικά στοιχεία. Εισερχόμαστε, δηλαδή, σε έναν επαναληπτικό βρόχο ο οποίος αποτελείται από N επαναλήψεις – όσες δηλαδή το πλήθος των κόμβων. Στην αρχή του βρόχου αυτού υπολογίζουμε το στοιχειώδες ορθογώνιο (pixel) στην περιοχή

προσομοίωσης στο οποίο βρίσκεται ο κόμβος και ενημερώνουμε τη χωρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, αυξάνοντας κατά 1 την τιμή της που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο pixel. Δηλαδή προς το παρόν, ο πίνακας pdfPosition θα περιέχει σε κάθε θέση του το πλήθος των εμφανίσεων των κόμβων στο αντίστοιχο pixel. Στη συνέχεια:

(α) Ελέγχουμε αν ο χρόνος παύσης ενός κόμβου είναι θετικός, δηλαδή αν ο κόμβος κάνει παύση σε κάποιον προορισμό (waypoint). Αν ισχύει αυτό, τότε μειώνουμε τον εναπομείναντα χρόνο παύσης κατά dt . (β) Αν δεν ισχύει αυτό, και ο χρόνος παύσης είναι αρνητικός αλλά μεγαλύτερος από -1 (που αντιστοιχεί σε κινούμενο κόμβο), αυτό σημαίνει πως μόλις έληξε ο χρόνος παύσης ενός κόμβου που βρισκόταν σε παύση. Σε αυτή την περίπτωση το πεδίο pauseT τίθεται ίσο με -1, κάτι που σημαίνει πως από εδώ και στο εξής ο κόμβος θα βρίσκεται σε κίνηση. Επιλέγεται ένας καινούριος προορισμός με βάση την ομοιόμορφη χωρική κατανομή στην περιοχή προσομοίωσης και μια καινούρια ταχύτητα με βάση την ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων στο διάστημα $[\min V, \max V]$ και ενημερώνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας. Επίσης υπολογίζεται η στοιχειώδης απόσταση epsilon που διανύει ένας κόμβος σε χρόνο dt . Με βάση τον προηγούμενο προορισμό (τρέχουσα θέση) και τον νεοεπιλεγθέντα προορισμό, υπολογίζεται η γωνία του διανύσματος της ταχύτητας, η οποία χρησιμεύει στην ανανέωση της θέσης του κόμβου κατά τη διάρκεια της κίνησής του. Υπολογίζεται επίσης το μήκος της νέας μετάβασης ως η απόσταση μεταξύ του προηγούμενου προορισμού (τρέχουσας θέσης) και του νέου προορισμού. Ενημερώνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης, αυξάνοντας κατά 1 την τιμή που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο μήκος μετάβασης, αφού προηγουμένως αυτό κβαντιστεί στο κέντρο του διαστήματος στο οποίο εμπίπτει. Υπολογίζεται επίσης ο χρόνος της νέας μετάβασης και ενημερώνεται με ανάλογο τρόπο η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης. (γ) Αν ο κόμβος βρίσκεται σε κίνηση, δηλαδή η τιμή του πεδίου pauseT είναι ίση με -1, τότε γίνονται οι εξής ενέργειες: Δειγματοληπτείται η ταχύτητα και ενημερώνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας, αλλάζει η τρέχουσα θέση του κόμβου με βάση την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησής του καθώς και το χρόνο dt που μεσολάβησε. Γίνεται επίσης ένας έλεγχος για το αν ο κόμβος έφτασε «πολύ κοντά» στον προορισμό. Αν συμβαίνει αυτό, τότε αρχικοποιείται ένας τυχαίος χρόνος παύσης που λαμβάνεται από μια ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ minPauseTime και maxPauseTime και ο κόμβος βρίσκεται σε κατάσταση παύσης.

Το τελευταίο κομμάτι του κώδικα σχετίζεται με την επεξεργασία και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αποτελείται από τα εξής επιμέρους στατιστικά αποτελέσματα:

(α) χωρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της θέσης των κόμβων: Στόχος είναι η απεικόνιση με μορφή επιφάνειας (συνάρτησης $z=f(x,y)$) της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της θέσης των κόμβων. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, μετά το τέλος της προσομοίωσης η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (δισδιάστατος πίνακας) περιέχει σε κάθε στοιχείο της (που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο στοιχειώδες ορθογώνιο της περιοχής προσομοίωσης) το πλήθος των εμφανίσεων κόμβων στο αντίστοιχο στοιχειώδες ορθογώνιο (pixel). Για να είναι όμως η pdfPosition συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, πρέπει ο όγκος που περικλείεται κάτω από την επιφάνεια που ορίζει να ισούται με τη μονάδα. Για το λόγο αυτό, υπολογίζουμε τον όγκο που περικλείεται κάτω από την pdfPosition, και διαιρούμε τη pdfPosition με τον αριθμό αυτό.

Επίσης, υπολογίζουμε τη μέγιστη τιμή της pdfPosition, την οποία και εμφανίζουμε κάτω από τη γραφική παράσταση.

(β) συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας: Θέλουμε να απεικονίσουμε με τη μορφή καμπύλης τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας. Αυτό γίνεται όπως και πριν, κανονικοποιώντας προηγουμένως τη συνάρτηση αυτή, έτσι ώστε να ισχύει η απαίτηση για μοναδιαίο εμβαδόν κάτω από την καμπύλη. Η μέση τιμή της ταχύτητας δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$V = \int_{\min V}^{\max V} V \cdot pdfV \cdot dV$$

Το ολοκλήρωμα αυτό υπολογίζεται προσεγγιστικά ως ένα πεπερασμένο άθροισμα εμβαδών επιμέρους ορθογωνίων με πλάτος ίσο με speedDivisionSize και ύψος την αντίστοιχη τιμή $V \cdot pdfV$.

(γ) συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης: Με ανάλογο τρόπο με το (β) σχεδιάζουμε τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης και υπολογίζουμε τη μέση τιμή του.

(δ) συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης: Γίνεται με ανάλογο τρόπο με τα (β) και (γ).

II. Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης

Πιο κάτω επεξηγούμε τον κώδικα του προγράμματος σε MATLAB που υλοποιεί την προσομοίωση της κίνησης των κόμβων για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, καθώς και τη λήψη στατιστικών στοιχείων για τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών.

Κώδικας:

Βλέπε παράρτημα A.2 (A.2.2).

Περιγραφή – επεξήγηση του κώδικα:

Επειδή στον πιο πάνω κώδικα υπάρχουν πολλές ομοιότητες με τον κώδικα του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, θα αναφερθούμε μόνο στις διαφορές τους. Στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, το μήκος μετάβασης επιλέγεται απευθείας από μια ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ minL και maxL. Ορίζουμε το ελάχιστο μήκος μετάβασης minL=0 και το μέγιστο μήκος μετάβασης maxL ίσο με τη διαγώνιο της περιοχής προσομοίωσης. Το διάλυμα δομών (nodes) που περιέχει πληροφορίες σχετικές με κάθε κόμβο, δεν περιέχει συντεταγμένες προορισμού (όπως συμβαίνει στο Μοντέλο Τυχαίων Στάσεων) αλλά ένα πεδίο με το όνομα transLength, η τιμή του οποίου αντιστοιχεί στην απόσταση που απομένει μέχρι να ολοκληρωθεί η τρέχουσα μετάβαση. Αυτή αρχικοποιείται σε μια τυχαία τιμή κατά την έναρξη μιας μετάβασης και μειώνεται σταδιακά κατά τη διάρκεια της κίνησης του κόμβου.

Κατά τη διάρκεια του επαναληπτικού βρόχου της προσομοίωσης, αν ένας κόμβος έχει μόλις ολοκληρώσει την παύση του, τότε αρχικοποιείται το `transLength` σε μια τυχαία τιμή που επιλέγεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[\text{minL}, \text{maxL}]$. Επίσης αρχικοποιείται η γωνία της ταχύτητας (κατεύθυνση της κίνησης) σε μια τιμή που επιλέγεται από την ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ 0 και 360° . Όπως και στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, έτσι και εδώ, επιλέγεται μια τυχαία τιμή για το μέτρο της ταχύτητας και ενημερώνονται κατάλληλα οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των μεγεθών. Αν ένας κόμβος βρίσκεται ήδη σε κίνηση, τότε γίνεται αρχικά ένας έλεγχος για το αν ο κόμβος βρίσκεται «πολύ κοντά» σε κάποιο από τα τέσσερα σύνορα της περιοχής προσομοίωσης. Αν ισχύει κάτι τέτοιο, τότε ο κόμβος πρέπει να «ανακλαστεί». Αυτό επιτυγχάνεται τροποποιώντας κατάλληλα τη γωνία της κίνησής του, ανάλογα με το σύνορο στο οποίο έχει χτυπήσει. Στη συνέχεια ενημερώνεται η θέση του κόμβου, σύμφωνα με την απόσταση που έχει διανύσει κατά τη διάρκεια του βήματος Δt και γίνεται ένας έλεγχος για το αν ο κόμβος ολοκλήρωσε τη μετάβασή του (πεδίο `transLength`). Αν αυτό ισχύει, τότε αρχικοποιείται ο χρόνος παύσης σε μια τυχαία τιμή και ο κόμβος ξεκινά να βρίσκεται σε παύση.

Η επεξεργασία και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως και για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων.

2.4. Μελέτη Κινητικότητας σε Κυψελωτά Συστήματα

2.4.1. Ένα στοιχειώδες κυψελωτό σύστημα

Μέχρι αυτό το σημείο, έχουμε μελετήσει την κινητικότητα των κόμβων και κάποια μεγέθη τα οποία την χαρακτηρίζουν, αλλά δεν έχουμε εξετάσει την επίδραση της σε κάποια υποδομή δικτύου, όπως για παράδειγμα σε ένα κυψελωτό σύστημα ή σε ένα ad hoc δίκτυο. Σε αυτή την παράγραφο, θα θεωρήσουμε ένα απλό κυψελωτό σύστημα, ενώ στην επόμενη θα εξετάσουμε ένα δίκτυο ad hoc.

Το κυψελωτό σύστημα που εξετάζουμε αποτελείται από ορθογώνιες κυψέλες, οι οποίες καταλαμβάνουν υπό μορφή ορθογωνικού πλέγματος ολόκληρη την περιοχή προσομοίωσης. Θα μελετήσουμε τα εξής μεγέθη:

(α) την κατανομή (συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας) του χρόνου παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη, καθώς και τη μέση τιμή του χρόνου παραμονής σε κάθε κυψέλη.

(β) το μέσο ρυθμό εισόδου και εξόδου των χρηστών (κόμβων) σε κάθε κυψέλη.

(γ) το μέσο ρυθμό αλλαγών κυψέλης ανά χρήση.

Πιο κάτω περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο ενσωματώσαμε επιπλέον στοιχεία στον κώδικα του προγράμματος προσομοίωσης, έτσι ώστε να λαμβάνουμε κατάλληλες μετρήσεις, να επεξεργαζόμαστε και να παρουσιάζουμε τα πιο πάνω στατιστικά στοιχεία.

2.4.2. Κώδικας και επεξήγηση προγραμμάτων

Κώδικας:

Βλέπε παράρτημα A.2 (A.2.3 και A.2.4).

Επεξήγηση

Τόσο στον κώδικα για την υλοποίηση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, όσο και στον κώδικα για την υλοποίηση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, προστέθηκαν επιπλέον στοιχεία ώστε να είναι δυνατή η λήψη των κατάλληλων στατιστικών μεγεθών. Συγκεκριμένα, ορίσαμε τις παραμέτρους numOfCellsX και numOfCellsY που καθορίζουν το πλήθος των κυψελών σε κάθε διάσταση της περιοχής προσομοίωσης, και συνεπώς, το γινόμενο τους numOfCells ισούται με το συνολικό πλήθος των κυψελών. Υπολογίζουμε επίσης τις διαστάσεις μιας κυψέλης στους δύο άξονες. Όλες οι κυψέλες είναι πανομοιότυπες. Ορίζουμε το διάνυσμα sojT που αντιπροσωπεύει το χρόνο παραμονής ενός χρήστη σε μια κυψέλη, κατάλληλα κβαντισμένο. Στη συνέχεια, ορίζουμε ένα διάνυσμα από δομές (structures), με όνομα cells[]. Κάθε μία από τις δομές του διανύσματος αντιστοιχεί σε μια κυψέλη. Τα στοιχεία που κρατάμε για κάθε κυψέλη (πεδία της δομής) είναι τα εξής:

- (α) k: ο αύξων αριθμός της κυψέλης. Η αρίθμηση των κυψελών ξεκινάει από το άκρο $X=0$, $Y=0$, από αριστερά προς τα δεξιά (αυξανόμενο X) και από κάτω προς τα πάνω (αυξανόμενο Y).
- (β) i, j: η θέση της κυψέλης στο ορθογώνιο πλέγμα κυψελών που δημιουργείται.
- (γ) cellXCenter, cellYCenter: οι συντεταγμένες του κέντρου της κυψέλης, όπου βρίσκεται ο σταθμός βάσης.
- (δ) countIn: ένας μετρητής που αυξάνεται κάθε φορά που ένας κόμβος εισέρχεται σε μια κυψέλη.
- (ε) countOut: ένας μετρητής που αυξάνεται κάθε φορά που ένας κόμβος εξέρχεται από μια κυψέλη.
- (στ) sojournCounter: ένας μετρητής που περιέχει το συνολικό χρόνο παραμονής όλων των κόμβων εντός κάθε κυψέλης.
- (ζ) pdfSojT: ένα διάνυσμα που περιέχει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη. Κάθε τιμή του pdfSojT περιέχει την τιμή της σ.π.π. για το αντίστοιχο στοιχείο του διανύσματος sojT.

Στη δομή που περιέχει πληροφορίες για κάθε κόμβο (βλέπε διάνυσμα δομών nodes), προσθέτουμε τα εξής πεδία:

- (α) currentCell: ο αύξων αριθμός της κυψέλης στην οποία βρίσκεται ο κόμβος κατά την τρέχουσα χρονική στιγμή.
- (β) nodeSojournCounter: ένας μετρητής που αυξάνεται κατά 1 σε κάθε επανάληψη της προσομοίωσης (κάθε dt) και δείχνει πόσο χρόνο ένας κόμβος παραμένει σε μία κυψέλη. Μηδενίζεται κάθε φορά που ο κόμβος αλλάζει κυψέλη.

Μετά τη δημιουργία του πίνακα των δομών για τις κυψέλες, σχεδιάζουμε το πλέγμα των κυψελών καθώς και τα κέντρα τους, που αντιστοιχούν στους σταθμούς βάσης.

Σε κάθε επανάληψη του κυρίως επαναληπτικού βρόχου της προσομοίωσης προστίθενται νέες λειτουργίες. Στην αρχή του βρόχου, αυξάνεται το πεδίο sojournCounter κάθε κόμβου. Η μόνη περίπτωση στην οποία μπορεί να γίνει αλλαγή κυψέλης είναι εάν ο κόμβος βρίσκεται σε κίνηση. Σε αυτή την περίπτωση, ελέγχουμε αν η κυψέλη που αντιστοιχεί στη νέα θέση του είναι διαφορετική από την κυψέλη που αντιστοιχούσε στην προηγούμενη θέση του και περιέχεται στο πεδίο currentCell. Αν ισχύει κάτι τέτοιο, αυξάνουμε το μετρητή countIn της νέας κυψέλης και το μετρητή countOut της παλιάς κυψέλης. Επίσης αυξάνουμε το μετρητή sojournCounter της παλιάς

κυψέλης κατά το χρόνο που παρέμεινε ο εξερχόμενος κόμβος σε αυτήν. Ακόμα, ενημερώνουμε τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου παραμονής της παλιάς κυψέλης με βάση το χρόνο παραμονής. Τέλος, ενημερώνουμε το πεδίο `currentCell` του κόμβου, ώστε να περιέχει τη νέα κυψέλη στην οποία ανήκει και μηδενίζουμε το μετρητή `nodeSojournCounter`.

Μετά το τέλος του κυρίως βρόχου της προσομοίωσης, γίνεται η επεξεργασία και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με το κυψελωτό σύστημα.

(α) Αρχικά κάνουμε μια γραφική παράσταση (ραβδόγραμμα) του μέσου χρόνου παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη. Ο μέσος χρόνος παραμονής για μια συγκεκριμένη κυψέλη βρίσκεται αν πολλαπλασιάσουμε το `sojournCounter` με το `dt` για να βρούμε το συνολικό χρόνο παραμονής των κόμβων στην κυψέλη σε `sec` και στη συνέχεια διαιρέσουμε με το πλήθος των κόμβων που εξήλθαν από αυτήν. Επίσης, υπολογίζουμε το μέσο όρο των χρόνων παραμονής σε όλες τις κυψέλες.

(β) Στη συνέχεια, κάνουμε μια γραφική παράσταση των μέσων ρυθμών εισόδου και εξόδου κόμβων προς και από κάθε κυψέλη. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, οι μεταβλητές `countIn` και `countOut` περιέχουν το συνολικό αριθμό των αφίξεων και των αναχωρήσεων κόμβων προς/από μια κυψέλη. Διαιρώντας καθέναν από αυτούς τους μετρητές με το συνολικό χρόνο της προσομοίωσης, προκύπτει ένας μέσος ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων. Μας ενδιαφέρει όμως και ο υπολογισμός του μέσου ρυθμού αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο, δηλαδή πόσες αλλαγές κυψέλης ανά μονάδα χρόνου συναντά κατά μέσο όρο ένας κόμβος εξαιτίας της κίνησής του. Αυτό προκύπτει αν διαιρέσουμε το άθροισμα των ρυθμών εξόδου (ή εισόδου) από όλες τις κυψέλες με το πλήθος των κόμβων. Ουσιαστικά διαιρούμε δηλαδή το μέσο ρυθμό των συνολικών μεταγωγών που έγιναν στο κυψελωτό σύστημα με το πλήθος των χρηστών για να βρούμε το μέσο ρυθμό μεταγωγών που αντιστοιχούν σε κάθε χρήστη.

(γ) Τέλος, σχεδιάζουμε υπό μορφή ραβδογράμματος την κατανομή του χρόνου παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η γραφική παράσταση που κάνουμε δεν είναι συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας με την αυστηρή έννοια διότι το εμβαδόν κάτω από αυτήν δεν είναι μονάδα και επιπλέον είναι ραβδόγραμμα και όχι καμπύλη. Ο άξονας του χρόνου παραμονής (οριζόντιος άξονας) χωρίζεται σε μικρά διαστήματα της τάξης των 2s ή 3s, και σε κάθε διάστημα αντιστοιχεί η πιθανότητα (από 0 έως 1) ο χρόνος παραμονής ενός κόμβου να ανήκει σε αυτό το διάστημα.

2.5. Μελέτη Κινητικότητας σε δίκτυα ad hoc

2.5.1. Ζεύξεις και μονοπάτια σε ένα δίκτυο ad hoc

Σε ένα δίκτυο ad hoc δεν υπάρχει κάποια σταθερή δικτυακή υποδομή και οι κόμβοι επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους. Το δίκτυο είναι στην ουσία το πλέγμα των κόμβων και κάθε κόμβος λειτουργεί και ως δρομολογητής, προωθώντας την κίνηση που παράγουν άλλοι κόμβοι.

Θεωρώντας ότι υπάρχει μια ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων αν ο ένας βρίσκεται εντός της ακτίνας μετάδοσης του άλλου, μελετήσαμε αρχικά την επίδραση της κινητικότητας στη διάρκεια της ζεύξης. Μέσω της προσομοίωσης, προσθέσαμε κατάλληλα στοιχεία ώστε

να μπορούμε να λαμβάνουμε μετρήσεις για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα των ζεύξεων. Στόχος μας ήταν η δημιουργία καμπυλών τόσο για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μιας ζεύξης όσο και για τη διαθεσιμότητα μιας ζεύξης. Η διαθεσιμότητα ορίζεται ως η πιθανότητα μια ζεύξη που δημιουργήθηκε τη χρονική στιγμή 0 να είναι διαθέσιμη τη χρονική στιγμή t . Και τα δύο αυτά μεγέθη είναι πολύ χρήσιμα στη μελέτη ενός δικτύου ad hoc, διότι δίνουν μια εικόνα για τη σταθερότητά του.

Στη συνέχεια, προχωρήσαμε ένα βήμα παραπέρα και μελετήσαμε τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα μονοπατιών δύο και τριών αλμάτων (ζεύξεων) αντίστοιχα. Η μελέτη αυτή είναι πολύ χρήσιμη, διότι, σε ένα δίκτυο ad hoc, δύο κόμβοι που επικοινωνούν συνήθως δεν είναι άμεσα συνδεδεμένοι, και η κίνησή τους δρομολογείται μέσω ενδιάμεσων κόμβων του δικτύου. Συνεπώς η γνώση της σταθερότητας των μονοπατιών είναι πολύτιμη πληροφορία για τους αλγόριθμους δρομολόγησης που θα εφαρμοστούν στο συγκεκριμένο δίκτυο και θα πρέπει να αποφασίσουν μέσα από ποια μονοπάτια θα προωθήσουν την εκάστοτε κίνηση.

2.5.2. Κώδικας και επεξήγηση προγραμμάτων

I. Για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα ζεύξης

Κώδικας:

Βλέπε παράρτημα A.2. (A.2.5 - A.2.8).

Επεξήγηση

Τόσο στον κώδικα για την υλοποίηση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, όσο και στον κώδικα για την υλοποίηση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, προστέθηκαν επιπλέον στοιχεία ώστε να είναι δυνατή η λήψη των κατάλληλων στατιστικών μεγεθών. Αρχικά, ορίζουμε κάποιους πίνακες που θα διατηρούν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση και τη διάρκεια όλων των ζεύξεων στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, ο τετραγωνικός πίνακας linkStatus περιέχει σε κάθε στοιχείο του (i, j) την κατάσταση της ζεύξης μεταξύ των κόμβων i και j . Αν υπάρχει μια ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων, το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα ισούται με 1, ενώ διαφορετικά, ισούται με μηδέν. Λόγω του ότι θεωρούμε αμφίδρομες ζεύξεις και ίση ακτίνα μετάδοσης των κόμβων, θα χρησιμοποιούμε μόνο το τμήμα του πίνακα άνω της κύριας διαγωνίου (το υπόλοιπο θα είναι μηδέν). Ένας δεύτερος τετραγωνικός πίνακας, με όνομα linkDuration, περιέχει το χρόνο ζωής μιας ζεύξης από τη στιγμή που δημιουργήθηκε. Επίσης, χρησιμοποιούμε ένα πίνακα με όνομα linkHandles που περιέχει σε κάθε θέση του το handle της ευθείας που απεικονίζει την αντίστοιχη ζεύξη. Ακόμα, ορίζουμε μια σταθερά με όνομα maxLinkDist, που ισούται με την ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου ή ισοδύναμα με τη μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο κόμβων που είναι άμεσα συνδεδεμένοι.

Είναι αναγκαίο να ορίσουμε κάποιες μεταβλητές για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης. Η μεταβλητή numOfLinksCompleted μετρά το πλήθος των ζεύξεων που δημιουργήθηκαν και στη συνέχεια διακόπηκαν, δηλαδή ισούται με το πλήθος των μετρήσεων – δειγμάτων που έχουν ληφθεί για τη διάρκεια ζεύξης. Η

μεταβλητή `numOfDurationDivisions` καθορίζει το πλήθος των υποδιαίρεσεων του άξονα της διάρκειας ζεύξης. Το μέγεθος κάθε διαστήματος δίνεται από τη μεταβλητή `linkDurationDivSize`. Για την αποθήκευση των τιμών της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας χρησιμοποιείται το διάνυσμα `pdfLinkDuration`, ενώ για την αποθήκευση των κβαντισμένων τιμών διάρκειας ζεύξης (κέντρα των αντίστοιχων διαστημάτων) χρησιμοποιείται ο πίνακας `LinkDuration`. Κάθε τιμή `pdfLinkDuration(m)` αντιστοιχεί στην τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας στη διάρκεια ζεύξης `LinkDuration(m)`. Η μέγιστη διάρκεια μιας ζεύξης, `maxLinkDuration`, ορίζεται ίση με το χρόνο προσομοίωσης.

Παρόμοια με τα πιο πάνω, ορίζουμε κάποιες μεταβλητές για τη συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης. Η μεταβλητή `numOfLinksCreated` μετρά το πλήθος των ζεύξεων που δημιουργήθηκαν. Η μεταβλητή `numOfAvailDivisions` καθορίζει το πλήθος των υποδιαίρεσεων στον άξονα του χρόνου. Το μέγεθος κάθε διαστήματος δίνεται από τη μεταβλητή `linkAvailDivSize`. Για την αποθήκευση των τιμών της συνάρτησης διαθεσιμότητας χρησιμοποιείται το διάνυσμα `pdfLinkAvail`, ενώ για την αποθήκευση των κβαντισμένων τιμών του χρόνου (κέντρα των αντίστοιχων διαστημάτων) χρησιμοποιείται ο πίνακας `LinkAvail`. Κάθε τιμή `pdfLinkAvail(m)` αντιστοιχεί στην τιμή της συνάρτησης διαθεσιμότητας ζεύξης στο χρόνο t . Η μέγιστη διαθεσιμότητα μιας ζεύξης, `maxLinkAvail`, ορίζεται ίση με το χρόνο προσομοίωσης.

Πριν την έναρξη του κυρίως βρόχου προσομοίωσης, σχεδιάζονται οι ζεύξεις μεταξύ των κόμβων με βάση τις αρχικές τους θέσεις. Ελέγχουμε όλα τα πιθανά ζεύγη κόμβων και αν δύο κόμβοι βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη της `maxLinkDist`, τότε θεωρούμε ότι υπάρχει ζεύξη μεταξύ τους. Για κάθε ζεύξη που δημιουργείται αυξάνουμε τον αριθμό `numOfLinksCreated`. Μέσα στον κυρίως βρόχο προσομοίωσης, ελέγχονται όλα τα πιθανά ζεύγη κόμβων και γίνονται τα εξής (για κάθε ζεύγος κόμβων): Υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων και ελέγχεται αν είναι μικρότερη της `maxLinkDist`. Αν ισχύει αυτό και η ζεύξη προϋπήρχε, τότε αυξάνουμε το χρόνο ζωής της κατά dt και ενημερώνουμε τη συνάρτηση διαθεσιμότητας της ζεύξης. Αν η ζεύξη δεν προϋπήρχε, τότε αυξάνουμε το πλήθος των ζεύξεων που δημιουργήθηκαν (`numOfLinksCreated`) κατά 1 και ενημερώνουμε το στοιχείο του πίνακα `linkStatus`. Αν η απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων είναι μεγαλύτερη του `maxLinkDist`, τότε αν προηγουμένως υπήρχε ζεύξη μεταξύ τους κάνουμε τα εξής: ενημερώνουμε τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας της ζεύξης, αυξάνεται το πλήθος των ζεύξεων που έχουν συμπληρώσει τον κύκλο τους (`numOfLinksCompleted`). Ακόμα, μηδενίζεται τόσο το στοιχείο του πίνακα `linkStatus` όσο και του πίνακα `linkDuration` που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη ζεύξη.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι κάθε φορά που μια ζεύξη δημιουργείται, η ευθεία που την απεικονίζει γίνεται ορατή ενώ κάθε φορά που μια ζεύξη διακόπτεται, η ευθεία που συνδέει τα αντίστοιχα σημεία γίνεται «αόρατη».

Μετά το πέρας της προσομοίωσης γίνεται η γραφική παράσταση της πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης και της διαθεσιμότητας ζεύξης. Οι τιμές της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης κανονικοποιούνται έτσι ώστε το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη να είναι ίσο με τη μονάδα. Στην περίπτωση της συνάρτησης διαθεσιμότητας, οι τιμές της αρχικά αντιπροσωπεύουν το πλήθος των μετρήσεων που λήφθηκαν για όλες τις ζεύξεις που ήταν ενεργές μετά από χρόνο t από τη δημιουργία τους. Επειδή εν γένει το `linkDurationDivSize` είναι διαφορετικό από το dt (συνήθως μεγαλύτερο), για κάθε κβαντισμένο χρόνο t λήφθηκαν `linkDurationDivSize/dt`

μετρήσεις. Για το λόγο αυτό διαιρούμε τις τιμές της συνάρτησης διαθεσιμότητας με τον πιο πάνω λόγο. Επίσης, τη διαιρούμε και με το πλήθος των ζεύξεων που δημιουργήθηκαν numOfLinksCreated. Αυτό μας εξασφαλίζει ότι οι τιμές της διαθεσιμότητας αντιστοιχούν στο λόγο (από 0 ως 1) των ζεύξεων που ήταν ενεργές μετά από χρόνο t από τη δημιουργία τους.

II. Για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα μονοπατιών δύο αλμάτων

Κώδικας:

Βλέπε παράρτημα A.2 (A.2.5 – A.2.6).

Επεξήγηση

Προσθέσαμε κατάλληλες λειτουργίες στο πρόγραμμα μας ώστε να είναι δυνατή η μελέτη μονοπατιών δύο αλμάτων, δηλαδή μονοπατιών που αποτελούνται από δύο κόμβους που επικοινωνούν μέσω ενός τρίτου κόμβου που βρίσκεται εντός της ακτίνας μετάδοσης και των δύο. Τα μονοπάτια αυτά, δηλαδή, αποτελούνται από δύο ζεύξεις (τρεις κόμβους). Λόγω της εξαιρετικά μεγάλης πολυπλοκότητας που θα είχε το πρόγραμμα αν έβρισκε όλα τα μονοπάτια δύο βημάτων που δημιουργούνταν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και κρατούσε στατιστικά στοιχεία για όλα, αποφασίσαμε να μελετήσουμε μόνο τα μονοπάτια που είχαν ως ακραίους κόμβους δύο προκαθορισμένους και συγκεκριμένα τους κόμβους 1 και 2. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου εύρεσης και λήψης στατιστικών στοιχείων είναι η εξής: «Βρες ένα νεοδημιουργηθέν μονοπάτι δύο αλμάτων μεταξύ των κόμβων 1 και 2 και ξεκίνα να χρονομετράς τη διάρκειά του, ενημερώνοντας τη συνάρτηση διαθεσιμότητας. Μόλις το μονοπάτι αυτό διακοπεί (δηλαδή τουλάχιστον η μία από τις δύο ζεύξεις που το αποτελούν σπάσει), ενημέρωσε τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας του μονοπατιού. Επανάλαβε την πιο πάνω διαδικασία.» Όπως είναι φανερό, κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης κρατάμε στοιχεία για ένα μόνο μονοπάτι δύο αλμάτων.

Τόσο στον κώδικα για την υλοποίηση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, όσο και στον κώδικα για την υλοποίηση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης προστέθηκαν επιπλέον στοιχεία ώστε να είναι δυνατή η λήψη των κατάλληλων στατιστικών μεγεθών. Αρχικά, ορίζουμε κάποιες μεταβλητές που θα διατηρούν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση και το χρόνο ζωής του μονοπατιού δύο αλμάτων. Συγκεκριμένα, η μεταβλητή pathStatus περιέχει την κατάσταση του μονοπατιού μεταξύ των κόμβων 1 και 2. Αν υπάρχει ένα μονοπάτι δύο αλμάτων μεταξύ των δύο αυτών κόμβων, τότε η μεταβλητή αυτή ισούται με 1, ενώ διαφορετικά, ισούται με μηδέν. Μια άλλη μεταβλητή, με όνομα pathDuration, περιέχει το χρόνο ζωής του μονοπατιού από τη στιγμή που δημιουργήθηκε.

Για να μπορούμε να διακρίνουμε οπτικά τους ενδιάμεσους κόμβους από τους δύο ακραίους (επικοινωνούντες) κόμβους, ορίζουμε επιμέρους πίνακες που περιέχουν τις συντεταγμένες των ενδιάμεσων κόμβων (3,...,N) και των ακραίων κόμβων (1 και 2). Οι ακραίοι κόμβοι απεικονίζονται ως κόκκινες τελείες ενώ οι ενδιάμεσοι κόμβοι ως πράσινες τελείες στην κινούμενη εικόνα της προσομοίωσης.

Η μεταβλητή `numOfPathsCompleted` μετρά το πλήθος των μονοπατιών που δημιουργήθηκαν και στη συνέχεια διακόπηκαν, δηλαδή ισούται με το πλήθος των μετρήσεων – δειγμάτων που έχουν ληφθεί για τη διάρκεια μονοπατιού. Η μεταβλητή `numOfPathDurationDivisions` καθορίζει το πλήθος των υποδιαίρεσεων του άξονα της διάρκειας μονοπατιού. Το μέγεθος κάθε διαστήματος δίνεται από τη μεταβλητή `PathDurationDivSize`. Για την αποθήκευση των τιμών της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας χρησιμοποιείται το διάνυσμα `pdfPathDuration`, ενώ για την αποθήκευση των κβαντισμένων τιμών της διάρκειας του μονοπατιού (κέντρα των αντίστοιχων διαστημάτων) χρησιμοποιείται ο πίνακας `PathDuration`. Κάθε τιμή `pdfPathDuration(m)` αντιστοιχεί στην τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας στη διάρκεια μονοπατιού `PathDuration(m)`. Η μέγιστη διάρκεια ενός μονοπατιού, `maxPathDuration`, ορίζεται ίση με το χρόνο προσομοίωσης.

Η μεταβλητή `numOfPathsCreated` μετρά το πλήθος των μονοπατιών που δημιουργήθηκαν. Η μεταβλητή `numOfPathAvailDivisions` καθορίζει το πλήθος των υποδιαίρεσεων του άξονα του χρόνου. Το μέγεθος κάθε διαστήματος δίνεται από τη μεταβλητή `PathAvailDivSize`. Για την αποθήκευση των τιμών της συνάρτησης διαθεσιμότητας χρησιμοποιείται το διάνυσμα `pdfPathAvail`, ενώ για την αποθήκευση των κβαντισμένων τιμών του χρόνου (κέντρα των αντίστοιχων διαστημάτων) χρησιμοποιείται ο πίνακας `PathAvail`. Κάθε τιμή `pdfPathAvail(m)` αντιστοιχεί στην τιμή της συνάρτησης διαθεσιμότητας μετά από χρόνο `PathAvail(m)`. Ο μέγιστος χρόνος διαθεσιμότητας ενός μονοπατιού, `maxPathAvail`, ορίζεται ίσος με το χρόνο προσομοίωσης.

Τέλος, ορίζουμε δύο διανύσματα που θα περιέχουν τις συντεταγμένες των σημείων του τρέχοντος μονοπατιού, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απεικόνισή του με κόκκινη ευθεία και να διακρίνεται εύκολα στην κινούμενη εικόνα της προσομοίωσης (οι ζεύξεις μεταξύ των κόμβων που δεν περιλαμβάνονται στο μονοπάτι απεικονίζονται με λεπτές μπλε γραμμές).

Μέσα στον κυρίως βρόχο της προσομοίωσης, μετά από την ενημέρωση της κατάστασης των ζεύξεων του δικτύου *ad hoc*, εισάγεται η μελέτη των μονοπατιών. Αν υπήρχε ένα μονοπάτι κατά την προηγούμενη επανάληψη, ελέγχουμε αν οι ζεύξεις που το αποτελούσαν εξακολουθούν να υπάρχουν. Αν ισχύει αυτό, αυξάνουμε το χρόνο ζωής του μονοπατιού και ενημερώνουμε τη συνάρτηση διαθεσιμότητας. Επίσης ενημερώνουμε τον πίνακα με τις θέσεις των κόμβων του μονοπατιού (`pathPoints`). Αν δεν ισχύει αυτό, κάτι που σημαίνει πως το μονοπάτι που υπήρχε διακόπηκε, τότε ενημερώνουμε τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας του μονοπατιού, μηδενίζουμε τις μεταβλητές `pathStatus` και `parthDuration` και «εξαφανίζουμε» την κόκκινη τεθλασμένη ευθεία που απεικόνιζε το μονοπάτι. Στην περίπτωση που δεν υπήρχε κάποιο μονοπάτι κατά την προηγούμενη επανάληψη, κάνουμε έναν έλεγχο για εύρεση ενός νεοδημιουργηθέντος μονοπατιού. Αυτό γίνεται ελέγχοντας όλους τους κόμβους 3,...,N και βρίσκοντας τον πρώτο από αυτούς που βρίσκεται εντός της ακτίνας μετάδοσης τόσο του κόμβου 1 όσο και του κόμβου 2. Επειδή όμως θέλουμε το μονοπάτι που θα βρούμε να έχει μόλις δημιουργηθεί, απαιτούμε μία (τουλάχιστον) από τις δύο ζεύξεις που το αποτελούν να μην υπήρχε κατά την προηγούμενη επανάληψη. Αυτό γίνεται ελέγχοντας τις αντίστοιχες τιμές του πίνακα `previousLinkStatus`, ο οποίος περιέχει την κατάσταση όλων των ζεύξεων κατά την αμέσως προηγούμενη επανάληψη. Σε περίπτωση που βρεθεί ένα καινούριο μονοπάτι, ενημερώνονται οι μεταβλητές `pathStatus`, `intermediateNode` και

numOfPathsCreated καθώς και τα σημεία της τεθλασμένης ευθείας που θα απεικονίζει το μονοπάτι, η οποία γίνεται «ορατή».

Μετά το πέρας της προσομοίωσης γίνεται η γραφική παράσταση τόσο της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού όσο και της συνάρτησης διαθεσιμότητας. Ο τρόπος επεξεργασίας των αποτελεσμάτων που προηγείται της γραφικής παράστασης είναι ακριβώς αντίστοιχος με αυτόν για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης και τη συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης, όπως περιγράφηκε στο II.

III. Για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα μονοπατιών τριών αλμάτων

Κώδικας:

Βλέπε παράρτημα A.2. (A.2.7 – A.2.8).

Επεξήγηση

Έχοντας υλοποιήσει τη μελέτη μονοπατιών δύο βημάτων, προχωρήσαμε ένα βήμα πιο πέρα και μελετήσαμε τα μονοπάτια τριών βημάτων μεταξύ δύο καθορισμένων κόμβων, των κόμβων 1 και 2. Στην περίπτωση αυτή, μεσολαβούν δύο κόμβοι μεταξύ των κόμβων 1 και 2. Η μόνη ουσιαστική διαφορά σε σχέση με το II εστιάζεται στον αλγόριθμο αναζήτησης καινούριου μονοπατιού. Αυτό γίνεται βρίσκοντας αρχικά ένα κόμβο από 3,...,N που βρίσκεται εντός της εμβέλειας του 1 και στη συνέχεια, ελέγχοντας για αν υπάρχει κάποιος άλλος κόμβος από 3,...,N ο οποίος βρίσκεται τόσο εντός της εμβέλειας του προηγούμενου όσο και εντός της εμβέλειας του κόμβου 2. Σε αυτή την περίπτωση, και εφόσον (τουλάχιστον) μια από τις ζεύξεις του μονοπατιού δεν προϋπήρχε, έχει βρεθεί ένα νέο μονοπάτι τριών βημάτων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.2

Α.2.1. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων χωρίς δικτυακή υποδομή

```

% Program for simulation of the Random Waypoint Mobility Model
% simple version (only mobility metrics are measured)
% Authors : G. Cheimonidis & K. Palechoros
% Copyright 2008

function varargout = rwp_simple(varargin)

    % parameters of the model

    varargout = {0};
    % simulation area boundaries
    minX = 0;
    maxX = 1500;
    minY = 0;
    maxY = 1500;
    % pause time min and max values
    minPauseTime = 0;
    maxPauseTime = 0;
    % speed min and max values (in m/sec)
    minV = 15;
    maxV = 45;
    N = 50; % number of nodes
    simulationTime = 100000; % simulation time in seconds
    dt = 0.5; % time quantum of simulation
    totalTimeSteps = simulationTime/dt; % number of time steps
                                        % for simulation

    % maximum transition length and time
    maxL = sqrt((maxX-minX)^2 + (maxY-minY)^2);
    maxT = maxL/minV;

    % variables for the spatial node distribution
    numOfPixelsX = 15; % number of pixels in each dimension
    numOfPixelsY = 15;
    pixelSizeX = maxX / numOfPixelsX;
    pixelSizeY = maxY / numOfPixelsY;

    % matrices for storing the spatial node distribution as a
    % function of X,Y
    [X,Y] = meshgrid(pixelSizeX/2:pixelSizeX:maxX-pixelSizeX/2,
                    pixelSizeY/2:pixelSizeY:maxY-pixelSizeY/2);
    pdfPosition = zeros(numOfPixelsX, numOfPixelsY);

    % variables for the node speed distribution
    counterV = 0; % counts the number of node speed measures
    numOfSpeedDivisions = 60; % determines the resolution
                                % of the speed distribution
    divisionVSize = (maxV - minV)/numOfSpeedDivisions;

```

```

% vectors for storing the speed distribution
pdfV = zeros(1, numofSpeedDivisions);
V = [(minV+divisionVSize/2):divisionVSize:(maxV-divisionVSize/2)];

% variables for the transition length distribution
counterL = 0; % counts the number of transition length
            % and time measures
numofTransitionLDivisions = 60; % determines the resolution
                               % of the transition length
                               % distribution
divisionLSize = maxL/numofTransitionLDivisions;
% vectors for storing the transition length distribution
pdfL = zeros(1, numofTransitionLDivisions);
L = [divisionLSize/2:divisionLSize:maxL-divisionLSize/2];

% variables for the transition time distribution
numofTransitionTDivisions = 60; % determines the resolution
                               % of the transition time
                               % distribution
divisionTSize = maxT/numofTransitionTDivisions;
% vectors for storing the transition time distribution
pdfT = zeros(1, numofTransitionTDivisions);
T = [divisionTSize/2:divisionTSize:maxT-divisionTSize/2];

% create and initialize the array of structures that represent
  the nodes
nodes = struct([]);
for i = 1 : N
    nodes(i).curX = rand*maxX;
    nodes(i).curY = rand*maxY;
    nodes(i).destX = 0;
    nodes(i).destY = 0;
    nodes(i).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(i).pauseT = minPauseTime + rand*(maxPauseTime -
        minPauseTime);
    nodes(i).speedAngle = 0;
    nodes(i).transLength = 0;
    nodes(i).epsilon = nodes(i).speed * dt;
end

scrsz = get(0, 'ScreenSize');
f1=figure(1); % for displaying the simulation (moving nodes)
set(f1, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
handleScatter = scatter([nodes.curX], [nodes.curY], 'filled','o',
                        'b',... 'XDataSource', '[nodes.curX]',
                        'YDataSource', '[nodes.curY]');
axis([minX maxX minY maxY]);
axis square;
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Random Waypoint Mobility Model Simulation');

legend([num2str(N) ' nodes'], -1);
hText = annotation('textbox',[0.15 0.05 0 0], 'FitBoxToText','on');

```

```

set(hText, 'BackgroundColor', 'y', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center');

% s i m u l a t i o n   l o o p
for j = 1 : totalTimeSteps
    % pause(dt/1000);
    % draw the new position of the nodes
    refreshdata(handleScatter, 'caller');
    drawnow;
    set(hText, 'String', ['Elapsed time: ' num2str(floor(j*dt))
        'out of ' num2str(simulationTime) ' seconds']);
    % for every single node, refresh its position
    for k = 1 : N
        % update the spatial node distribution
        currentPixelX = ceil(nodes(k).curX/pixelSizeX);
        currentPixelY = ceil(nodes(k).curY/pixelSizeY);
        pdfPosition(currentPixelX, currentPixelY) =
            pdfPosition(currentPixelX, currentPixelY) + 1;
        % if the node is pausing at the waypoint
        if nodes(k).pauseT > 0
            nodes(k).pauseT = nodes(k).pauseT - dt;
        % if the pause time has elapsed
        elseif nodes(k).pauseT <= 0 && nodes(k).pauseT > -1
            nodes(k).pauseT = -1; % the node starts to
                % be in movement

            % calculate position of the next waypoint
            nodes(k).destX = rand*maxX;
            nodes(k).destY = rand*maxY;
            % calculate the new speed of the node
            nodes(k).speed = minV + rand*(maxV - minV);
            % update node speed distribution
            counterV = counterV + 1;
            vDivision = ceil(((nodes(k).speed-
                minV)/divisionVSize));
            pdfV(vDivision)= pdfV(vDivision) + 1;
            nodes(k).epsilon = nodes(k).speed * dt;
            % calculate the new direction of node's movement
            nodes(k).speedAngle = atand((nodes(k).destY-
            nodes(k).curY)/(nodes(k).destX-nodes(k).curX));
            if (nodes(k).destX - nodes(k).curX) < 0
                nodes(k).speedAngle = nodes(k).speedAngle + 180;
            end
            % update the pdfs:
            % calculate the transition length and update the
            % transition length distribution
            nodes(k).transLength = sqrt((nodes(k).destX -
            nodes(k).curX)^2 + (nodes(k).destY - nodes(k).curY)^2);
            lDivision =
                ceil(((nodes(k).transLength)/divisionLSize));
            pdfL(lDivision)= pdfL(lDivision) + 1;
            counterL = counterL + 1;
            % calculate the transition time and update the
            % transition time distribution
            tDivision =
                ceil(((nodes(k).transLength)/(nodes(k).speed*divisionTSize));
            pdfT(tDivision)= pdfT(tDivision) + 1;
            % if the node is in movement

```



```

elseif nodes(k).pauseT == -1
    % update node speed distribution
    counterV = counterV + 1;
    vDivision = ceil(((nodes(k).speed-
        minV)/divisionVSize));
    pdfV(vDivision)=pdfV(vDivision) + 1;
    % update the node's position
    nodes(k).curX = nodes(k).curX + nodes(k).speed *
        cosd(nodes(k).speedAngle)* dt;
    nodes(k).curY = nodes(k).curY + nodes(k).speed *
        sind(nodes(k).speedAngle)* dt;
    distance = ((nodes(k).destX - nodes(k).curX)^2 +
        (nodes(k).destY - nodes(k).curY)^2)^0.5;
    % if the node has reached its waypoint (destination),
    % initialize random pause time
    if distance < nodes(k).epsilon
        nodes(k).pauseT = minPauseTime +
            rand*(maxPauseTime - minPauseTime);
    end
end
end
end

% display the simulation RESULTS

% plotting the spatial node distribution
f2=figure(2);
set(f2, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfPosition = pdfPosition ./ (N*totalTimeSteps);
% normalizing the spatial node distribution
% (the integral underneath the pdf must be equal to 1)
temp = 0;
for i=1:numOfPixelsX
    for j=1:numOfPixelsY
        temp = temp + pdfPosition(i,j);
    end
end
temp = temp * pixelSizeX*pixelSizeY;
pdfPosition = pdfPosition ./ temp;
surf(X,Y,pdfPosition);
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Spatial Node Distribution (from simulation results)');
axis([0 maxX 0 maxY 0 1.1*max(max(pdfPosition))]);
hText01 = annotation('textbox',[0.2 0.03 0 0] );
set(hText01,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color','b' );
set(hText01, 'String', ['Peak value (from simulation results): '
    num2str(max(max(pdfPosition))) ' m^{-2}']);

% plotting the node speed distribution
f4=figure(4);
set(f4, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)

```

```

        0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfV = pdfV/counterV;
meanV = 0;
temp=0; % for normalizing the speed distribution
for k=1:numOfSpeedDivisions
    meanV = meanV + pdfV(k)*V(k)*divisionVSize;
    temp = temp + pdfV(k);
end
temp = temp * divisionVSize;
pdfV = pdfV ./ temp;
meanV = meanV/temp;
plot(V, pdfV, 'LineWidth', 1, 'Color', 'b');
% plotting the theoretical node speed pdf curve and calculating
% its mean value
pdfVTh = 1./(V.*log(maxV/minV));
meanVTh = (maxV - minV) / log(maxV/minV);
hold on;
plot(V, pdfVTh, 'LineWidth', 1, 'LineStyle', '--', 'Color',
    'm');
xlabel('V (m/s)');
ylabel('% probability');
title('Node speed distribution');
hText1 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText1,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText1, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanV) ' m/s']);
hText2 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText2,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm');
set(hText2, 'String', ['Mean Value (theoretical): '
    num2str(meanVTh) ' m/s']);
grid on;
grid minor;

% plotting the transition length distribution
f5=figure(5);
set(f5, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfL = pdfL./counterL;
meanL = 0;
temp = 0;
for k=1:numOfTransitionLDivisions
    meanL = meanL + pdfL(k)*L(k)*divisionLSize;
    temp = temp + pdfL(k);
end
temp = temp * divisionLSize;
pdfL = pdfL ./ temp;
meanL = meanL / temp;
plot(L, pdfL, 'LineWidth', 1, 'Color', 'b');
% plotting the theoretical transition length pdf curve and
% calculating its mean value
% we suppose that the simulation area is a square maxX = maxY

```

```

pdfLTh = (4.*L)./(maxX^4);
LChange = ceil(maxX/divisionLSize);
pdfLTh(1:LChange) = pdfLTh(1:LChange) .* (pi*maxX^2/2 -
    2*maxX.*L(1:LChange) + L(1:LChange).^2/2);
pdfLTh(LChange+1:numOfTransitionLDivisions) =
    pdfLTh(LChange+1:numOfTransitionLDivisions)
    .* (maxX^2.*asin(maxX./L(LChange+1:numOfTransitionLDivisions))
    2*maxX.*sqrt(L(LChange+1:numOfTransitionLDivisions).^2-
    maxX^2) - maxX^2 - maxX^2
    .*acos(maxX./L(LChange+1:numOfTransitionLDivisions))
    - L(LChange+1:numOfTransitionLDivisions).^2/2) ;
hold on;
plot(L, pdfLTh, 'LineWidth', 1, 'LineStyle', '--', 'Color',
    'm');
meanLTh = (maxX/3)*( (2+sqrt(2))/5 + acosh(sqrt(2)) );
xlabel('L (m)');
ylabel('% probability');
title('Transition length distribution');
hText3 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText3,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText3, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanL) ' m']);
hText4 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText4,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color','m');
set(hText4, 'String', ['Mean Value (theoretical): '
    num2str(meanLTh) ' m']);
grid on;
grid minor;

% plotting the transition time distribution
f6=figure(6);
set(f6, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfT = pdfT./counterL;
meanT = 0;
temp = 0;
for k=1:numOfTransitionTDivisions
    meanT = meanT + pdfT(k)*T(k)*divisionTSize;
    temp = temp + pdfT(k);
end
temp = temp * divisionTSize;
pdfT = pdfT ./ temp;
meanT = meanT / temp;
plot(T,pdfT, 'LineWidth', 1);
% plotting the theoretical transition time pdf curve and
% calculating its mean value
% we suppose that the simulation area is a square maxX = maxY
pdfTTh = zeros(1, numOfTransitionTDivisions);
pdfTTh(:) = 1./(maxV-minV);
for k=1:numOfTransitionTDivisions
    % calculating the function inside the integral
    pdfLTh = zeros(1, numOfSpeedDivisions);

```

```

for m=1:numOfSpeedDivisions
    temp = V(m)*T(k);
    n = ceil(temp/divisionLSize);
    if n<=LChange
        pdfLTh(m) = (4.*L(n))./(maxX^4);
        pdfLTh(m) = pdfLTh(m) * (pi*maxX^2/2 - 2*maxX*L(n) +
            L(n)^2/2);
    elseif n<=numOfTransitionLDivisions
        pdfLTh(m) = (4.*L(n))./(maxX^4);
        pdfLTh(m) = pdfLTh(m) .* (maxX^2*asin(maxX/L(n)) +
            2*maxX*sqrt(L(n)^2-maxX^2) - maxX^2 -
            maxX^2*acos(maxX/L(n)) - L(n)^2/2) ;
    else
        pdfLTh(m) = 0;
    end
end
% calculating the integral
product = V.*pdfLTh;
pdfTTh(k)=pdfTTh(k) * sum(product');
pdfTTh(k) = pdfTTh(k) * divisionVSize;
end
hold on;

plot(T, pdfTTh, 'LineWidth', 1 , 'LineStyle', '--', 'Color',
    'm');
meanTTh = meanLTh / meanVTh;
xlabel('T (s)');
ylabel('% probability');
title('Transition time distribution');
hText5 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText5,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText5, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanT) ' s']);
hText6 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText6,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm');
set(hText6, 'String', ['Mean Value (theoretical): '
    num2str(meanTTh) ' s']);
grid on;
grid minor;

% plotting the theoretical spatial node distribution
f3=figure(3);
set(f3, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
[X,Y] = meshgrid(0:pixelSizeX:maxX, 0:pixelSizeY:maxY);
pdfMovTh = (36/(maxX.^6)).*(X.^2-maxX.*X).*(Y.^2-maxY.*Y);
pdfStatTh = zeros(numOfPixelsX, numOfPixelsY);
pdfStatTh = 1 ./ (maxX^2);
meanPauseTTh = (minPauseTime + maxPauseTime)/2;
pauseProbTh = meanPauseTTh / (meanPauseTTh + meanTTh);
pdfPositionTh = pauseProbTh * pdfStatTh + (1-pauseProbTh) *
    pdfMovTh;

```

```

surf(X,Y,pdfPositionTh);
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Theoretical Spatial Node Distribution');
hText7 = annotation('textbox',[0.2 0.03 0 0] );
set(hText7,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText7, 'String', ['Peak value (theoretical): '
    num2str(max(max(pdfPositionTh))) ' m^{-2}']);

```

A.2.2. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης χωρίς δικτυακή υποδομή

```

% Program for simulation of the Random Direction Mobility Model
% simple version (only mobility metrics are measured)
% Authors : G. Cheimonidis & K. Palechoros
% Copyright 2008

```

```

function varargout = rd_simple(varargin)

    % p a r a m e t e r s   o f   t h e   m o d e l

    varargout = {0};
    % simulation area boundaries
    minX = 0;
    maxX = 1500;
    minY = 0;
    maxY = 1500;
    % pause time min and max values
    minPauseTime = 0;
    maxPauseTime = 0;

    % speed min and max values (in m/sec)
    minV = 15;
    maxV = 45;
    N = 50; % number of nodes
    simulationTime = 100000; % simulation time in seconds
    dt = 0.5; % time quantum of simulation
    totalTimeSteps = simulationTime/dt; % number of time steps
    % for simulation

    % transition length min and max values
    minL = 0;
    maxL = sqrt((maxX-minX)^2 + (maxY-minY)^2);
    % maximum transition time
    maxT = maxL/minV;

    % variables for the spatial node distribution
    numOfPixelsX = 15; % number of pixels in each dimension
    numOfPixelsY = 15;
    pixelSizeX = maxX / numOfPixelsX;
    pixelSizeY = maxY / numOfPixelsY;

```

```

% matrices for storing the spatial node distribution as a
% function of X,Y
[X,Y] = meshgrid(pixelSizeX/2:pixelSizeX:maxX-pixelSizeX/2,
                pixelSizeY/2:pixelSizeY:maxY-pixelSizeY/2);
pdfPosition = zeros(numOfPixelsX, numOfPixelsY);

% variables for the node speed distribution
counterV = 0; % counts the number of node speed measures
numOfSpeedDivisions = 60; % determines the resolution
                    % of the speed distribution
divisionVSize = (maxV - minV)/numOfSpeedDivisions;
% vector for storing the node speed distribution
pdfV = zeros(1, numOfSpeedDivisions);
V = [minV+divisionVSize/2:divisionVSize:(maxV-divisionVSize/2)];

% variables for the transition length distribution
counterL = 0; % counts the number of transition length
              & and time measures
numOfTransitionLDivisions = 60; % determines the resolution of
                                % the transition length
                                % distribution
divisionLSize = (maxL-minL)/numOfTransitionLDivisions;
% vectors for storing the transition length distribution
pdfL = zeros(1, numOfTransitionLDivisions);
L = [minL+divisionLSize/2:divisionLSize:maxL-divisionLSize/2];

% variables for the transition time distribution
numOfTransitionTDivisions = 60; % determines the resolution of
                                % the transition time
                                % distribution
divisionTSize = maxT/numOfTransitionTDivisions;
% vectors for storing the transition time distribution
pdfT = zeros(1, numOfTransitionTDivisions);
T = [divisionTSize/2:divisionTSize:maxT-divisionTSize/2];

% create and initialize the array of structures that represent
% the nodes
nodes = struct([]);
for i = 1 : N
    nodes(i).curX = rand*maxX;
    nodes(i).curY = rand*maxY;
    nodes(i).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(i).pauseT = minPauseTime + rand*(maxPauseTime -
                                           minPauseTime);

    nodes(i).speedAngle = 0;
    nodes(i).transLength = 0;
    nodes(i).epsilon = nodes(i).speed * dt;
end

scrsz = get(0,'ScreenSize');
f1=figure(1); % for displaying the simulation (moving nodes)
set(f1, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
                    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;

```

```

handleScatter = scatter([nodes.curX], [nodes.curY], 'filled','o',
                        'b','XDataSource', '[nodes.curX]',
                        'YDataSource', '[nodes.curY]');
axis([minX maxX minY maxY]);
axis square;
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Random Direction Mobility Model Simulation');

legend([num2str(N) ' nodes'], -1);
hText = annotation('textbox',[0.15 0.05 0 0], 'FitBoxToText',
                  'on');
set(hText, 'BackgroundColor', 'y', 'VerticalAlignment', 'middle',
      'HorizontalAlignment', 'center');

% s i m u l a t i o n   l o o p
for j = 1 : totalTimeSteps
    % pause(dt/1000);
    % draw the new position of the nodes
    refreshdata(handleScatter, 'caller');
    drawnow;
    set(hText, 'String', [num2str(floor(j*dt)) ' out of '
                          num2str(simulationTime) ' seconds']);
    % for every single node, refresh its position
    for k = 1 : N
        % update the spatial node distribution
        currentPixelX = ceil(nodes(k).curX/pixelSizeX);
        currentPixelY = ceil(nodes(k).curY/pixelSizeY);
        pdfPosition(currentPixelX, currentPixelY) =
            pdfPosition(currentPixelX, currentPixelY) + 1;
        % if the node is pausing at a point
        if nodes(k).pauseT > 0
            nodes(k).pauseT = nodes(k).pauseT - dt;
        % if the pause time has elapsed
        elseif nodes(k).pauseT <= 0 && nodes(k).pauseT > -1
            nodes(k).pauseT = -1; % the node starts
                                   % to be in movement
        % calculate the new transition length and update its
        % distribution
        nodes(k).transLength = minL + rand*(maxL-minL);
        lDivision = ceil(((nodes(k).transLength-
                           minL)/divisionLSize));
        pdfL(lDivision)=pdfL(lDivision) + 1;
        counterL = counterL + 1;

        % calculate the new speed
        nodes(k).speed = minV + rand*(maxV - minV);
        % update node speed distribution
        counterV = counterV + 1;
        vDivision = ceil(((nodes(k).speed-
                           minV)/divisionVSize));
        pdfV(vDivision)=pdfV(vDivision) + 1;
        nodes(k).epsilon = nodes(k).speed * dt;
        % calculate the new angle of movement
        nodes(k).speedAngle = 360 * rand;
        % update the transition time distribution

```

```

        tDivision =
ceil(((nodes(k).transLength)/(nodes(k).speed*divisionTSize)));
    pdfT(tDivision)=pdfT(tDivision) + 1;
    % if the node is in movement
elseif nodes(k).pauseT == -1
    % if the node is on one of the four boundaries of the
    % simulation area and has a direction of movement
    % towards the boundary, reflect it
    if nodes(k).curX > maxX-nodes(k).epsilon ||
        nodes(k).curX < nodes(k).epsilon,
        if nodes(k).curX > maxX - nodes(k).epsilon
            if nodes(k).speedAngle<90 ||
                nodes(k).speedAngle>270
                nodes(k).speedAngle = mod((180-
                    nodes(k).speedAngle), 360);
            end
        end
        if nodes(k).curX < nodes(k).epsilon
            if nodes(k).speedAngle>90 &&
                nodes(k).speedAngle<270
                nodes(k).speedAngle = mod((180-
                    nodes(k).speedAngle), 360);
            end
        end
    end
end
if nodes(k).curY > maxY-nodes(k).epsilon ||
    nodes(k).curY < nodes(k).epsilon,
    if nodes(k).curY > maxY - nodes(k).epsilon
        if nodes(k).speedAngle < 180
            nodes(k).speedAngle = mod((-
                nodes(k).speedAngle), 360);
        end
    end
    if nodes(k).curY < nodes(k).epsilon
        if nodes(k).speedAngle > 180
            nodes(k).speedAngle = mod((-
                nodes(k).speedAngle), 360);
        end
    end
end
end

% update node speed distribution
counterV = counterV + 1;
vDivision = ceil(((nodes(k).speed-
    minV)/divisionVSize));
pdfV(vDivision)=pdfV(vDivision) + 1;
% update the node's position
nodes(k).curX = nodes(k).curX + nodes(k).speed *
    cosd(nodes(k).speedAngle)* dt;
nodes(k).curY = nodes(k).curY + nodes(k).speed *
    sind(nodes(k).speedAngle)* dt;
nodes(k).transLength = nodes(k).transLength -
    nodes(k).speed * dt;
% if the node has completed its transition,
% initialize random pause time

```



```

        if nodes(k).transLength < nodes(k).epsilon
            nodes(k).pauseT = minPauseTime +
                rand*(maxPauseTime - minPauseTime);
        end
    end
end
end

% d i s p l a y   t h e   s i m u l a t i o n   R E S U L T S

% plotting the spatial node distribution
f2=figure(2);
set(f2, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfPosition = pdfPosition ./ (N*totalTimeSteps);
% normalizing the spatial node distribution
% (the integral underneath the pdf must be equal to 1)
temp = 0;
for i=1:numOfPixelsX
    for j=1:numOfPixelsY
        temp = temp + pdfPosition(i,j);
    end
end
temp = temp * pixelSizeX*pixelSizeY;
pdfPosition = pdfPosition ./ temp;
surf(X,Y,pdfPosition);
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Spatial Node Distribution');
axis([0 maxX 0 maxY 0 1.1*max(max(pdfPosition))]);
hText01 = annotation('textbox',[0.2 0.03 0 0] );
set(hText01,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText01, 'String', 'Maximum value (from simulation results):'
    num2str(max(max(pdfPosition))) ' m^{-2}');
hText02 = annotation('textbox',[0.2 0.085 0 0] );
set(hText02,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText02, 'String', ['Minimum value (from simulation results):'
    num2str(min(min(pdfPosition))) ' m^{-2}']);

% plotting the node speed distribution
f4=figure(4);
set(f4, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfV = pdfV/counterV;
meanV = 0;
temp=0; % for normalizing the speed distribution
for k=1:numOfSpeedDivisions
    meanV = meanV + pdfV(k)*V(k)*divisionVSize;
    temp = temp + pdfV(k);
end

```

```

temp = temp * divisionVSize;
pdfV = pdfV ./ temp;
meanV = meanV/temp;
plot(V, pdfV, 'LineWidth', 1, 'Color', 'b');
% plotting the theoretical node speed pdf curve and calculating
% its mean value
pdfVTh = 1./(V.*log(maxV/minV));
meanVTh = (maxV - minV) / log(maxV/minV);
hold on;
plot(V, pdfVTh, 'LineWidth', 1, 'LineStyle', '--', 'Color',
      'm');
xlabel('V (m/s)');
ylabel('pdf of node speed');
title('Node speed distribution');
hText1 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText1,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
      'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
      'w','Color', 'b' );
set(hText1, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
      num2str(meanV) ' m/s']);
hText2 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText2,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
      'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
      'w','Color', 'm');
set(hText2, 'String', ['Mean Value (theoretical): '
      num2str(meanVTh) ' m/s']);
grid on;
grid minor;

% plotting the transition length distribution
f5=figure(5);
set(f5, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
      0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfL = pdfL./counterL;
meanL = 0;
temp = 0;
for k=1:numOfTransitionLDivisions
    meanL = meanL + pdfL(k)*L(k)*divisionLSize;
    temp = temp + pdfL(k);
end
temp = temp * divisionLSize;
pdfL = pdfL ./ temp;
meanL = meanL / temp;
plot(L, pdfL,'LineWidth', 1, 'Color', 'b');
% plotting the theoretical transition length pdf curve and
% calculating its mean value
% we suppose that the simulation area is a square maxX = maxY
pdfLTh = zeros(1, numOfTransitionLDivisions);
pdfLTh(:) = 1./(maxL - minL);
hold on;
plot(L, pdfLTh, 'LineWidth', 1, 'LineStyle', '--', 'Color',
      'm');
meanLTh = (maxL + minL) / 2;
xlabel('L (m)');
ylabel('pdf of transition length');
title('Transition length distribution');

```

```

hText3 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText3,'FitBoxToText','on','VerticalAlignment','middle',
    'HorizontalAlignment','center','BackgroundColor',
    'w','Color','b');
set(hText3,'String',['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanL) ' m']);
hText4 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText4,'FitBoxToText','on','VerticalAlignment','middle',
    'HorizontalAlignment','center','BackgroundColor',
    'w','Color','m');
set(hText4,'String',['Mean Value (theoretical): '
    num2str(meanLTh) ' m']);
axis([minL maxL 0.3*pdfLTh(1) 1.8*pdfLTh(1)]);
grid on;
grid minor;

% plotting the transition time distribution
f6=figure(6);
set(f6,'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfT = pdfT./counterL;
meanT = 0;
temp = 0;
for k=1:numOfTransitionTDivisions
    meanT = meanT + pdfT(k)*T(k)*divisionTSize;
    temp = temp + pdfT(k);
end
temp = temp * divisionTSize;
pdfT = pdfT ./ temp;
meanT = meanT / temp;
plot(T,pdfT,'LineWidth',1);
% plotting the theoretical transition time pdf curve and
% calculating its mean value
% we suppose that the simulation area is a square maxX = maxY
pdfTTh = zeros(1,numOfTransitionTDivisions);
pdfTTh(:) = 1./(maxV-minV);
for k=1:numOfTransitionTDivisions
    % calculating the function inside the integral
    pdfLTh = zeros(1,numOfSpeedDivisions);
    for m=1:numOfSpeedDivisions
        temp = V(m)*T(k);
        n = ceil(temp/divisionLSize);
        if n<=numOfTransitionLDivisions
            pdfLTh(m) = 1./(maxL - minL);
        else
            pdfLTh(m) = 0;
        end
    end
    % calculating the integral
    product = V.*pdfLTh;
    pdfTTh(k)=pdfTTh(k) * sum(product');
    pdfTTh(k) = pdfTTh(k) * divisionVSize;
end
hold on;
plot(T,pdfTTh,'LineWidth',1,'LineStyle','--','Color',
    'm');

```

```

meanTTh = meanLTh / meanVTh;
xlabel('T (s)');
ylabel('pdf of transition time');
title('Transition time distribution');
hText5 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText5,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText5, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanT) ' s']);
hText6 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText6,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm');
set(hText6, 'String', ['Mean Value (theoretical): '
    num2str(meanTTh) ' s']);
grid on;
grid minor;

```

A.2.3. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε κυψελωτό σύστημα

```

% Program for simulation of the Random Waypoint Mobility model
% cellular system version (metrics for cellular system are measured)
% Authors : G. Cheimonidis & K. Palechoros
% Copyright 2008

function varargout = rwp_cellular_only(varargin)

    % p a r a m e t e r s   o f   t h e   m o d e l

    varargout = {0};
    % simulation area boundaries
    minX = 0;
    maxX = 1500;
    minY = 0;
    maxY = 1500;
    % pause time min and max values
    minPauseTime = 0;
    maxPauseTime = 0;
    % speed min and max values (in m/sec)
    minV = 15;
    maxV = 45;
    N = 50; % number of nodes
    simulationTime = 100000; % simulation time in seconds
    dt = 0.5; % time quantum of simulation
    totalTimeSteps = simulationTime/dt; % number of time steps for
        % simulation

    % maximum transition length and time
    maxL = sqrt((maxX-minX)^2 + (maxY-minY)^2);
    maxT = maxL/minV;

```

```

% Cellular parameters
numOfCellsX = 3; % numOfCellsX * numOfCellsY determines the
numOfCellsY = 3; % total number of cells in the simulation area
numOfCells = numOfCellsX * numOfCellsY;
cellXWidth = (maxX - minX)/numOfCellsX;
cellYWidth = (maxY - minY)/numOfCellsY;

% Sojourn time x-axis for sojourn time distribution
sojTDivision = 2;
sojTNumOfDivisions = 200/sojTDivision;
% array for storing the potential sojourn times
sojT = [sojTDivision/2 : sojTDivision : 200-sojTDivision/2];

% create and initialize the array of structures that represent
% the cells
cells = struct([]);
for j = 1 : numOfCellsY
    for i = 1 : numOfCellsX
        k = (j-1)*numOfCellsX + i; % the number of the cell
        cells(k).cellX = i; % the line of the cell
            % in the grid of cells
        cells(k).cellY = j; % the column of the cell
            % in the grid of cells
        % the location of the base station - center of the cell
        cells(k).cellXCenter = cellXWidth*(2*cells(k).cellX-1)/2;
        cells(k).cellYCenter = cellYWidth*(2*cells(k).cellY-1)/2;
        cells(k).countIn = 0; % number of times that a node
            % has entered the specific cell
        cells(k).countOut = 0; % number of times that a node
            % has left the specific cell
        cells(k).sojournCounter = 0; % total number of time steps
            % that all nodes stayed
            % inside the cell
        % distribution of the sojourn time in the specific cell
        cells(k).pdfSojT = zeros(1, sojTNumOfDivisions);
    end
end

% create and initialize the array of structures that represent
% the nodes
nodes = struct([]);
for i = 1 : N
    nodes(i).curX = rand*maxX;
    nodes(i).curY = rand*maxY;
    nodes(i).destX = 0;
    nodes(i).destY = 0;
    nodes(i).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(i).pauseT = minPauseTime + rand*(maxPauseTime -
        minPauseTime);
    nodes(i).speedAngle = 0;
    nodes(i).transLength = 0;
    nodes(i).epsilon = nodes(i).speed * dt;
    nodes(i).currentCell = numOfCellsY *
        (ceil(nodes(i).curX/cellXWidth) - 1) +
        ceil(nodes(i).curY/cellYWidth);
    nodes(i).nodeSojournCounter = 0; % counts the time that a n

```

```

                                % node stays inside a cell
end

scrsz = get(0, 'ScreenSize');
fl=figure(1); % for displaying the simulation (moving nodes)
set(fl, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
handleScatter = scatter([nodes.curX], [nodes.curY], 'filled','o',
    'b', 'XDataSource', '[nodes.curX]',
    'YDataSource', '[nodes.curY]');
axis([minX maxX minY maxY]);
axis square;
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Random Waypoint Mobility Model Simulation - Cellular
    System');

% draw the grid of the cells
for i=1:numOfCellsX - 1
    X = [i*cellXWidth i*cellXWidth];
    Y = [0 numOfCellsY*cellYWidth];
    hold on;
    plot(X,Y, '--r');
end
for j=1:numOfCellsY - 1
    X = [0 numOfCellsX*cellXWidth];
    Y = [j*cellYWidth j*cellYWidth];
    hold on;
    plot(X,Y, '--r');
end
% draw the base stations at the center of the cells
for k = 1:numOfCells
    hold on;
    scatter(cells(k).cellXCenter, cells(k).cellYCenter, 's',
        'r', 'filled', 'SizeData', 100);
    text(cells(k).cellXCenter-30, cells(k).cellYCenter+50,['Cell '
        num2str(k)]);
end

legend([num2str(N) ' nodes'], [num2str(numOfCells) ' cells'],-1);
hText = annotation('textbox',[0.08 0.05 0 0]);
set(hText, 'FitBoxToText', 'on', 'BackgroundColor', 'y',
    'VerticalAlignment', 'middle', 'HorizontalAlignment','center');

% s i m u l a t i o n   l o o p
for j = 1 : totalTimeSteps
    % pause(dt/1000);
    % draw the new position of the nodes
    refreshdata(handleScatter, 'caller');
    drawnow;
    set(hText, 'String', [num2str(floor(j*dt)) ' out of '
        num2str(simulationTime) ' seconds']);
    % for every single node, refresh its position
    for k = 1 : N
        % update the node sojourn counter

```

```

nodes(k).nodeSojournCounter = nodes(k).nodeSojournCounter
                             + 1;
% if the node is pausing at the waypoint
if nodes(k).pauseT > 0
    nodes(k).pauseT = nodes(k).pauseT - dt;
% if the pause time has elapsed
elseif nodes(k).pauseT <= 0 && nodes(k).pauseT > -1
    nodes(k).pauseT = -1; % the node starts to be in
                          % movement
    % calculate position of the next waypoint
    nodes(k).destX = rand*maxX;
    nodes(k).destY = rand*maxY;
    % calculate the new speed of the node
    nodes(k).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(k).epsilon = nodes(k).speed * dt;

    % calculate the new direction of node's movement
    nodes(k).speedAngle = atand((nodes(k).destY-
nodes(k).curY)/(nodes(k).destX-nodes(k).curX));
    if (nodes(k).destX - nodes(k).curX) < 0
        nodes(k).speedAngle = nodes(k).speedAngle + 180;
    end
% if the node is in movement
elseif nodes(k).pauseT == -1
    % update the node's position
    nodes(k).curX = nodes(k).curX + nodes(k).speed *
                    cosd(nodes(k).speedAngle)* dt;
    nodes(k).curY = nodes(k).curY + nodes(k).speed *
                    sind(nodes(k).speedAngle)* dt;
    distance = ((nodes(k).destX - nodes(k).curX)^2 +
                (nodes(k).destY - nodes(k).curY)^2)^0.5;
    % if the node has reached its waypoint (destination),
    % initialize random pause time
    if distance < nodes(k).epsilon
        nodes(k).pauseT = minPauseTime +
                        rand*(maxPauseTime - minPauseTime);
    end
    % update the currentCell field of the node and
    % the countIn and countOut fields of the cells if
    % needed (if the node has changed cell)
    newCell = numOfCellsY *
              (ceil(nodes(k).curX/cellXWidth) - 1) +
              ceil(nodes(k).curY/cellYWidth);
    if newCell ~= nodes(k).currentCell % if the node has
                                        % changed cell
        cells(nodes(k).currentCell).countOut =
            cells(nodes(k).currentCell).countOut + 1;
        cells(newCell).countIn = cells(newCell).countIn + 1;
        % update the cell sojourn counter
        cells(nodes(k).currentCell).sojournCounter =
            cells(nodes(k).currentCell).sojournCounter
            + nodes(k).nodeSojournCounter;
        % update the pdf of the sojourn time in the
        % specific cell
        sojTimeInterval =
            ceil((nodes(k).nodeSojournCounter)*dt)/sojTDivision);
        cells(nodes(k).currentCell).pdfSojT(sojTimeInterval) =

```

```

        cells(nodes(k).currentCell).pdfSojT(sojTimeInterval)+1;
        nodes(k).currentCell = newCell;
        nodes(k).nodeSojournCounter = 0;
    end

    end

end

% plotting the mean (per node) sojourn time in each cell
f2=figure(2);
set(f2, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
m = 1:numOfCells;
meanSojournTime = [cells.sojournCounter]' ./ [cells.countOut]';
meanSojournTime = meanSojournTime * dt;
bar(m, meanSojournTime);
% calculate the average sojourn time (by averaging over all of
% the cells)

avgSojournTime = sum(meanSojournTime)./numOfCells;
xlabel('Cell number');
ylabel('Mean sojourn time of a node (sec)');
title('Mean Sojourn time of a node (sec) in each cell');
axis tight;
hText0 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText0,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText0, 'String', ['Average (over all of the cells) sojourn
    time: ' num2str(avgSojournTime) ' s']);

% plotting in/out rate in each cell
f3=figure(3);
set(f3, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
cellInRate = [cells.countIn]';
cellInRate = cellInRate ./ simulationTime;
cellOutRate = [cells.countOut]';
cellOutRate = cellOutRate ./ simulationTime;
cellRate = [cellInRate cellOutRate];
bar(m, cellRate);
% calculate the average cell change rate - handover rate per node
handoverRate = sum(cellOutRate)./N;
% calculate the theoretical cell change rate handover rate per
% node
handoverRateTh = 0;
for i1=1:numOfCellsX
    for j1=1:numOfCellsY
        for i2=1:numOfCellsX
            for j2=1:numOfCellsY
                handoverRateTh = handoverRateTh + abs(i1-i2) +
                    abs(j1-j2);
            end
        end
    end
end

```



```

    end
end
handoverRateTh = handoverRateTh / (numOfCellsX^2*numOfCellsY^2);
meanLTh = (maxX/3)* ( (2+sqrt(2))/5 + acosh(sqrt(2)) );
meanVTh = (maxV - minV) / log(maxV/minV);
meanTTh = meanLTh / meanVTh;
handoverRateTh = handoverRateTh / meanTTh;
hText1 = annotation('textbox',[0.22 0.025 0 0] );
set(hText1,'FitBoxToText','on','VerticalAlignment','middle',
    'HorizontalAlignment','center','BackgroundColor',
    'w','Color','b' );
set(hText1,'String',['Average per node cell change rate
(simulation): ' num2str(handoverRate) ' cell changes/sec']);
hText2 = annotation('textbox',[0.70 0.025 0 0] );
set(hText2,'FitBoxToText','on','VerticalAlignment','middle',
    'HorizontalAlignment','center','BackgroundColor',
    'w','Color','m' );
set(hText2,'String',['Average per node cell change rate
(theoretical): ' num2str(handoverRateTh) ' cell changes/sec']);
xlabel('Cell number');
ylabel('In/Out Rate (arrivals - departures/sec)');
title('Rate of arrivals/departures at/from each cell');
legend('In Rate (arrivals/sec)', 'Out Rate (departures/sec)', - 1);
axis tight;

% plotting the sojourn time distribution in each cell
f = zeros(1,numOfCells);
for k=1:numOfCells
    f(k) = figure(k+3);
    set(f(k), 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
        0.8*scrsz(4)]);
    clf reset;
    bar(sojT,cells(k).pdfSojT/max([1 cells(k).countOut]));
    xlabel('Sojourn time (sec)');
    ylabel('% Probability in each time interval');
    title(['Sojourn time distribution in cell ' num2str(k)]);
    axis tight;
end
end

```

A.2.4. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε κυβελωτό σύστημα

```

% Program for simulation of the Random Direction Mobility model
% cellular system version (metrics for cellular system are measured)
% Authors : G. Cheimonidis & K. Palechoros
% Copyright 2008

```

```
function varargout = rd_cellular_only(varargin)
```

```
    % p a r a m e t e r s   o f   t h e   m o d e l
```

```
    varargout = {0};
```

```

% simulation area boundaries
minX = 0;
maxX = 1500;
minY = 0;
maxY = 1500;
% pause time min and max values
minPauseTime = 0;
maxPauseTime = 0;
% speed min and max values (in m/sec)
minV = 15;
maxV = 45;
N = 50; % number of nodes
simulationTime = 100000; % simulation time in seconds
dt = 0.5; % time quantum of simulation
totalTimeSteps = simulationTime/dt; % number of time steps
% for simulation

% transition length min and max values
minL = 0;
maxL = sqrt((maxX-minX)^2 + (maxY-minY)^2);
% maximum transition time
maxT = maxL/minV;

% Cellular parameters
numOfCellsX = 3; % numOfCellsX * numOfCellsY determines the
numOfCellsY = 3; % total number of cells in the simulation area
numOfCells = numOfCellsX * numOfCellsY;
cellXWidth = (maxX - minX)/numOfCellsX;
cellYWidth = (maxY - minY)/numOfCellsY;

% Sojourn time x-axis for sojourn time distribution
sojTDivision = 2;
sojTNumOfDivisions = 200/sojTDivision;
% array for storing the potential sojourn times
sojT = [sojTDivision/2 : sojTDivision : 200-sojTDivision/2];

% create and initialize the array of structures that represent
% the cells
cells = struct([]);
for j = 1 : numOfCellsY
    for i = 1 : numOfCellsX
        k = (j-1)*numOfCellsY + i; % the number of the cell
        cells(k).cellX = i; % the line of the cell
        % in the grid of cells
        cells(k).cellY = j; % the column of the cell
        % in the grid of cells
        % the location of the base station - center of the cell
        cells(k).cellXCenter = cellXWidth*(2*cells(k).cellX-1)/2;
        cells(k).cellYCenter = cellYWidth*(2*cells(k).cellY-1)/2;
        cells(k).countIn = 0; % number of times that a node
        % has entered the specific cell
        cells(k).countOut = 0; % number of times that a node
        % has left the specific cell
        cells(k).sojournCounter = 0; % total number of time steps
        % that all nodes stayed
        % inside the cell
        % distribution of the sojourn time in the specific cell
    end
end

```

```

        cells(k).pdfSojT = zeros(1, sojTNumOfDivisions);
    end
end

% create and initialize the array of structures that represent
% the nodes
nodes = struct([]);
for i = 1 : N
    nodes(i).curX = rand*maxX;
    nodes(i).curY = rand*maxY;
    nodes(i).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(i).pauseT = minPauseTime + rand*(maxPauseTime -
                                                minPauseTime);

    nodes(i).speedAngle = 0;
    nodes(i).transLength = 0;
    nodes(i).epsilon = nodes(i).speed * dt;
    nodes(i).currentCell = numOfCellsY *
        (ceil(nodes(i).curX/cellXWidth) - 1) +
        ceil(nodes(i).curY/cellyWidth);
    nodes(i).nodeSojournCounter = 0;
end

scrsz = get(0,'ScreenSize');
f1=figure(1); % for displaying the simulation (moving nodes)
set(f1, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
handleScatter = scatter([nodes.curX], [nodes.curY], 'filled','o',
                        'b','XDataSource', '[nodes.curX]',
                        'YDataSource', '[nodes.curY]');

axis([minX maxX minY maxY]);
axis square;
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Random Direction Mobility Model Simulation - Cellular
      System');

% draw the grid of the cells
for i=1:numOfCellsX - 1
    X = [i*cellXWidth i*cellXWidth];
    Y = [0 numOfCellsY*cellyWidth];
    hold on;
    plot(X,Y, '--r');
end
for j=1:numOfCellsY - 1
    X = [0 numOfCellsX*cellXWidth];
    Y = [j*cellyWidth j*cellyWidth];
    hold on;
    plot(X,Y, '--r');
end
% draw the base stations at the center of the cells
for k = 1:numOfCells
    hold on;
    scatter(cells(k).cellXCenter, cells(k).cellyCenter, 's',
            'r', 'filled', 'SizeData', 100);
    text(cells(k).cellXCenter-30, cells(k).cellyCenter+50,['Cell '

```

```

        num2str(k)]);
end

legend([num2str(N) ' nodes'],[num2str(numOfCells) ' cells'], - 1);
hText = annotation('textbox',[0.08 0.05 0 0]);
set(hText, 'FitBoxToText', 'on', 'BackgroundColor', 'y',
      'VerticalAlignment', 'middle', 'HorizontalAlignment', 'center');

% s i m u l a t i o n   l o o p
for j = 1 : totalTimeSteps
    % pause(dt/1000);
    % draw the new position of the nodes
    refreshdata(handleScatter, 'caller');
    drawnow;
    set(hText, 'String', [num2str(floor(j*dt)) ' out of '
        num2str(simulationTime) ' seconds']);
    % for every single node, refresh its position
    for k = 1 : N
        % update the node sojourn counter
        nodes(k).nodeSojournCounter = nodes(k).nodeSojournCounter
            + 1;
        % if the node is pausing at point
        if nodes(k).pauseT > 0
            nodes(k).pauseT = nodes(k).pauseT - dt;
        % if the pause time has elapsed
        elseif nodes(k).pauseT <= 0 && nodes(k).pauseT > -1
            nodes(k).pauseT = -1; % the node starts
                % to be in movement
            % calculate the new transition length
            nodes(k).transLength = minL + rand*(maxL-minL);
            % calculate the new speed of the node
            nodes(k).speed = minV + rand*(maxV - minV);
            nodes(k).epsilon = nodes(k).speed * dt;
            % calculate the new angle of node's movement
            nodes(k).speedAngle = 360 * rand;
        % if the node is in movement
        elseif nodes(k).pauseT == -1

            % if the node is on one of the four boundaries of the
            % simulation area and has a direction of movement
            % towards the boundary, reflect it
            if nodes(k).curX > maxX-nodes(k).epsilon ||
                nodes(k).curX < nodes(k).epsilon,
                if nodes(k).curX > maxX - nodes(k).epsilon
                    if nodes(k).speedAngle<90 ||
                        nodes(k).speedAngle>270
                        nodes(k).speedAngle = mod((180-
                            nodes(k).speedAngle), 360);
                    end
                end
            if nodes(k).curX < nodes(k).epsilon
                if nodes(k).speedAngle>90 &&
                    nodes(k).speedAngle<270
                    nodes(k).speedAngle = mod((180-
                        nodes(k).speedAngle), 360);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
if nodes(k).curY > maxY-nodes(k).epsilon ||
nodes(k).curY < nodes(k).epsilon,
    if nodes(k).curY > maxY - nodes(k).epsilon
        if nodes(k).speedAngle < 180
            nodes(k).speedAngle = mod((-
                nodes(k).speedAngle), 360);
        end
    end
    if nodes(k).curY < nodes(k).epsilon
        if nodes(k).speedAngle > 180
            nodes(k).speedAngle = mod((-
                nodes(k).speedAngle), 360);
        end
    end
end
end

% update the node's position
nodes(k).curX = nodes(k).curX + nodes(k).speed *
    cosd(nodes(k).speedAngle)* dt;
nodes(k).curY = nodes(k).curY + nodes(k).speed *
    sind(nodes(k).speedAngle)* dt;
nodes(k).transLength = nodes(k).transLength -
    nodes(k).speed * dt;

% if the node has completed its transition, then
% initialize random pause time
if nodes(k).transLength < nodes(k).epsilon
    nodes(k).pauseT = minPauseTime +
        rand*(maxPauseTime - minPauseTime);
end

% update the currentCell field of the node and
% the countIn and countOut fields of the cells if
% needed (if the node has changed cell)
newCell = numOfCellsY *
    (ceil(nodes(k).curX/cellXWidth) - 1) +...
    ceil(nodes(k).curY/cellYWidth);
if newCell ~= nodes(k).currentCell % if the node has
    % changed cell
    cells(nodes(k).currentCell).countOut =
        cells(nodes(k).currentCell).countOut + 1;
    cells(newCell).countIn = cells(newCell).countIn+1;

    % update the cell sojourn counter
    cells(nodes(k).currentCell).sojournCounter =
        cells(nodes(k).currentCell).sojournCounter
        + nodes(k).nodeSojournCounter;
    % update the pdf of the sojourn time in the
    % specific cell
    sojTimeInterval =
    ceil(((nodes(k).nodeSojournCounter)*dt)/sojTDivision);
    cells(nodes(k).currentCell).pdfSojT(sojTimeInterval) =
    cells(nodes(k).currentCell).pdfSojT(sojTimeInterval) + 1;
    nodes(k).currentCell = newCell;
    nodes(k).nodeSojournCounter = 0;
end
end

```

```

        end
    end
end

% plotting the mean (per node) sojourn time in each cell
f2=figure(2);
set(f2, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
m = 1:numOfCells;
meanSojournTime = [cells.sojournCounter]' ./ [cells.countOut]';
meanSojournTime = meanSojournTime * dt;
bar(m, meanSojournTime);
% calculate the average sojourn time (by averaging over all of
% the cells)

avgSojournTime = sum(meanSojournTime)./numOfCells;
xlabel('Cell number');
ylabel('Mean sojourn time of a node (sec)');
title('Mean Sojourn time of a node (sec) in each cell');
axis tight;
hText0 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText0,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText0, 'String', ['Average (over all of the cells) sojourn
    time: ' num2str(avgSojournTime) ' s']);

% plotting in/out rate in each cell
f3=figure(3);
set(f3, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
cellInRate = [cells.countIn]';
cellInRate = cellInRate ./ simulationTime;
cellOutRate = [cells.countOut]';
cellOutRate = cellOutRate ./ simulationTime;
cellRate = [cellInRate cellOutRate];
bar(m, cellRate);
% calculate the average cell change rate - handover rate per node
handoverRate = sum(cellOutRate)./N;
% calculate the theoretical cell change rate handover rate per
% node
handoverRateTh = 0;
for i1=1:numOfCellsX
    for j1=1:numOfCellsY
        for i2=1:numOfCellsX
            for j2=1:numOfCellsY
                handoverRateTh = handoverRateTh + abs(i1-i2) +
                    abs(j1-j2);
            end
        end
    end
end
handoverRateTh = handoverRateTh /(numOfCellsX^2*numOfCellsY^2);
meanLTh = (maxX/3)*( (2+sqrt(2))/5 + acosh(sqrt(2)) );
meanVTh = (maxV - minV) / log(maxV/minV);

```

```

meanTTh = meanLTh / meanVTh;
handoverRateTh = handoverRateTh / meanTTh;
hText1 = annotation('textbox',[0.22 0.025 0 0] );
set(hText1,'FitBoxToText','on','VerticalAlignment','middle',
    'HorizontalAlignment','center','BackgroundColor',
    'w','Color','b' );
set(hText1,'String',['Average per node cell change rate
(simulation): ' num2str(handoverRate) ' cell changes/sec']);
hText2 = annotation('textbox',[0.70 0.025 0 0] );
set(hText2,'FitBoxToText','on','VerticalAlignment','middle',
    'HorizontalAlignment','center','BackgroundColor',
    'w','Color','m' );
set(hText2,'String',['Average per node cell change rate
(theoretical): ' num2str(handoverRateTh) ' cell changes/sec']);
xlabel('Cell number');
ylabel('In/Out Rate (arrivals - departures/sec)');
title('Rate of arrivals/departures at/from each cell');
legend('In Rate (arrivals/sec)', 'Out Rate (departures/sec)', - 1);
axis tight;

```

A.2.5. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε ad hoc δίκτυο (για μονοπάτια 2 αλμάτων)

```

% Program for simulation of the Random Waypoint Mobility model
% adhoc version (link and 2 hop path duration and availability)
% Authors : G. Cheimonidis & K. Palechoros
% Copyright 2008

function varargout = rwp_adhoc_path2(varargin)

    % parameters of the model

    varargout = {0};
    % simulation area boundaries
    minX = 0;
    maxX = 1500;
    minY = 0;
    maxY = 1500;
    % pause time min and max values
    minPauseTime = 0;
    maxPauseTime = 0;
    % speed min and max values (in m/sec)
    minV = 20;
    maxV = 20;
    N = 25; % number of nodes
    simulationTime = 150000; % simulation time in seconds
    dt = 1; % time quantum of simulation
    totalTimeSteps = simulationTime/dt; % number of time steps for
    % simulation
    % maximum transition length and time
    maxL = sqrt((maxX-minX)^2 + (maxY-minY)^2);
    maxT = maxL/minV;

```

```

% create and initialize the array of structures that represent
% the nodes
nodes = struct([]);
for i = 1 : N
    nodes(i).curX = rand*maxX;
    nodes(i).curY = rand*maxY;
    nodes(i).destX = 0;
    nodes(i).destY = 0;
    nodes(i).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(i).pauseT = minPauseTime + rand*(maxPauseTime -
                                                minPauseTime);

    nodes(i).speedAngle = 0;
    nodes(i).transLength = 0;
    nodes(i).epsilon = nodes(i).speed * dt;
end

% link availability implementation variables
linkStatus = zeros(N); % matrix for storing the current link
                    % status between each pair of nodes
                    % (1=link, 0=no link).
previousLinkStatus = zeros(N); % matrix for storing the previous
                    % link status between each pair
                    % of nodes (1=link, 0=no link).
linkDuration = zeros(N); % matrix for storing the current link
                    % duration of each link (how much time
                    % the link is up).
linkHandles = zeros(N); % matrix for storing the handles of the
                    % plots representing the links
maxLinkDist = 400; % maximum distance between two connected
                    % nodes = the transmission range of each node

% path availability implementation variables
pathStatus = 0; % status of the 2-hop path (1=path, 0=no path)
intermediateNode = 0;
pathDuration = 0; % the current duration of the path
                    % (how much time the path is up)

scrsz = get(0, 'ScreenSize');
f1=figure(1); % for displaying the simulation (moving nodes)
set(f1, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
                    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;

NodesCurX = [nodes.curX];
NodesCurY = [nodes.curY];

% scatter of the intermediate nodes
handleScatter1 = scatter(NodesCurX(3:N), NodesCurY(3:N),
                        'filled','o', 'g', 'XDataSource',
                        'NodesCurX(3:N)', 'YDataSource',
                        'NodesCurY(3:N)');

hold on;

```



```

% scatter of the end nodes
handleScatter2 = scatter(NodesCurX(1:2), NodesCurY(1:2),
                        'filled','o', 'r', 'XDataSource',
                        'NodesCurX(1:2)', 'YDataSource',
                        'NodesCurY(1:2)');

axis([minX maxX minY maxY]);
axis square;
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Random Waypoint Mobility Model Simulation - Ad hoc
      Network');

% arrays for creating the link duration pdf
maxLinkDuration = 2000;
linkDurationDivSize = 1;
numOfDurationDivisions = maxLinkDuration/linkDurationDivSize;
LinkDuration = [linkDurationDivSize/2 : linkDurationDivSize :
                maxLinkDuration - linkDurationDivSize/2];
pdfLinkDuration = zeros(1, numOfDurationDivisions);
numOfLinksCompleted = 0; % the number of links created
                        % and then broken

% arrays for creating the link availability
% link availability = the probability that a link is up
% as a function of time t after its creation
maxLinkAvail = 2000;
linkAvailDivSize = 1;
numOfAvailDivisions = maxLinkAvail/linkAvailDivSize;
AvailTime = [linkAvailDivSize/2 : linkAvailDivSize : maxLinkAvail
             - linkAvailDivSize/2];
LinkAvail = zeros(1, numOfAvailDivisions);
numOfLinksCreated = 0;

% arrays for creating the path duration pdf
% two hop paths are examined
maxPathDuration = 2000;
pathDurationDivSize = 1;
numOfPathDurationDivisions = maxPathDuration/pathDurationDivSize;
PathDuration = [pathDurationDivSize/2 : pathDurationDivSize :
                maxPathDuration - pathDurationDivSize/2];
pdfPathDuration = zeros(1, numOfPathDurationDivisions);
numOfPathsCompleted = 0; % the number of paths created
                        % and then broken

% arrays for creating the path availability
% path availability = the probability that a path is up
% as a function of time t after its creation
maxPathAvail = 2000;
pathAvailDivSize = 1;
numOfPathAvailDivisions = maxPathAvail/pathAvailDivSize;
PathAvailTime = [pathAvailDivSize/2 : pathAvailDivSize :
                 maxPathAvail - pathAvailDivSize/2];
PathAvail = zeros(1, numOfPathAvailDivisions);
numOfPathsCreated = 0;

% path points (a two hop path has three points)

```

```

pathPointsX = zeros(1,3);
pathPointsY = zeros(1,3);

% draw the initial links
for k = 1 : N
    for b = k+1 : N
        hold on;
        previousLinkStatus(k,b) = linkStatus(k,b);
        dist = sqrt((nodes(k).curX - nodes(b).curX)^2 +
                    (nodes(k).curY - nodes(b).curY)^2);
        if dist <= maxLinkDist
            numOfLinksCreated = numOfLinksCreated + 1;
            linkStatus(k,b) = 1;
            linkHandles(k,b) = plot([nodes(k).curX,
                                     nodes(b).curX], [nodes(k).curY,
                                                         nodes(b).curY], '-b',
                                     'XDataSource', '[nodes(k).curX,
                                                         nodes(b).curX]', 'YDataSource',
                                                         '[nodes(k).curY, nodes(b).curY]');
        else
            linkStatus(k,b) = 0;
            linkHandles(k,b) = plot([nodes(k).curX,
                                     nodes(b).curX], [nodes(k).curY,
                                                         nodes(b).curY], '', 'XDataSource',
                                     '[nodes(k).curX, nodes(b).curX]',
                                     'YDataSource', '[nodes(k).curY,
                                                         nodes(b).curY]');
            set(linkHandles(k,b), 'LineStyle', 'none');
        end
    end
end

legend([num2str(N-2) ' intermediate nodes'], ['2 end nodes'], -1);
hText = annotation('textbox',[0.15 0.05 0 0], 'FitBoxToText','on');
set(hText, 'BackgroundColor', 'y', 'VerticalAlignment', 'middle',
        'HorizontalAlignment', 'center');
hold on;
pathHandle = plot(pathPointsX, pathPointsY, '-r', 'LineStyle',
                  'none', 'XDataSource', 'pathPointsX',
                  'YDataSource', 'pathPointsY');

% simulation loop
for j = 1 : totalTimeSteps
    % pause(dt/1000);
    refreshdata(handleScatter1, 'caller');
    refreshdata(handleScatter2, 'caller');
    set(hText, 'String', [num2str(floor(j*dt)) ' out of '
                        num2str(simulationTime) ' seconds']);
    drawnow;

    NodesCurX = [nodes.curX];
    NodesCurY = [nodes.curY];

    % for every single node, refresh its position and the links
    % between this node and the other nodes
    for k = 1 : N

```

```

% refresh the links between this node and the other nodes
for b = k+1 : N
    previousLinkStatus(k,b) = linkStatus(k,b);
    dist = sqrt((nodes(k).curX - nodes(b).curX)^2 +
                (nodes(k).curY - nodes(b).curY)^2);
    if dist <= maxLinkDist

        if linkStatus(k,b) == 1 % if the link already
                                % exists
            linkDuration(k,b) = linkDuration(k,b) + dt;
            availDiv =
                ceil(linkDuration(k,b)/linkAvailDivSize);
            LinkAvail(availDiv)=LinkAvail(availDiv) + 1;
        else
            numOfLinksCreated = numOfLinksCreated + 1;
            linkStatus(k,b) = 1;
            set(linkHandles(k,b), 'LineStyle', '-');
        end
        refreshdata(linkHandles(k,b), 'caller');
    else
        if linkStatus(k,b) == 1 % if there was a link
                                % between this pair
                                % (which has just broken)
            % update the pdf of the link duration
            durationDiv = max([1,
                               ceil(linkDuration(k,b)/linkDurationDivSize)]);
            pdfLinkDuration(durationDiv) =
                pdfLinkDuration(durationDiv) + 1;
            numOfLinksCompleted = numOfLinksCompleted + 1;
            linkStatus(k,b) = 0;
            linkDuration(k,b) = 0;
            set(linkHandles(k, b), 'LineStyle', 'none');
            refreshdata(linkHandles(k, b), 'caller');
        end
    end
end

% if the node is pausing at the waypoint
if nodes(k).pauseT > 0
    nodes(k).pauseT = nodes(k).pauseT - dt;
% if the pause time has elapsed
elseif nodes(k).pauseT <= 0 && nodes(k).pauseT > -1
    nodes(k).pauseT = -1; % the node starts
                          % to be in movement
    % calculate position of the next waypoint
    nodes(k).destX = rand*maxX;
    nodes(k).destY = rand*maxY;
    % calculate the new speed of the node
    nodes(k).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(k).epsilon = nodes(k).speed * dt;
    % calculate the new direction of node's movement
    nodes(k).speedAngle = atand((nodes(k).destY-
                                nodes(k).curY)/(nodes(k).destX-nodes(k).curX));
if (nodes(k).destX - nodes(k).curX) < 0
    nodes(k).speedAngle = nodes(k).speedAngle + 180;
end

```

```

    % if the node is in movement
elseif nodes(k).pauseT == -1
    % update the node's position
    nodes(k).curX = nodes(k).curX + nodes(k).speed *
        cosd(nodes(k).speedAngle)* dt;
    nodes(k).curY = nodes(k).curY + nodes(k).speed *
        sind(nodes(k).speedAngle)* dt;
    distance = ((nodes(k).destX - nodes(k).curX)^2 +
        (nodes(k).destY - nodes(k).curY)^2)^0.5;
    % if the node has reached its waypoint (destination),
    % initialize random pause time
    if distance < nodes(k).epsilon
        nodes(k).pauseT = minPauseTime +
            rand*(maxPauseTime - minPauseTime);
    end
end
end

% find a new path or update the path statistics
if pathStatus == 1 % if there was a path
    if linkStatus(1, intermediateNode)==1 && linkStatus(2,
        intermediateNode)== 1 % if it still exists
        % if the path still exists
        pathDuration = pathDuration + dt;
        pathAvailDiv = ceil(pathDuration/pathAvailDivSize);
        PathAvail(pathAvailDiv)=PathAvail(pathAvailDiv) + 1;
        pathPointsX(1) = NodesCurX(1);
        pathPointsX(3) = NodesCurX(2);
        pathPointsX(2) = NodesCurX(intermediateNode);
        pathPointsY(1) = NodesCurY(1);
        pathPointsY(3) = NodesCurY(2);
        pathPointsY(2) = NodesCurY(intermediateNode);
        refreshdata(pathHandle, 'caller');
    else
        % if the path has just broken
        pathDurationDiv = max([1,
            ceil(pathDuration/pathDurationDivSize)]);
        pdfPathDuration(pathDurationDiv) =
            pdfPathDuration(pathDurationDiv) + 1;
        numOfPathsCompleted = numOfPathsCompleted + 1;
        pathStatus = 0;
        pathDuration = 0;
        set(pathHandle, 'LineStyle', 'none');
    end
else % search for a new path
    for h=3:N
        if linkStatus(1,h)==1 && linkStatus(2,h)==1 &&
            (previousLinkStatus(1,h)==0
            || previousLinkStatus(2,h)==0)
            % if a path has just been created
            % (one or more of the links is/are new)
            pathStatus = 1;
            intermediateNode = h;
            numOfPathsCreated = numOfPathsCreated + 1;
            pathPointsX(1) = NodesCurX(1);

```

```

        pathPointsX(3) = NodesCurX(2);
        pathPointsX(2) = NodesCurX(intermediateNode);
        pathPointsY(1) = NodesCurY(1);
        pathPointsY(3) = NodesCurY(2);
        pathPointsY(2) = NodesCurY(intermediateNode);
        refreshdata(pathHandle, 'caller');
        set(pathHandle, 'LineStyle', '-', 'LineWidth', 2);
        break
    end
end
end

end

% display the simulation RESULTS

% plotting the link duration distribution
f2=figure(2);
set(f2, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfLinkDuration = pdfLinkDuration/numOfLinksCompleted;
meanLinkDuration = 0;
temp = 0; % for normalizing the link duration
          distribution
for k=1:numOfDurationDivisions
    meanLinkDuration = meanLinkDuration +
        pdfLinkDuration(k)*LinkDuration(k)*linkDurationDivSize;
    temp = temp + pdfLinkDuration(k);
end
temp = temp * linkDurationDivSize;
pdfLinkDuration = pdfLinkDuration ./ temp;
meanLinkDuration = meanLinkDuration / temp;
plot(LinkDuration , pdfLinkDuration);
% plotting the theoretical link duration distribution
LinkDurationTh = [linkDurationDivSize/4 : linkDurationDivSize/2 :
    maxLinkDuration - linkDurationDivSize/4];
pdfLinkDurationTh = zeros(1, 2*numOfDurationDivisions);
pdfLinkDurationTh = (maxLinkDist^2 + minV^2 .* LinkDurationTh.^2)
    ./ (2 * maxLinkDist * minV.*LinkDurationTh.^2);
pdfLinkDurationTh = pdfLinkDurationTh .* ...
    log((maxLinkDist+ minV .* LinkDurationTh)./ ...
    sqrt(abs(maxLinkDist^2 - minV^2.* ...
    LinkDurationTh.^2))) - 1./(2.*LinkDurationTh);
hold on;
plot(LinkDurationTh , pdfLinkDurationTh, 'LineWidth', 1 ,
    'LineStyle', '--', 'Color', 'm');
meanLinkDurationTh =
    sum(LinkDurationTh.*pdfLinkDurationTh)*linkDurationDivSize/2;
axis([0 100 0 1.2*max([max(pdfLinkDuration,[],1) ...
    max(pdfLinkDurationTh,[],1)])]);
hText1 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText1,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText1, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '

```

```

        num2str(meanLinkDuration) ' s']);
hText2 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText2,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm' );
set(hText2, 'String', ['Mean Value (theoretical): '
    num2str(meanLinkDurationTh) ' s']);
xlabel('Link Duration (s)');
ylabel('pdf of link duration');
title('Link Duration distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the link availability
f3=figure(3);
set(f3, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
LinkAvail = LinkAvail/(numOfLinksCreated*linkDurationDivSize/dt);
plot(AvailTime , LinkAvail);
% plotting the theoretical link availability
AvailTimeTh = [linkAvailDivSize/4 : linkAvailDivSize/2 :
    maxLinkAvail - linkAvailDivSize/4];
LinkAvailTh = zeros(1, 2*numOfAvailDivisions);
for m=1:2*numOfAvailDivisions
    LinkAvailTh(m) = sum(pdfLinkDurationTh(m: ...
        2*numOfDurationDivisions))*linkDurationDivSize/2;
end
hold on;
plot(AvailTimeTh , LinkAvailTh,'LineWidth', 1,'LineStyle', '-',
    'Color', 'm');
axis([0 100 0 1.2*max(LinkAvail)]);
xlabel('Link time (s)');
ylabel('link availability');
title('Link Availability distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the path duration distribution
f4=figure(4); % for displaying statistical results
set(f4, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfPathDuration = pdfPathDuration/numOfPathsCompleted;
meanPathDuration = 0;
temp = 0; % for normalizing the path duration distribution
for k=1:numOfPathDurationDivisions
    meanPathDuration = meanPathDuration +
        pdfPathDuration(k)*PathDuration(k)*pathDurationDivSize;
    temp = temp + pdfPathDuration(k);
end
temp = temp * pathDurationDivSize;
pdfPathDuration = pdfPathDuration ./ temp;
meanPathDuration = meanPathDuration / temp;
plot(PathDuration , pdfPathDuration);
axis([0 100 0 1.2*max(pdfPathDuration)]);

```

```

hText3 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText3,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm' );
set(hText3, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanPathDuration) ' s']);
xlabel('Path Duration (s)');
ylabel('pdf of path duration');
title('Path Duration distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the path availability
f5=figure(5);
set(f5, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
PathAvail = PathAvail/(numOfPathsCreated*pathDurationDivSize/dt);
plot(PathAvailTime , PathAvail);
axis([0 100 0 1.2*max(PathAvail)]);
xlabel('Path time (s)');
ylabel('path availability');
title('Path Availability distribution');
grid on;
grid minor;

```

A.2.6. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε ad hoc δίκτυο (για μονοπάτια δύο αλμάτων)

```

% Program for simulation of the Random Direction Mobility model
% adhoc version (link and 2 hop path duration and availability)
% Authors : G. Cheimonidis & K. Palechoros
% Copyright 2008

```

```

function varargout = rd_adhoc_path2(varargin)

% parameters of the model

varargout = {0};
% simulation area boundaries
minX = 0;
maxX = 1500;
minY = 0;
maxY = 1500;
% pause time min and max values
minPauseTime = 0;
maxPauseTime = 0;
% speed min and max values (in m/sec)
minV = 20;
maxV = 20;
N = 25; % number of nodes
simulationTime = 150000; % simulation time in seconds
dt = 1; % time quantum of simulation

```

```

totalTimeSteps = simulationTime/dt; % number of time steps for
                                     % simulation

% transition length min and max values
minL = 0;
maxL = sqrt((maxX-minX)^2 + (maxY-minY)^2);
% maximum transition time
maxT = maxL/minV;

% create and initialize the array of structures that represent
% the nodes
nodes = struct([]);
for i = 1 : N
    nodes(i).curX = rand*maxX;
    nodes(i).curY = rand*maxY;
    nodes(i).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(i).pauseT = minPauseTime + rand*(maxPauseTime -
                                                minPauseTime);

    nodes(i).speedAngle = 0;
    nodes(i).transLength = 0;
    nodes(i).epsilon = nodes(i).speed * dt;
end

% link availability implementation variables
linkStatus = zeros(N); % matrix for storing the current link
                       % status between each pair of nodes
                       % (1=link, 0=no link).

previousLinkStatus = zeros(N); % matrix for storing the previous
                                % link status between each pair
                                % of nodes (1=link, 0=no link).

linkDuration = zeros(N); % matrix for storing the current link
                          % duration of each link (how much time
                          % the link is up).

linkHandles = zeros(N); % matrix for storing the handles of the
                         % plots representing the links

maxLinkDist = 400; % maximum distance between two connected
                   % nodes = the transmission range of each node

% path availability implementation variables
pathStatus = 0; % status of the 2-hop path (1=path, 0=no path)
intermediateNode = 0;
pathDuration = 0; % the current duration of the path
                  % (how much time the path is up)

scrsz = get(0,'ScreenSize');
f1=figure(1); % for displaying the simulation (moving nodes)
set(f1, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
                    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;

NodesCurX = [nodes.curX];
NodesCurY = [nodes.curY];

% scatter of the intermediate nodes

```



```

handleScatter1 = scatter(NodesCurX(3:N), NodesCurY(3:N),
                        'filled','o','g','XDataSource',
                        'NodesCurX(3:N)','YDataSource',
                        'NodesCurY(3:N)');

hold on;
clf reset;

NodesCurX = [nodes.curX];
NodesCurY = [nodes.curY];

% scatter of the intermediate nodes
handleScatter1 = scatter(NodesCurX(3:N), NodesCurY(3:N),
                        'filled','o','g','XDataSource',
                        'NodesCurX(3:N)','YDataSource',
                        'NodesCurY(3:N)');

hold on;
% scatter of the end nodes
handleScatter2 = scatter(NodesCurX(1:2), NodesCurY(1:2),
                        'filled','o','r','XDataSource',
                        'NodesCurX(1:2)','YDataSource',
                        'NodesCurY(1:2)');

axis([minX maxX minY maxY]);
axis square;
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Random Direction Mobility Model Simulation');

% arrays for creating the link duration pdf
maxLinkDuration = 2000;
linkDurationDivSize = 1;
numOfDurationDivisions = maxLinkDuration/linkDurationDivSize;
LinkDuration = [linkDurationDivSize/2 : linkDurationDivSize :
                maxLinkDuration - linkDurationDivSize/2];
pdfLinkDuration = zeros(1, numOfDurationDivisions);
numOfLinksCompleted = 0; % the number of links created
                        % and then broken

% arrays for creating the link availability
% link availability = the probability that a link is up
% as a function of time t after its creation
maxLinkAvail = 2000;
linkAvailDivSize = 1;
numOfAvailDivisions = maxLinkAvail/linkAvailDivSize;
AvailTime = [linkAvailDivSize/2 : linkAvailDivSize : maxLinkAvail
             - linkAvailDivSize/2];
LinkAvail = zeros(1, numOfAvailDivisions);
numOfLinksCreated = 0;

% arrays for creating the path duration pdf
% two hop paths are examined
maxPathDuration = 2000;
pathDurationDivSize = 1;
numOfPathDurationDivisions = maxPathDuration/pathDurationDivSize;
PathDuration = [pathDurationDivSize/2 : pathDurationDivSize :
                maxPathDuration - pathDurationDivSize/2];
pdfPathDuration = zeros(1, numOfPathDurationDivisions);

```

```

numOfPathsCompleted = 0; % the number of paths created
                        % and then broken

% arrays for creating the path availability
% path availability = the probability that a path is up
% as a function of time t after its creation
maxPathAvail = 2000;
pathAvailDivSize = 1;
numOfPathAvailDivisions = maxPathAvail/pathAvailDivSize;
PathAvailTime = [pathAvailDivSize/2 : pathAvailDivSize :
                 maxPathAvail - pathAvailDivSize/2];
PathAvail = zeros(1, numOfPathAvailDivisions);
numOfPathsCreated = 0;

% path points (a two hop path has three points)
pathPointsX = zeros(1,3);
pathPointsY = zeros(1,3);

% draw the initial links
for k = 1 : N
    for b = k+1 : N
        hold on;
        previousLinkStatus(k,b) = linkStatus(k,b);
        dist = sqrt((nodes(k).curX - nodes(b).curX)^2 +
                    (nodes(k).curY - nodes(b).curY)^2);
        if dist <= maxLinkDist
            numOfLinksCreated = numOfLinksCreated + 1;
            linkStatus(k,b) = 1;
            linkHandles(k,b) = plot([nodes(k).curX,
                                     nodes(b).curX], [nodes(k).curY,
                                                         nodes(b).curY], '-b',
                                     'XDataSource', '[nodes(k).curX,
                                                         nodes(b).curX]', 'YDataSource',
                                                         '[nodes(k).curY, nodes(b).curY]');
        else
            linkStatus(k,b) = 0;

            linkHandles(k,b) = plot([nodes(k).curX,
                                     nodes(b).curX], [nodes(k).curY,
                                                         nodes(b).curY], '',
                                     'XDataSource', '[nodes(k).curX,
                                                         nodes(b).curX]', 'YDataSource',
                                                         '[nodes(k).curY, nodes(b).curY]');
            set(linkHandles(k,b), 'LineStyle', 'none');
        end
    end
end

legend([num2str(N-2) ' intermediate nodes'],[2 end nodes'], - 1);
hText = annotation('textbox',[0.15 0.05 0 0],'FitBoxToText','on');
set(hText, 'BackgroundColor', 'y', 'VerticalAlignment', 'middle',
        'HorizontalAlignment', 'center');
hold on;
pathHandle = plot(pathPointsX, pathPointsY, '-r', 'LineStyle',
                 'none', 'XDataSource', 'pathPointsX',

```

```

        'YDataSource', 'pathPointsY');

% s i m u l a t i o n   l o o p
for j = 1 : totalTimeSteps
    % pause(dt/1000);
    refreshdata(handleScatter1, 'caller');
    refreshdata(handleScatter2, 'caller');
    set(hText, 'String', [num2str(floor(j*dt)) ' out of '
        num2str(simulationTime) ' seconds']);
    drawnow;

    NodesCurX = [nodes.curX];
    NodesCurY = [nodes.curY];

    % for every single node, refresh its position and the links
    % between this node and the other nodes
    for k = 1 : N
        % refresh the links between this node and the other nodes
        for b = k+1 : N
            previousLinkStatus(k,b) = linkStatus(k,b);
            dist = sqrt((nodes(k).curX - nodes(b).curX)^2 +
                (nodes(k).curY - nodes(b).curY)^2);
            if dist <= maxLinkDist
                if linkStatus(k,b) == 1 % if the link already
                    % exists
                    linkDuration(k,b) = linkDuration(k,b) + dt;
                    availDiv =
                        ceil(linkDuration(k,b)/linkAvailDivSize);
                    LinkAvail(availDiv)=LinkAvail(availDiv) + 1;
                else
                    numOfLinksCreated = numOfLinksCreated + 1;
                    linkStatus(k,b) = 1;
                    set(linkHandles(k,b), 'LineStyle', '-');
                end
                refreshdata(linkHandles(k,b), 'caller');
            else
                if linkStatus(k,b) == 1 % if there was a link
                    % between this pair
                    % (which has just broken)

                    % update the pdf of the link duration
                    durationDiv = max([1,
                        ceil(linkDuration(k,b)/linkDurationDivSize)]);
                    pdfLinkDuration(durationDiv) =
                        pdfLinkDuration(durationDiv) + 1;
                    numOfLinksCompleted = numOfLinksCompleted + 1;
                    linkStatus(k,b) = 0;
                    linkDuration(k,b) = 0;
                    set(linkHandles(k, b), 'LineStyle', 'none');
                    refreshdata(linkHandles(k, b), 'caller');
                end
            end
        end
    end
end

```

```

% if the node is pausing at a point
if nodes(k).pauseT > 0
    nodes(k).pauseT = nodes(k).pauseT - dt;
% if the pause time has elapsed
elseif nodes(k).pauseT <= 0 && nodes(k).pauseT > -1
    nodes(k).pauseT = -1; % the node starts
        % to be in movement
    % calculate the new transition length
    nodes(k).transLength = minL + rand*(maxL-minL);
    % calculate the new speed
    nodes(k).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(k).epsilon = nodes(k).speed * dt;
    % calculate the new angle of movement
    nodes(k).speedAngle = 360 * rand;
% if the node is in movement
elseif nodes(k).pauseT == -1
    % if the node is on one of the four boundaries of the
    % simulation area and has a direction of movement
    % towards the boundary, reflect it
    if nodes(k).curX > maxX-nodes(k).epsilon ||
        nodes(k).curX < nodes(k).epsilon,
        if nodes(k).curX > maxX - nodes(k).epsilon
            if nodes(k).speedAngle<90 ||
                nodes(k).speedAngle>270
                nodes(k).speedAngle = mod((180-
                    nodes(k).speedAngle), 360);
            end
        end
        if nodes(k).curX < nodes(k).epsilon
            if nodes(k).speedAngle>90 &&
                nodes(k).speedAngle<270
                nodes(k).speedAngle = mod((180-
                    nodes(k).speedAngle), 360);
            end
        end
    end
    if nodes(k).curY > maxY-nodes(k).epsilon ||
        nodes(k).curY < nodes(k).epsilon,
        if nodes(k).curY > maxY - nodes(k).epsilon
            if nodes(k).speedAngle < 180
                nodes(k).speedAngle = mod((-
                    nodes(k).speedAngle), 360);
            end
        end
        if nodes(k).curY < nodes(k).epsilon
            if nodes(k).speedAngle > 180
                nodes(k).speedAngle = mod((-
                    nodes(k).speedAngle), 360);
            end
        end
    end
end

% update the node's position
nodes(k).curX = nodes(k).curX + nodes(k).speed *
    cosd(nodes(k).speedAngle)* dt;
nodes(k).curY = nodes(k).curY + nodes(k).speed *
    sind(nodes(k).speedAngle)* dt;

```

```

nodes(k).transLength = nodes(k).transLength -
                        nodes(k).speed * dt;
% if the node has completed its transition,
% initialize random pause time
if nodes(k).transLength < nodes(k).epsilon
    nodes(k).pauseT = minPauseTime +
                      rand*(maxPauseTime - minPauseTime);
end
end
end

% find a new path or update the path statistics
if pathStatus == 1 % if there was a path
    if linkStatus(1, intermediateNode)==1 && linkStatus(2,
        intermediateNode)==1 % if it still exists
        % if the path still exists
        pathDuration = pathDuration + dt;
        pathAvailDiv = ceil(pathDuration/pathAvailDivSize);
        PathAvail(pathAvailDiv)=PathAvail(pathAvailDiv) + 1;
        pathPointsX(1) = NodesCurX(1);
        pathPointsX(3) = NodesCurX(2);
        pathPointsX(2) = NodesCurX(intermediateNode);
        pathPointsY(1) = NodesCurY(1);
        pathPointsY(3) = NodesCurY(2);
        pathPointsY(2) = NodesCurY(intermediateNode);
        refreshdata(pathHandle, 'caller');
    else
        % if the path has just broken
        pathDurationDiv = max([1,
            ceil(pathDuration/pathDurationDivSize)]);
        pdfPathDuration(pathDurationDiv) =
            pdfPathDuration(pathDurationDiv) + 1;
        numOfPathsCompleted = numOfPathsCompleted + 1;
        pathStatus = 0;
        pathDuration = 0;
        set(pathHandle, 'LineStyle', 'none');
    end
else % search for a new path
    for h=3:N
        if linkStatus(1,h)==1 && linkStatus(2,h)==1 &&
            (previousLinkStatus(1,h)==0 ||
            previousLinkStatus(2,h)==0)
            % if a path has just been created
            % (one or more of the links is/are new)
            pathStatus = 1;
            intermediateNode = h;
            numOfPathsCreated = numOfPathsCreated + 1;
            pathPointsX(1) = NodesCurX(1);
            pathPointsX(3) = NodesCurX(2);
            pathPointsX(2) = NodesCurX(intermediateNode);
            pathPointsY(1) = NodesCurY(1);
            pathPointsY(3) = NodesCurY(2);
            pathPointsY(2) = NodesCurY(intermediateNode);
            refreshdata(pathHandle, 'caller');
            set(pathHandle, 'LineStyle','-', 'LineWidth', 2);
            break
        end
    end
end

```

```

        end
    end

end

% display the simulation RESULTS

% plotting the link duration distribution
f2=figure(2);
set(f2, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfLinkDuration = pdfLinkDuration/numOfLinksCompleted;
meanLinkDuration = 0;
temp = 0; % for normalizing the link duration
         distribution
for k=1:numOfDurationDivisions
    meanLinkDuration = meanLinkDuration +
        pdfLinkDuration(k)*LinkDuration(k)*linkDurationDivSize;
    temp = temp + pdfLinkDuration(k);
end
temp = temp * linkDurationDivSize;
pdfLinkDuration = pdfLinkDuration ./ temp;
meanLinkDuration = meanLinkDuration / temp;
plot(LinkDuration , pdfLinkDuration);
% plotting the theoretical link duration distribution
LinkDurationTh = [linkDurationDivSize/4 : linkDurationDivSize/2 :
    maxLinkDuration - linkDurationDivSize/4];
pdfLinkDurationTh = zeros(1, 2*numOfDurationDivisions);
pdfLinkDurationTh = (maxLinkDist^2 + minV^2 .* LinkDurationTh.^2)
    ./ (2 * maxLinkDist * minV.*LinkDurationTh.^2);
pdfLinkDurationTh = pdfLinkDurationTh .* ...
    log((maxLinkDist+ minV .* LinkDurationTh)./ ...
    sqrt(abs(maxLinkDist^2 - minV^2.* ...
    LinkDurationTh.^2))) - 1./(2.*LinkDurationTh);
hold on;
plot(LinkDurationTh , pdfLinkDurationTh, 'LineWidth', 1 ,
    'LineStyle', '--', 'Color', 'm');
meanLinkDurationTh =
    sum(LinkDurationTh.*pdfLinkDurationTh)*linkDurationDivSize/2;
axis([0 100 0 1.2*max([max(pdfLinkDuration,[],1) ...
    max(pdfLinkDurationTh,[],1)])]);
hText1 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText1,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText1, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanLinkDuration) ' s']);
hText2 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText2,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm' );
set(hText2, 'String', ['Mean Value (theoretical): '
    num2str(meanLinkDurationTh) ' s']);
xlabel('Link Duration (s)');
ylabel('pdf of link duration');

```

```

title('Link Duration distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the link availability
f3=figure(3);
set(f3, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
LinkAvail = LinkAvail/(numOfLinksCreated*linkDurationDivSize/dt);
plot(AvailTime , LinkAvail);
% plotting the theoretical link availability
AvailTimeTh = [linkAvailDivSize/4 : linkAvailDivSize/2 :
    maxLinkAvail - linkAvailDivSize/4];
LinkAvailTh = zeros(1, 2*numOfAvailDivisions);
for m=1:2*numOfAvailDivisions
    LinkAvailTh(m) = sum(pdfLinkDurationTh(m: ...
        2*numOfDurationDivisions))*linkDurationDivSize/2;
end
hold on;
plot(AvailTimeTh , LinkAvailTh,'LineWidth', 1,'LineStyle', '-',
    'Color', 'm');
axis([0 100 0 1.2*max(LinkAvail)]);
xlabel('Link time (s)');
ylabel('link availability');
title('Link Availability distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the path duration distribution
f4=figure(4); % for displaying statistical results
set(f4, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfPathDuration = pdfPathDuration/numOfPathsCompleted;
meanPathDuration = 0;
temp = 0; % for normalizing the path duration distribution
for k=1:numOfPathDurationDivisions
    meanPathDuration = meanPathDuration +
        pdfPathDuration(k)*PathDuration(k)*pathDurationDivSize;
    temp = temp + pdfPathDuration(k);
end
temp = temp * pathDurationDivSize;
pdfPathDuration = pdfPathDuration ./ temp;
meanPathDuration = meanPathDuration / temp;
plot(PathDuration , pdfPathDuration);
axis([0 100 0 1.2*max(pdfPathDuration)]);
hText3 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText3,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm' );
set(hText3, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanPathDuration) ' s']);
xlabel('Path Duration (s)');
ylabel('pdf of path duration');
title('Path Duration distribution');

```

```

grid on;
grid minor;
% plotting the path availability
f5=figure(5);
set(f5, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
PathAvail = PathAvail/(numOfPathsCreated*pathDurationDivSize/dt);
plot(PathAvailTime , PathAvail);
axis([0 100 0 1.2*max(PathAvail)]);
xlabel('Path time (s)');
ylabel('path availability');
title('Path Availability distribution');
grid on;
grid minor;
ylabel('pdf of path duration');
title('Path Duration distribution');
grid on;
grid minor;

```

A.2.7. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε ad hoc δίκτυο (για μονοπάτια τριών αλμάτων)

```

% Program for simulation of the Random Waypoint Mobility model
% adhoc version (link and 3 hop path duration and availability)
% Authors : G. Cheimonidis & K. Palechoros
% Copyright 2008

function varargout = rwp_adhoc_path3(varargin)

    % parameters of the model

    varargout = {0};
    % simulation area boundaries
    minX = 0;
    maxX = 1500;
    minY = 0;
    maxY = 1500;
    % pause time min and max values
    minPauseTime = 0;
    maxPauseTime = 0;
    % speed min and max values (in m/sec)
    minV = 20;
    maxV = 20;
    N = 25; % number of nodes
    simulationTime = 50; % simulation time in seconds
    dt = 1; % time quantum of simulation
    totalTimeSteps = simulationTime/dt; % number of time steps for
        % simulation

    % maximum transition length and time
    maxL = sqrt((maxX-minX)^2 + (maxY-minY)^2);
    maxT = maxL/minV;

```



```

% create and initialize the array of structures that represent
% the nodes
nodes = struct([]);
for i = 1 : N
    nodes(i).curX = rand*maxX;
    nodes(i).curY = rand*maxY;
    nodes(i).destX = 0;
    nodes(i).destY = 0;
    nodes(i).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(i).pauseT = minPauseTime + rand*(maxPauseTime -
                                                minPauseTime);

    nodes(i).speedAngle = 0;
    nodes(i).transLength = 0;
    nodes(i).epsilon = nodes(i).speed * dt;
end

% link availability implementation variables
linkStatus = zeros(N); % matrix for storing the current link
                    % status between each pair of nodes
                    % (1=link, 0=no link).
previousLinkStatus = zeros(N); % matrix for storing the previous
                    % link status between each pair
                    % of nodes (1=link, 0=no link).
linkDuration = zeros(N); % matrix for storing the current link
                    % duration of each link (how much time
                    % the link is up).
linkHandles = zeros(N); % matrix for storing the handles of the
                    % plots representing the links
maxLinkDist = 400; % maximum distance between two connected
                    % nodes = the transmission range of each node

% path availability implementation variables
pathStatus = 0; % status of the 3-hop path (1=path, 0=no path)
pathDiscovered = 0; % a flag indicating whether a new path has
                    % been discovered
intermediateNode1 = 0;
intermediateNode2 = 0;
pathDuration = 0; % the current duration of the path
                    % (how much time the path is up)

scrsz = get(0,'ScreenSize');
f1=figure(1); % for displaying the simulation (moving nodes)
set(f1, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
                    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;

NodesCurX = [nodes.curX];
NodesCurY = [nodes.curY];

% scatter of the intermediate nodes
handleScatter1 = scatter(NodesCurX(3:N), NodesCurY(3:N),
                        'filled','o', 'g','XDataSource',
                        'NodesCurX(3:N)', 'YDataSource',
                        'NodesCurY(3:N)');

hold on;

```

```

% scatter of the end nodes
handleScatter2 = scatter(NodesCurX(1:2), NodesCurY(1:2),
                        'filled','o','r','XDataSource',
                        'NodesCurX(1:2)', 'YDataSource',
                        'NodesCurY(1:2)');
axis([minX maxX minY maxY]);
axis square;
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Random Waypoint Mobility Model Simulation - Ad hoc
      Network');

% arrays for creating the link duration pdf
maxLinkDuration = 2000;
linkDurationDivSize = 1;
numOfDurationDivisions = maxLinkDuration/linkDurationDivSize;
LinkDuration = [linkDurationDivSize/2 : linkDurationDivSize :
                maxLinkDuration - linkDurationDivSize/2];
pdfLinkDuration = zeros(1, numOfDurationDivisions);
numOfLinksCompleted = 0; % the number of links created
                        % and then broken

% arrays for creating the link availability
% link availability = the probability that a link is up
% as a function of time t after its creation
maxLinkAvail = 2000;
linkAvailDivSize = 1;
numOfAvailDivisions = maxLinkAvail/linkAvailDivSize;
AvailTime = [linkAvailDivSize/2 : linkAvailDivSize : maxLinkAvail
             - linkAvailDivSize/2];
LinkAvail = zeros(1, numOfAvailDivisions);
numOfLinksCreated = 0;

% arrays for creating the path duration pdf
% two hop paths are examined
maxPathDuration = 2000;
pathDurationDivSize = 1;
numOfPathDurationDivisions = maxPathDuration/pathDurationDivSize;
PathDuration = [pathDurationDivSize/2 : pathDurationDivSize :
                maxPathDuration - pathDurationDivSize/2];
pdfPathDuration = zeros(1, numOfPathDurationDivisions);
numOfPathsCompleted = 0; % the number of paths created
                        % and then broken

% arrays for creating the path availability
% path availability = the probability that a path is up
% as a function of time t after its creation
maxPathAvail = 2000;
pathAvailDivSize = 1;
numOfPathAvailDivisions = maxPathAvail/pathAvailDivSize;
PathAvailTime = [pathAvailDivSize/2 : pathAvailDivSize :
                 maxPathAvail - pathAvailDivSize/2];
PathAvail = zeros(1, numOfPathAvailDivisions);
numOfPathsCreated = 0;

```

```

% path points (a three hop path has three points)
pathPointsX = zeros(1,4);
pathPointsY = zeros(1,4);

% draw the initial links
for k = 1 : N
    for b = k+1 : N
        hold on;
        previousLinkStatus(k,b) = linkStatus(k,b);
        dist = sqrt((nodes(k).curX - nodes(b).curX)^2 +
                    (nodes(k).curY - nodes(b).curY)^2);
        if dist <= maxLinkDist
            numOfLinksCreated = numOfLinksCreated + 1;
            linkStatus(k,b) = 1;
            linkHandles(k,b) = plot([nodes(k).curX,
                                     nodes(b).curX], [nodes(k).curY,
                                                         nodes(b).curY], '-b',
                                     'XDataSource', '[nodes(k).curX,
                                                         nodes(b).curX]', 'YDataSource',
                                                         '[nodes(k).curY, nodes(b).curY]');
        else
            linkStatus(k,b) = 0;
            linkHandles(k,b) = plot([nodes(k).curX,
                                     nodes(b).curX], [nodes(k).curY,
                                                         nodes(b).curY], '', 'XDataSource',
                                     '[nodes(k).curX, nodes(b).curX]',
                                     'YDataSource', '[nodes(k).curY,
                                                         nodes(b).curY]');
            set(linkHandles(k,b), 'LineStyle', 'none');
        end
    end
end

legend([num2str(N-2) ' intermediate nodes'], ['2 end nodes'], - 1);
hText = annotation('textbox',[0.15 0.05 0 0], 'FitBoxToText','on');
set(hText, 'BackgroundColor', 'y', 'VerticalAlignment', 'middle',
        'HorizontalAlignment', 'center');
hold on;
pathHandle = plot(pathPointsX, pathPointsY, '-r', 'LineStyle',
                  'none', 'XDataSource', 'pathPointsX',
                  'YDataSource', 'pathPointsY');

% s i m u l a t i o n   l o o p
for j = 1 : totalTimeSteps
    % pause(dt/1000);
    refreshdata(handleScatter1, 'caller');
    refreshdata(handleScatter2, 'caller');
    set(hText, 'String', [num2str(floor(j*dt)) ' out of '
                        num2str(simulationTime) ' seconds']);
    drawnow;

    NodesCurX = [nodes.curX];
    NodesCurY = [nodes.curY];

    % for every single node, refresh its position and the links
    % between this node and the other nodes

```

```

for k = 1 : N
    % refresh the links between this node and the other nodes
    for b = k+1 : N
        previousLinkStatus(k,b) = linkStatus(k,b);
        dist = sqrt((nodes(k).curX - nodes(b).curX)^2 +
                    (nodes(k).curY - nodes(b).curY)^2);
        if dist <= maxLinkDist
            if linkStatus(k,b) == 1 % if the link already
                                    % exists
                linkDuration(k,b) = linkDuration(k,b) + dt;
                availDiv =
                    ceil(linkDuration(k,b)/linkAvailDivSize);
                LinkAvail(availDiv)=LinkAvail(availDiv) + 1;
            else
                numOfLinksCreated = numOfLinksCreated + 1;
                linkStatus(k,b) = 1;
                set(linkHandles(k,b), 'LineStyle', '-');
            end
            refreshdata(linkHandles(k,b), 'caller');
        else
            if linkStatus(k,b) == 1 % if there was a link
                                    % between this pair
                                    % (which has just broken)
                % update the pdf of the link duration
                durationDiv = max([1,
                                    ceil(linkDuration(k,b)/linkDurationDivSize)]);
                pdfLinkDuration(durationDiv) =
                    pdfLinkDuration(durationDiv) + 1;
                numOfLinksCompleted = numOfLinksCompleted + 1;
                linkStatus(k,b) = 0;
                linkDuration(k,b) = 0;
                set(linkHandles(k, b), 'LineStyle', 'none');
                refreshdata(linkHandles(k, b), 'caller');
            end
        end
    end
end

% if the node is pausing at the waypoint
if nodes(k).pauseT > 0
    nodes(k).pauseT = nodes(k).pauseT - dt;
% if the pause time has elapsed
elseif nodes(k).pauseT <= 0 && nodes(k).pauseT > -1
    nodes(k).pauseT = -1; % the node starts
                        % to be in movement
    % calculate position of the next waypoint
    nodes(k).destX = rand*maxX;
    nodes(k).destY = rand*maxY;
    % calculate the new speed of the node
    nodes(k).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    nodes(k).epsilon = nodes(k).speed * dt;
    % calculate the new direction of node's movement
    nodes(k).speedAngle = atand((nodes(k).destY-
                                nodes(k).curY)/(nodes(k).destX-nodes(k).curX));
    if (nodes(k).destX - nodes(k).curX) < 0
        nodes(k).speedAngle = nodes(k).speedAngle + 180;
    end
end
% if the node is in movement

```

```

elseif nodes(k).pauseT == -1
    % update the node's position
    nodes(k).curX = nodes(k).curX + nodes(k).speed *
        cosd(nodes(k).speedAngle)* dt;
    nodes(k).curY = nodes(k).curY + nodes(k).speed *
        sind(nodes(k).speedAngle)* dt;
    distance = ((nodes(k).destX - nodes(k).curX)^2 +
        (nodes(k).destY - nodes(k).curY)^2)^0.5;
    % if the node has reached its waypoint (destination),
    % initialize random pause time
    if distance < nodes(k).epsilon
        nodes(k).pauseT = minPauseTime +
            rand*(maxPauseTime - minPauseTime);
    end
end
end

% find a new path or update the path statistics
if pathStatus == 1 % if there was a path
    if linkStatus(1, intermediateNode1)==1 && linkStatus(2,
        intermediateNode2)==1 &&
        linkStatus(min([intermediateNode1
            intermediateNode2]'),
            max([intermediateNode1
                intermediateNode2]')) == 1
        % if the path still exists
        pathDuration = pathDuration + dt;
        pathAvailDiv = ceil(pathDuration/pathAvailDivSize);
        PathAvail(pathAvailDiv)=PathAvail(pathAvailDiv) + 1;
        pathPointsX(1) = NodesCurX(1);
        pathPointsX(4) = NodesCurX(2);
        pathPointsX(2) = NodesCurX(intermediateNode1);
        pathPointsX(3) = NodesCurX(intermediateNode2);
        pathPointsY(1) = NodesCurY(1);
        pathPointsY(4) = NodesCurY(2);
        pathPointsY(2) = NodesCurY(intermediateNode1);
        pathPointsY(3) = NodesCurY(intermediateNode2);
        refreshdata(pathHandle, 'caller');
    else
        % if the path has just broken
        pathDurationDiv = max([1,
            ceil(pathDuration/pathDurationDivSize)]);
        pdfPathDuration(pathDurationDiv) =
            pdfPathDuration(pathDurationDiv) + 1;
        numOfPathsCompleted = numOfPathsCompleted + 1;
        pathStatus = 0;
        pathDuration = 0;
        pathDiscovered = 0;
        set(pathHandle, 'LineStyle', 'none');
    end
else % search for a new path
    h = 3;
    while (pathDiscovered == 0) && (h <= N)
        if linkStatus(1,h)==1
            q = 3;
            while (pathDiscovered == 0) && (q<=N)
                if (q~=h) && (linkStatus(2,q)==1) &&

```

```

(linkStatus(min([h q]'), max([h q]'))==1)
if (previousLinkStatus(1,h)==0) ||
    (previousLinkStatus(2,q)==0) ||
    (previousLinkStatus(min([h q]'),
        max([h q]'))==0)
% if the path has just been created (one
% or more of the links is/are new
pathStatus = 1;
intermediateNode1 = h;
intermediateNode2 = q;
numOfPathsCreated = numOfPathsCreated + 1;
pathDiscovered = 1;
pathPointsX(1) = NodesCurX(1);
pathPointsX(4) = NodesCurX(2);
pathPointsX(2) =
    NodesCurX(intermediateNode1);
pathPointsX(3) =
    NodesCurX(intermediateNode2);
pathPointsY(1) = NodesCurY(1);
pathPointsY(4) = NodesCurY(2);
pathPointsY(2) =
    NodesCurY(intermediateNode1);
pathPointsY(3) =
    NodesCurY(intermediateNode2);
refreshdata(pathHandle, 'caller');
set(pathHandle, 'LineStyle', '-',
    'LineWidth', 2);
end
end
q = q+1;
end
end
h = h+1;
end
pathDiscovered=0;
end

end

% display the simulation RESULTS

% plotting the link duration distribution
f2=figure(2);
set(f2, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfLinkDuration = pdfLinkDuration/numOfLinksCompleted;
meanLinkDuration = 0;
temp = 0; % for normalizing the link duration
distribution
for k=1:numOfDurationDivisions
    meanLinkDuration = meanLinkDuration +
        pdfLinkDuration(k)*LinkDuration(k)*linkDurationDivSize;
    temp = temp + pdfLinkDuration(k);
end
temp = temp * linkDurationDivSize;

```

```

pdfLinkDuration = pdfLinkDuration ./ temp;
meanLinkDuration = meanLinkDuration / temp;
plot(LinkDuration , pdfLinkDuration);
% plotting the theoretical link duration distribution
LinkDurationTh = [linkDurationDivSize/4 : linkDurationDivSize/2 :
    maxLinkDuration - linkDurationDivSize/4];
pdfLinkDurationTh = zeros(1, 2*numOfDurationDivisions);
pdfLinkDurationTh = (maxLinkDist^2 + minV^2 .* LinkDurationTh.^2)
    ./ (2 * maxLinkDist * minV.*LinkDurationTh.^2);
pdfLinkDurationTh = pdfLinkDurationTh .* ...
    log((maxLinkDist+ minV .* LinkDurationTh)./ ...
    sqrt(abs(maxLinkDist^2 - minV^2.* ...
    LinkDurationTh.^2))) - 1./(2.*LinkDurationTh);

hold on;
plot(LinkDurationTh , pdfLinkDurationTh, 'LineWidth', 1 ,
    'LineStyle', '--', 'Color', 'm');
meanLinkDurationTh =
    sum(LinkDurationTh.*pdfLinkDurationTh)*linkDurationDivSize/2;
axis([0 100 0 1.2*max([max(pdfLinkDuration,[],1) ...
    max(pdfLinkDurationTh,[],1)])]);
hText1 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText1,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText1, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanLinkDuration) ' s']);
hText2 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText2,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm' );
set(hText2, 'String', ['Mean Value (theoretical): '
    num2str(meanLinkDurationTh) ' s']);
xlabel('Link Duration (s)');
ylabel('pdf of link duration');
title('Link Duration distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the link availability
f3=figure(3);
set(f3, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
LinkAvail = LinkAvail/(numOfLinksCreated*linkDurationDivSize/dt);
plot(AvailTime , LinkAvail);
% plotting the theoretical link availability
AvailTimeTh = [linkAvailDivSize/4 : linkAvailDivSize/2 :
    maxLinkAvail - linkAvailDivSize/4];
LinkAvailTh = zeros(1, 2*numOfAvailDivisions);
for m=1:2*numOfAvailDivisions
    LinkAvailTh(m) = sum(pdfLinkDurationTh(m: ...
    2*numOfDurationDivisions))*linkDurationDivSize/2;
end
hold on;
plot(AvailTimeTh , LinkAvailTh,'LineWidth', 1,'LineStyle', '-',
    'Color', 'm');
axis([0 100 0 1.2*max(LinkAvail')]);

```

```

xlabel('Link time (s)');
ylabel('link availability');
title('Link Availability distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the path duration distribution
f4=figure(4); % for displaying statistical results
set(f4, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfPathDuration = pdfPathDuration/numOfPathsCompleted;
meanPathDuration = 0;
temp = 0; % for normalizing the path duration distribution
for k=1:numOfPathDurationDivisions
    meanPathDuration = meanPathDuration +
        pdfPathDuration(k)*PathDuration(k)*pathDurationDivSize;
    temp = temp + pdfPathDuration(k);
end
temp = temp * pathDurationDivSize;
pdfPathDuration = pdfPathDuration ./ temp;
meanPathDuration = meanPathDuration / temp;
plot(PathDuration , pdfPathDuration);
axis([0 100 0 1.2*max(pdfPathDuration)]);
hText3 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText3,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm' );
set(hText3, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanPathDuration) ' s']);
xlabel('Path Duration (s)');
ylabel('pdf of path duration');
title('Path Duration distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the path availability
f5=figure(5);
set(f5, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
PathAvail = PathAvail/(numOfPathsCreated*pathDurationDivSize/dt);
plot(PathAvailTime , PathAvail);
axis([0 150 0 1.2*max(PathAvail)]);
xlabel('Path time (s)');
ylabel('path availability');
title('Path Availability distribution');
grid on;
grid minor;

```


A.2.8. Κώδικας προσομοίωσης Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε ad hoc δίκτυο (για μονοπάτια τριών αλμάτων)

```

% Program for simulation of the Random Direction Mobility model
% adhoc version (link and 3 hop path duration and availability)
% Authors : G. Cheimonidis & K. Palechoros
% Copyright 2008

function varargout = rd_adhoc_path3(varargin)

    % parameters of the model

    varargout = {0};
    % simulation area boundaries
    minX = 0;
    maxX = 1500;
    minY = 0;
    maxY = 1500;
    % pause time min and max values
    minPauseTime = 0;
    maxPauseTime = 0;
    % speed min and max values (in m/sec)
    minV = 20;
    maxV = 20;
    N = 25; % number of nodes
    simulationTime = 50; % simulation time in seconds
    dt = 1; % time quantum of simulation
    totalTimeSteps = simulationTime/dt; % number of time steps for
    % simulation

    % transition length min and max values
    minL = 0;
    maxL = sqrt((maxX-minX)^2 + (maxY-minY)^2);
    % maximum transition time
    maxT = maxL/minV;

    % create and initialize the array of structures that represent
    % the nodes
    nodes = struct([]);
    for i = 1 : N
        nodes(i).curX = rand*maxX;
        nodes(i).curY = rand*maxY;
        nodes(i).speed = minV + rand*(maxV - minV);
        nodes(i).pauseT = minPauseTime + rand*(maxPauseTime -
            minPauseTime);
        nodes(i).speedAngle = 0;
        nodes(i).transLength = 0;
        nodes(i).epsilon = nodes(i).speed * dt;
    end

    % link availability implementation variables
    linkStatus = zeros(N); % matrix for storing the current link
    % status between each pair of nodes
    % (1=link, 0=no link).

```

```

previousLinkStatus = zeros(N); % matrix for storing the previous
                                % link status between each pair
                                % of nodes (1=link, 0=no link).
linkDuration = zeros(N); % matrix for storing the current link
                            % duration of each link (how much time
                            % the link is up).
linkHandles = zeros(N); % matrix for storing the handles of the
                            % plots representing the links
maxLinkDist = 400; % maximum distance between two connected
                    % nodes = the transmission range of each node

% path availability implementation variables
pathStatus = 0; % status of the 3-hop path (1=path, 0=no path)
pathDiscovered = 0; % a flag indicating whether a new path has
                    % been discovered
intermediateNode1 = 0;
intermediateNode2 = 0;
pathDuration = 0; % the current duration of the path
                  % (how much time the path is up)

scrsz = get(0,'ScreenSize');
fl=figure(1); % for displaying the simulation (moving nodes)
set(fl, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
                    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;

NodesCurX = [nodes.curX];
NodesCurY = [nodes.curY];

% scatter of the intermediate nodes
handleScatter1 = scatter(NodesCurX(3:N), NodesCurY(3:N),
                        'filled','o', 'g','XDataSource',
                        'NodesCurX(3:N)', 'YDataSource',
                        'NodesCurY(3:N)');

hold on;
% scatter of the end nodes
handleScatter2 = scatter(NodesCurX(1:2), NodesCurY(1:2),
                        'filled','o', 'r','XDataSource',
                        'NodesCurX(1:2)', 'YDataSource',
                        'NodesCurY(1:2)');

axis([minX maxX minY maxY]);
axis square;
xlabel('X Axis');
ylabel('Y Axis');
title('Random Waypoint Mobility Model Simulation - Ad hoc
      Network');

% arrays for creating the link duration pdf
maxLinkDuration = 2000;
linkDurationDivSize = 1;
numOfDurationDivisions = maxLinkDuration/linkDurationDivSize;
LinkDuration = [linkDurationDivSize/2 : linkDurationDivSize :
                maxLinkDuration - linkDurationDivSize/2];
pdfLinkDuration = zeros(1, numOfDurationDivisions);
numOfLinksCompleted = 0; % the number of links created
                        % and then broken

```

```

% arrays for creating the link availability
% link availability = the probability that a link is up
% as a function of time t after its creation
maxLinkAvail = 2000;
linkAvailDivSize = 1;
numOfAvailDivisions = maxLinkAvail/linkAvailDivSize;
AvailTime = [linkAvailDivSize/2 : linkAvailDivSize : maxLinkAvail
             - linkAvailDivSize/2];
LinkAvail = zeros(1, numOfAvailDivisions);
numOfLinksCreated = 0;

% arrays for creating the path duration pdf
% two hop paths are examined
maxPathDuration = 2000;
pathDurationDivSize = 1;
numOfPathDurationDivisions = maxPathDuration/pathDurationDivSize;
PathDuration = [pathDurationDivSize/2 : pathDurationDivSize :
                maxPathDuration - pathDurationDivSize/2];
pdfPathDuration = zeros(1, numOfPathDurationDivisions);
numOfPathsCompleted = 0; % the number of paths created
                        % and then broken

% arrays for creating the path availability
% path availability = the probability that a path is up
% as a function of time t after its creation
maxPathAvail = 2000;
pathAvailDivSize = 1;
numOfPathAvailDivisions = maxPathAvail/pathAvailDivSize;
PathAvailTime = [pathAvailDivSize/2 : pathAvailDivSize :
                 maxPathAvail - pathAvailDivSize/2];
PathAvail = zeros(1, numOfPathAvailDivisions);
numOfPathsCreated = 0;

% path points (a three hop path has three points)
pathPointsX = zeros(1,4);
pathPointsY = zeros(1,4);

% draw the initial links
for k = 1 : N
    for b = k+1 : N
        hold on;
        previousLinkStatus(k,b) = linkStatus (k,b);
        dist = sqrt((nodes(k).curX - nodes(b).curX)^2 +
                    (nodes(k).curY - nodes(b).curY)^2);
        if dist <= maxLinkDist
            numOfLinksCreated = numOfLinksCreated + 1;
            linkStatus(k,b) = 1;
            linkHandles(k,b) = plot([nodes(k).curX,
                                     nodes(b).curX], [nodes(k).curY,
                                                         nodes(b).curY], '-b',
                                     'XDataSource', '[nodes(k).curX,
                                                         nodes(b).curX]', 'YDataSource',
                                                         '[nodes(k).curY, nodes(b).curY]');
        else
            linkStatus(k,b) = 0;
        end
    end
end

```

```

        linkHandles(k,b) = plot([nodes(k).curX,
                                nodes(b).curX], [nodes(k).curY,
                                                    nodes(b).curY], ' ', 'XDataSource',
                                '[nodes(k).curX, nodes(b).curX]',
                                'YDataSource', '[nodes(k).curY,
                                                nodes(b).curY]');
        set(linkHandles(k,b), 'LineStyle', 'none');
    end
end
end

legend([num2str(N-2) ' intermediate nodes'], ['2 end nodes'], - 1);
hText = annotation('textbox',[0.15 0.05 0 0], 'FitBoxToText','on');
set(hText, 'BackgroundColor', 'y', 'VerticalAlignment', 'middle',
        'HorizontalAlignment', 'center');
hold on;
pathHandle = plot(pathPointsX, pathPointsY, '-r', 'LineStyle',
        'none', 'XDataSource', 'pathPointsX',
        'YDataSource', 'pathPointsY');

% simulation loop
for j = 1 : totalTimeSteps
    % pause(dt/1000);
    refreshdata(handleScatter1, 'caller');
    refreshdata(handleScatter2, 'caller');
    set(hText, 'String', [num2str(floor(j*dt)) ' out of '
        num2str(simulationTime) ' seconds']);
    drawnow;

    NodesCurX = [nodes.curX];
    NodesCurY = [nodes.curY];

    % for every single node, refresh its position and the links
    % between this node and the other nodes
    for k = 1 : N
        % refresh the links between this node and the other nodes
        for b = k+1 : N
            previousLinkStatus(k,b) = linkStatus(k,b);
            dist = sqrt((nodes(k).curX - nodes(b).curX)^2 +
                (nodes(k).curY - nodes(b).curY)^2);
            if dist <= maxLinkDist
                if linkStatus(k,b) == 1 % if the link already
                    % exists
                    linkDuration(k,b) = linkDuration(k,b) + dt;
                    availDiv =
                        ceil(linkDuration(k,b)/linkAvailDivSize);
                    LinkAvail(availDiv)=LinkAvail(availDiv) + 1;
                else
                    numOfLinksCreated = numOfLinksCreated + 1;
                    linkStatus(k,b) = 1;
                    set(linkHandles(k,b), 'LineStyle', '-');
                end
                refreshdata(linkHandles(k,b), 'caller');
            else
                if linkStatus(k,b) == 1 % if there was a link
                    % between this pair

```

```

                                % (which has just broken)
% update the pdf of the link duration
durationDiv = max([1,
ceil(linkDuration(k,b)/linkDurationDivSize)]);
pdfLinkDuration(durationDiv) =
pdfLinkDuration(durationDiv) + 1;
numOfLinksCompleted = numOfLinksCompleted + 1;
linkStatus(k,b) = 0;
linkDuration(k,b) = 0;
set(linkHandles(k, b), 'LineStyle', 'none');
refreshdata(linkHandles(k, b), 'caller');
end
end
end

% if the node is pausing at a point
if nodes(k).pauseT > 0
    nodes(k).pauseT = nodes(k).pauseT - dt;
% if the pause time has elapsed
elseif nodes(k).pauseT <= 0 && nodes(k).pauseT > -1
    nodes(k).pauseT = -1; % the node starts
                            % to be in movement
    % calculate the new transition length
    nodes(k).transLength = minL + rand*(maxL-minL);
    % calculate the new speed
    nodes(k).speed = minV + rand*(maxV - minV);
    % calculate the new angle of movement
    nodes(k).speedAngle = 360 * rand;
% if the node is in movement
elseif nodes(k).pauseT == -1
    % if the node is on one of the four boundaries of the
    % simulation area and has a direction of movement
    % towards the boundary, reflect it
    if nodes(k).curX > maxX-nodes(k).epsilon ||
        nodes(k).curX < nodes(k).epsilon,
        if nodes(k).curX > maxX - nodes(k).epsilon
            if nodes(k).speedAngle<90 ||
                nodes(k).speedAngle>270
                nodes(k).speedAngle = mod((180-
                    nodes(k).speedAngle), 360);
            end
        end
        if nodes(k).curX < nodes(k).epsilon
            if nodes(k).speedAngle>90 &&
                nodes(k).speedAngle<270
                nodes(k).speedAngle = mod((180-
                    nodes(k).speedAngle), 360);
            end
        end
    end
end
end
if nodes(k).curY > maxY-nodes(k).epsilon ||
    nodes(k).curY < nodes(k).epsilon,
    if nodes(k).curY > maxY - nodes(k).epsilon
        if nodes(k).speedAngle < 180
            nodes(k).speedAngle = mod((-
                nodes(k).speedAngle), 360);
        end
    end
end
end

```

```

end
if nodes(k).curY < nodes(k).epsilon
    if nodes(k).speedAngle > 180
        nodes(k).speedAngle = mod((-
            nodes(k).speedAngle), 360);
    end
end
end
end

% find a new path or update the path statistics
if pathStatus == 1 % if there was a path
    if linkStatus(1, intermediateNode1)==1 && linkStatus(2,
        intermediateNode2)==1 && ...
        linkStatus(min([intermediateNode1
            intermediateNode2]')),
            max([intermediateNode1
                intermediateNode2]')) == 1
        % if the path still exists
        pathDuration = pathDuration + dt;
        pathAvailDiv = ceil(pathDuration/pathAvailDivSize);
        PathAvail(pathAvailDiv)=PathAvail(pathAvailDiv) + 1;
        pathPointsX(1) = NodesCurX(1);
        pathPointsX(4) = NodesCurX(2);
        pathPointsX(2) = NodesCurX(intermediateNode1);
        pathPointsX(3) = NodesCurX(intermediateNode2);
        pathPointsY(1) = NodesCurY(1);
        pathPointsY(4) = NodesCurY(2);
        pathPointsY(2) = NodesCurY(intermediateNode1);
        pathPointsY(3) = NodesCurY(intermediateNode2);
        refreshdata(pathHandle, 'caller');
    else
        % if the path has just broken
        pathDurationDiv = max([1,
            ceil(pathDuration/pathDurationDivSize)]);
        pdfPathDuration(pathDurationDiv) =
            pdfPathDuration(pathDurationDiv) + 1;
        numOfPathsCompleted = numOfPathsCompleted + 1;
        pathStatus = 0;
        pathDuration = 0;
        pathDiscovered = 0;
        set(pathHandle, 'LineStyle', 'none');
    end
else % search for a new path
    h = 3;
    while (pathDiscovered == 0) && (h <= N)
        if linkStatus(1,h)==1
            q = 3;
            while (pathDiscovered == 0) && (q<=N)
                if (q~=h) && (linkStatus(2,q)==1) &&
                    (linkStatus(min([h q]')), max([h q]'))==1)
                    if (previousLinkStatus(1,h)==0) ||
                        (previousLinkStatus(2,q)==0) ||
                        (previousLinkStatus(min([h q]')),
                            max([h q]'))==0)
                        % if the path has just been created (one
                        % or more of the links is/are new
                        pathStatus = 1;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        intermediateNode1 = h;
        intermediateNode2 = q;
        numOfPathsCreated = numOfPathsCreated+1;
        pathDiscovered = 1;
        pathPointsX(1) = NodesCurX(1);
        pathPointsX(4) = NodesCurX(2);
        pathPointsX(2) =
            NodesCurX(intermediateNode1);
        pathPointsX(3) =
            NodesCurX(intermediateNode2);
        pathPointsY(1) = NodesCurY(1);
        pathPointsY(4) = NodesCurY(2);
        pathPointsY(2) =
            NodesCurY(intermediateNode1);
        pathPointsY(3) =
            NodesCurY(intermediateNode2);
        refreshdata(pathHandle, 'caller');
        set(pathHandle, 'LineStyle', '-',
            'LineWidth', 2);
    end
end
q = q+1;
end
h = h+1;
end
pathDiscovered=0;
end

end

% display the simulation RESULTS

% plotting the link duration distribution
f2=figure(2);
set(f2, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfLinkDuration = pdfLinkDuration/numOfLinksCompleted;
meanLinkDuration = 0;
temp = 0; % for normalizing the link duration
distribution
for k=1:numOfDurationDivisions
    meanLinkDuration = meanLinkDuration +
        pdfLinkDuration(k)*LinkDuration(k)*linkDurationDivSize;
    temp = temp + pdfLinkDuration(k);
end
temp = temp * linkDurationDivSize;
pdfLinkDuration = pdfLinkDuration ./ temp;
meanLinkDuration = meanLinkDuration / temp;
plot(LinkDuration , pdfLinkDuration);
% plotting the theoretical link duration distribution
LinkDurationTh = [linkDurationDivSize/4 : linkDurationDivSize/2 :
    maxLinkDuration - linkDurationDivSize/4];
pdfLinkDurationTh = zeros(1, 2*numOfDurationDivisions);

```

```

pdfLinkDurationTh = (maxLinkDist^2 + minV^2 .* LinkDurationTh.^2)
    ./ (2 * maxLinkDist * minV.*LinkDurationTh.^2);
pdfLinkDurationTh = pdfLinkDurationTh .* ...
    log((maxLinkDist+ minV .* LinkDurationTh)./ ...
    sqrt(abs(maxLinkDist^2 - minV^2.* ...
    LinkDurationTh.^2))) - 1./(2.*LinkDurationTh);

hold on;
plot(LinkDurationTh , pdfLinkDurationTh, 'LineWidth', 1 ,
    'LineStyle', '--', 'Color', 'm');
meanLinkDurationTh =
    sum(LinkDurationTh.*pdfLinkDurationTh)*linkDurationDivSize/2;
axis([0 100 0 1.2*max([max(pdfLinkDuration,[],1) ...
    max(pdfLinkDurationTh,[],1)])]);
hText1 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText1,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'b' );
set(hText1, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanLinkDuration) ' s']);
hText2 = annotation('textbox',[0.75 0.03 0 0] );
set(hText2,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm' );
set(hText2, 'String', ['Mean Value (theoretical): '
    num2str(meanLinkDurationTh) ' s']);
xlabel('Link Duration (s)');
ylabel('pdf of link duration');
title('Link Duration distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the link availability
f3=figure(3);
set(f3, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
LinkAvail = LinkAvail/(numOfLinksCreated*linkDurationDivSize/dt);
plot(AvailTime , LinkAvail);
% plotting the theoretical link availability
AvailTimeTh = [linkAvailDivSize/4 : linkAvailDivSize/2 :
    maxLinkAvail - linkAvailDivSize/4];
LinkAvailTh = zeros(1, 2*numOfAvailDivisions);
for m=1:2*numOfAvailDivisions
    LinkAvailTh(m) = sum(pdfLinkDurationTh(m: ...
    2*numOfDurationDivisions))*linkDurationDivSize/2;
end
hold on;
plot(AvailTimeTh , LinkAvailTh,'LineWidth', 1,'LineStyle', '-',
    'Color', 'm');
axis([0 100 0 1.2*max(LinkAvail)]);
xlabel('Link time (s)');
ylabel('link availability');
title('Link Availability distribution');
grid on;
grid minor;

```



```

% plotting the path duration distribution
f4=figure(4); % for displaying statistical results
set(f4, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
pdfPathDuration = pdfPathDuration/numOfPathsCompleted;
meanPathDuration = 0;
temp = 0; % for normalizing the path duration distribution
for k=1:numOfPathDurationDivisions
    meanPathDuration = meanPathDuration +
        pdfPathDuration(k)*PathDuration(k)*pathDurationDivSize;
    temp = temp + pdfPathDuration(k);
end
temp = temp * pathDurationDivSize;
pdfPathDuration = pdfPathDuration ./ temp;
meanPathDuration = meanPathDuration / temp;
plot(PathDuration , pdfPathDuration);
axis([0 100 0 1.2*max(pdfPathDuration)]);
hText3 = annotation('textbox',[0.32 0.03 0 0] );
set(hText3,'FitBoxToText', 'on', 'VerticalAlignment', 'middle',
    'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor',
    'w','Color', 'm' );
set(hText3, 'String', ['Mean Value (from simulation results): '
    num2str(meanPathDuration) ' s']);
xlabel('Path Duration (s)');
ylabel('pdf of path duration');
title('Path Duration distribution');
grid on;
grid minor;

% plotting the path availability
f5=figure(5);
set(f5, 'Position',[scrsz(3)/8 scrsz(4)/8 0.8*scrsz(3)
    0.8*scrsz(4)]);
clf reset;
PathAvail = PathAvail/(numOfPathsCreated*pathDurationDivSize/dt);
plot(PathAvailTime , PathAvail);
axis([0 150 0 1.2*max(PathAvail)]);
xlabel('Path time (s)');
ylabel('path availability');
title('Path Availability distribution');
grid on;
grid minor;

```

Σημείωση: Οι κώδικες για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα ζεύξης στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης περιλαμβάνονται τόσο στον κώδικα για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα μονοπατιών δύο αλμάτων όσο και στον αντίστοιχο κώδικα για μονοπάτια τριών αλμάτων, για τα δύο αυτά μοντέλα αντίστοιχα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Le Boudec J-Y, Vojnovic M. Perfect Simulation and Stationarity of a Class of Mobility Models. In Proceedings of the IEEE INFOCOM, 2005.
- [2] J. Kraaier and U. Killat. Mobile Networks: Random direction or random waypoint? A comparison of mobility models for urban environments. Published online in Wiley InterScience, Hamburg University of Technology, Hamburg, Germany, 6 March 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Στοχαστικές ιδιότητες του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και ανάλυση της διάρκειας ζεύξης σε δίκτυα ad hoc

3.1. Εισαγωγή

Τα μοντέλα κινητικότητας είναι σημαντικά δομικά στοιχεία στις έρευνες που βασίζονται σε προσομοίωση και αφορούν τα ασύρματα δίκτυα. Οι ερευνητές στον τομέα αυτό έχουν τη δυνατότητα επιλογής από μια ποικιλία μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί στις ασύρματες επικοινωνίες καθώς και σε άλλους τομείς, όπως η φυσική, η χημεία και η θεωρία των μέσων μεταφοράς. Έχουμε ήδη αναφερθεί σε πολλά από τα μοντέλα αυτά στο Κεφάλαιο 1. Όπως έχουμε δει, ένα πολύ δημοφιλές μοντέλο κινητικότητας που χρησιμοποιείται συχνά είναι το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων (Random Waypoint Mobility Model - RWP). Είναι σημαντική η θεμελιώδης γνώση της συμπεριφοράς του μοντέλου αυτού, ώστε να μπορεί κανείς να ερμηνεύσει σωστά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης [1]. Στο κεφάλαιο λοιπόν αυτό, παρουσιάζεται μια λεπτομερής μελέτη κάποιων στοχαστικών ιδιοτήτων του μοντέλου Τυχαίων Στάσεων, η εξοικείωση με τις οποίες είναι απαραίτητη για να μπορέσουμε να ερμηνεύσουμε και να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο. Αρχικά, μελετούμε κάποιες στοχαστικές ιδιότητες του μοντέλου χωρίς να θεωρούμε κάποια δικτυακή υποδομή. Στο τέλος του κεφαλαίου, γίνεται μια ανάλυση για τα στατιστικά χαρακτηριστικά της διάρκειας ζεύξης σε ένα δίκτυο ad hoc.

3.2. Ορισμός των στοχαστικών ιδιοτήτων του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

Σε αυτή την παράγραφο μελετούμε την κίνηση τυχαίων στάσεων σε ένα μονοδιάστατο ή δισδιάστατο χώρο συστήματος \mathcal{A} . Στο μονοδιάστατο σύστημα θεωρούμε ένα τμήμα γραμμής ενώ στο δισδιάστατο σύστημα θεωρούμε μια ορθογώνια περιοχή μεγέθους $a \times b$. Για τη χρήση μιας κατάλληλης ονοματολογίας, είναι απαραίτητο να οριστούν κάποιες τυχαίες μεταβλητές. Αυτές οι μεταβλητές γράφονται στη συνέχεια με κεφαλαία γράμματα ενώ κάποια συγκεκριμένα δείγματα – αποτελέσματα (outcomes) γράφονται με μικρά γράμματα. Οι πολυδιάστατες μεταβλητές (π.χ. τυχαίες συντεταγμένες σε μια περιοχή) γράφονται με έντονους χαρακτήρες και οι βαθμωτές μεταβλητές (π.χ. τυχαία μήκη) σε κανονική μορφή. Επίσης, η παράμετρος j προσδιορίζει ένα συγκεκριμένο κόμβο και η παράμετρος i υποδηλώνει την περίοδο κίνησης του κόμβου αυτού. Επομένως, η τυχαία μεταβλητή που παριστάνει τις καρτεσιανές συντεταγμένες του σημείου στάσης (waypoint) που επιλέγει ο κόμβος j κατά την περίοδο κίνησής του i , δηλώνεται με το διάνυσμα $\mathbf{P}_i^{(j)}$. Με τον ορισμό αυτό, το ίχνος της κίνησης ενός κόμβου j μπορεί να περιγραφεί ως μια στοχαστική διαδικασία διακριτού χρόνου, που δίνεται από την επιλογή ενός τυχαίου σημείου στάσης $\mathbf{P}_i^{(j)}$ για κάθε περίοδο κίνησης i .

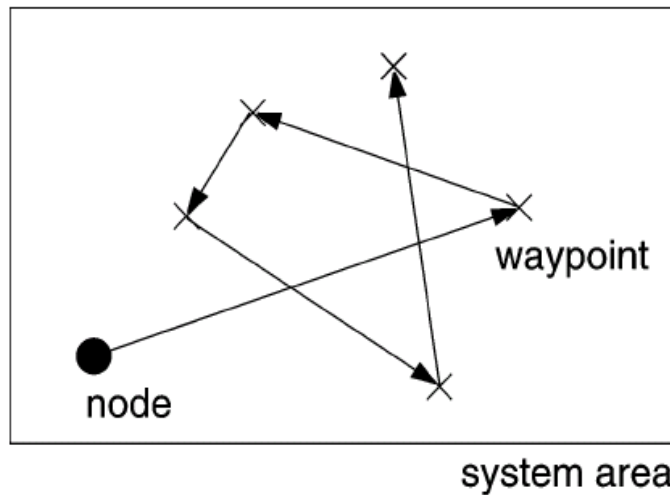
$$\{\mathbf{P}_i^{(j)}\}_{i \in N_0} = \mathbf{P}_0^{(j)}, \mathbf{P}_1^{(j)}, \mathbf{P}_2^{(j)}, \mathbf{P}_3^{(j)}, \dots \quad (3.1)$$

Αυτά τα σημεία στάσης είναι ανεξάρτητα και ταυτόσημα καταναμεημένα (independent and identically distributed - i.i.d) και χρησιμοποιούν μια τυχαία ομοιόμορφη κατανομή στο χώρο \mathcal{A} . Από τη στιγμή που κάθε κόμβος κινείται ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους, είναι αρκετό να μελετήσουμε τη διαδικασία κίνησης ενός μόνο κόμβου. Επομένως, συχνά παραλείπουμε το δείκτη j .

Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση ενός κόμβου που επιλέγει τυχαία μια καινούρια ταχύτητα V_i για την κίνησή του από το σημείο \mathbf{P}_{i-1} στο σημείο \mathbf{P}_i και ένα χρόνο παύσης $T_{p,i}$ στο σημείο στάσης \mathbf{P}_i . Επομένως, ολόκληρη η διαδικασία κίνησης του κόμβου δίνεται από τη σχέση:

$$\{(\mathbf{P}_i, V_i, T_{p,i})\}_{i \in N} = (\mathbf{P}_1, V_1, T_{p,1}), (\mathbf{P}_2, V_2, T_{p,2}), (\mathbf{P}_3, V_3, T_{p,3}), \dots, \quad (3.2)$$

όπου ένα επιπρόσθετο σημείο στάσης \mathbf{P}_0 απαιτείται για αρχικοποίηση. Ένα δείγμα αυτής της διαδικασίας συμβολίζεται με $\{(\mathbf{p}_i, v_i, \tau_{p,i})\}_{i \in N}$. Μια περίοδος κίνησης i μπορεί να περιγραφεί πλήρως από το διάνυσμα $(\mathbf{p}_{i-1}, \mathbf{p}_i, v_i, \tau_{p,i})$. Όταν αναφερόμαστε απλά σε μια μοναδική τυχαία μεταβλητή της στοχαστικής διαδικασίας, παραλείπουμε το δείκτη i και απλά γράφουμε \mathbf{P} , V ή T_p . Οι τιμές για το χρόνο παύσης επιλέγονται από μια τυχαία κατανομή $f_{T_p}(\tau_p)$ που περιορίζεται στο διάστημα $[0, \tau_{p,max}]$ με $\tau_{p,max} < \infty$ και έχει μια καλά ορισμένη αναμενόμενη τιμή $E\{T_p\}$. Γενικά, η ταχύτητα επιλέγεται επίσης από μια ομοιόμορφη κατανομή $f_V(v)$ στο διάστημα $[v_{min}, v_{max}]$ με $v_{min} > 0$ και $v_{max} < \infty$.



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση κίνησης στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

3.3. Μήκος και διάρκεια μιας μετάβασης

Στην έρευνα για τα ασύρματα δίκτυα που βασίζεται σε προσομοίωση, είναι συχνά επιθυμητό να συγκρίνονται μεταξύ τους αποτελέσματα προσομοίωσης, τα οποία έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικά τυχαία μοντέλα κινητικότητας. Για να το επιτύχουμε αυτό, ορίζουμε ένα μέτρο για το «βαθμό της κινητικότητας» ενός σεναρίου προσομοίωσης. Λόγω όμως του μεγάλου πλήθους μοντέλων κινητικότητας που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία και των διαφορετικών παραμέτρων τους, ένας τέτοιος ορισμός δεν είναι καθόλου εύκολος. Ωστόσο, μπορούμε να θεωρήσουμε πως δύο είναι οι παράμετροι κινητικότητας που παρουσιάζουν ξεχωριστό ενδιαφέρον σε όλα τα μοντέλα:

- *Συμπεριφορά κίνησης*: Υπάρχει σταθερή ταχύτητα ή μια κατανομή ταχύτητας; Πότε και πώς ένας κόμβος αλλάζει την ταχύτητά του;
- *Συμπεριφορά αλλαγής κατεύθυνσης*: Ποια είναι η συχνότητα αλλαγής της κατεύθυνσης; Πώς ένας κόμβος αλλάζει την κατεύθυνσή του;

Για παράδειγμα, στο ευρέως χρησιμοποιούμενο Μοντέλο Τυχαίας Κατεύθυνσης [1], που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο χρόνος μεταξύ δύο γεγονότων αλλαγής κατεύθυνσης μπορεί να λαμβάνεται από μια ομοιόμορφη κατανομή. Ο χρόνος αυτός είναι ανεξάρτητος από την ταχύτητα του κόμβου και αν μάλιστα χρησιμοποιείται ένα τοροειδές σύνορο [2], είναι ανεξάρτητος και από το σχήμα της περιοχής. (Σημείωση: Το Μοντέλο Τυχαίας Κατεύθυνσης που επιλέξαμε στις προσομοιώσεις μας δεν επιλέγει χρόνο μετάβασης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης αλλά μήκος μετάβασης, επομένως, στην περίπτωση αυτή ο χρόνος μετάβασης εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης).

Σε αντίθεση με τα πιο πάνω, το μοντέλο Τυχαίων Στάσεων συσχετίζει τη συμπεριφορά αλλαγής της ταχύτητας και της κατεύθυνσης. Πλέον, ο χρόνος μεταξύ δύο γεγονότων αλλαγής της κατεύθυνσης δεν είναι μια ρυθμιζόμενη παράμετρος του μοντέλου, αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα των κόμβων καθώς και το σχήμα και το μέγεθος της περιοχής. Για μια δεδομένη περιοχή, υψηλότερη ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη συχνότητα αλλαγής κατεύθυνσης.

Στην παράγραφο αυτή μελετούμε το χρόνο μεταξύ δύο γεγονότων αλλαγής κατεύθυνσης στο μοντέλο Τυχαίων Στάσεων. Αρχικά εξετάζεται το μήκος μετάβασης (transition length), δηλαδή η Ευκλείδεια απόσταση που διανύει ένας κόμβος κατά τη διάρκεια μιας περιόδου κίνησης μεταξύ δύο σημείων στάσης. Ορίζεται η ακολουθία αυτών των αποστάσεων ως μια στοχαστική διαδικασία και παρουσιάζονται οι εργοδικές της ιδιότητες. Στη συνέχεια, δίνονται αναλυτικές σχέσεις για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διαδικασίας και για τις δύο πρώτες ροπές της. Συγκεκριμένα, μελετούμε αρχικά ένα μονοδιάστατο μοντέλο και ακολούθως θεωρούμε μια ορθογώνια περιοχή. Τέλος, επεξηγείται η μετατροπή του μήκους μετάβασης σε χρόνο μετάβασης και συζητείται ακόμη η επίδραση του χρόνου παύσης. Ανάμεσα στα αποτελέσματα, εξάγονται σχέσεις για τη μέση διάρκεια μιας περιόδου κίνησης με ομοιόμορφη και διακριτή κατανομή της ταχύτητας των κόμβων [16].

3.3.1. Στοχαστική διαδικασία του μήκους μετάβασης

Όπως έχει οριστεί προηγουμένως, η στοχαστική διαδικασία που αναπαριστά την κίνηση ενός κόμβου με δείκτη j δίνεται από την ακολουθία των τυχαίων σημείων στάσης $P_0^{(j)}, P_1^{(j)}, \dots$. Η αντίστοιχη διαδικασία που περιγράφει τις αποστάσεις μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων στάσης δίνεται ως ακολούθως:

$$\{L_i^{(j)}\}_{i \in \mathbb{N}} = L_1^{(j)}, L_2^{(j)}, L_3^{(j)}, \dots, \text{ όπου } L_i^{(j)} = \|P_i^{(j)} - P_{i-1}^{(j)}\| \quad (3.3)$$

Ένα δείγμα αυτής της διαδικασίας γράφεται ως $\{L_i^{(j)}\}$. Αν και τα τυχαία σημεία στάσης είναι εξ' ορισμού i.i.d., οι αποστάσεις δεν είναι στοχαστικά ανεξάρτητες, ουσιαστικά επειδή το τελικό σημείο μιας περιόδου κίνησης i είναι το σημείο εκκίνησης της αμέσως επόμενης περιόδου κίνησης $i+1$.

Ας εξετάσουμε τώρα την αναμενόμενη τιμή του L , η οποία μπορεί να ερμηνευθεί με δύο τρόπους:

$$E\{L\} = \underbrace{\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L_1^{(j)}}_{\text{χρονικός μέσος για τον κόμβο } j} = \underbrace{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_1^{(j)}}_{\text{μέσος συνόλου κατά την περίοδο } i} \quad (3.4)$$

Περιφραστικά, ο χρονικός μέσος (time average) του μήκους μετάβασης που λαμβάνεται από ένα μοναδικό κόμβο j σε μια μεγάλης διάρκειας προσομοίωση ($m \rightarrow \infty$) είναι ίσος με τον μέσο συνόλου (ensemble average) μιας συγκεκριμένης περιόδου i σε μια διαδικασία RWP με πολλούς κόμβους ($n \rightarrow \infty$). Επομένως, στην ορολογία των τυχαίων διαδικασιών, συμπεραίνουμε πως για το μοντέλο κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων ισχύει η ιδιότητα της εργοδικότητας της μέσης τιμής όσον αφορά στο μήκος μετάβασης.

Αν και το αποτέλεσμα αυτό είναι διαισθητικά πειστικό, η απόδειξη δεν είναι τετριμμένη, από τη στιγμή που οι τυχαίες μεταβλητές L_1, L_2, L_3, \dots δεν είναι στοχαστικά ανεξάρτητες. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι «το τελευταίο σημείο στάσης ισούται με το επόμενο σημείο εκκίνησης», η ιδιότητα της εργοδικότητας εξακολουθεί να ισχύει, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια. Έστω ότι κοιτάζουμε μια τυχαία διαδικασία που δίνεται από τη σχέση:

$$\{L_{2i-1}\}_{i \in \mathbb{N}} = L_1, L_3, L_5, \dots \quad (3.5)$$

δηλαδή κοιτάζουμε μόνο κάθε δεύτερη μεταβλητή της αρχικής διαδικασίας των τυχαίων αποστάσεων. Το μήκος L_1 είναι μια ντετερμινιστική συνάρτηση των P_0 και P_1 , το μήκος L_3 είναι μια ντετερμινιστική συνάρτηση των P_2 και P_3 κ.ο.κ. Αφού τα P_0, P_1, P_2, \dots είναι i.i.d. τυχαίες μεταβλητές, συνεπάγεται πως τα μήκη L_1, L_3, \dots είναι επίσης ανεξάρτητα. Κατά συνέπεια, η ιδιότητα της εργοδικότητας μέσης τιμής γίνεται αμέσως φανερή σε αυτήν την υπακολουθία, επειδή τόσο ο χρονικός μέσος όσο και ο μέσος συνόλου

σχηματίζονται από αμοιβαία ανεξάρτητες μεταβλητές. Το ίδιο θα ισχύει και για την υπακολουθία:

$$\{L_{2i}\}_{i \in \mathbb{N}} = L_2, L_4, L_6, \dots \quad (3.6)$$

Συνδυάζοντας τώρα τις δύο αυτές υπακολουθίες, δεν αλλάζει η ασυμπτωτική συμπεριφορά των χρονικών μέσων της συνδυασμένης διαδικασίας, επομένως η εξίσωση (3.4) ισχύει. Με παρόμοιο τρόπο, μπορεί κανείς να παρατηρήσει και την ιδιότητα της εργοδικότητας της κατανομής για τη διαδικασία αυτή.

Σε σχέση με το πρόβλημα μας, οι ιδιότητες εργοδικότητας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπονοούν τα ακόλουθα: για τον καθορισμό της κατανομής ή της αναμενόμενης τιμής του μήκους και της διάρκειας μετάβασης, που παρατηρούνται από ένα μόνο κόμβο, ο οποίος ακολουθεί το μοντέλο Τυχαίων Στάσεων, η ανάλυση μπορεί να απλοποιηθεί θεωρώντας μόνο την κατανομή της απόστασης μεταξύ δύο ανεξάρτητων σημείων που τοποθετούνται ομοιόμορφα σε τυχαία θέση στην περιοχή του συστήματος. Αυτή η παρατήρηση επιτρέπει τη μεταφορά των αποτελεσμάτων της θεωρίας των γεωμετρικών πιθανοτήτων στο πρόβλημά μας. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, δεν κάνουμε καμία διάκριση ανάμεσα στην «απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων σημείων στάσης» και στην «απόσταση μεταξύ δύο ανεξάρτητων τυχαίων σημείων που δειγματοληπτούνται από μια ομοιόμορφη κατανομή». Και οι δύο παριστάνονται με την τυχαία μεταβλητή L .

3.3.2. Μήκος μετάβασης σε ένα μονοδιάστατο τμήμα γραμμής

Θεωρούμε πρώτα ένα μονοδιάστατο τμήμα γραμμής $[0, \alpha]$. Δύο τυχαία σημεία τοποθετούνται ομοιόμορφα πάνω σε αυτό το τμήμα, δηλαδή η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της θέσης ενός σημείου $\mathbf{P} = P_x$ είναι:

$$f_{P_x}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha}, & \text{για } 0 \leq x \leq \alpha \\ 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (3.7)$$

Δεδομένου ότι τα δύο σημεία είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται από τη σχέση:

$$f_{P_{x_1} P_{x_2}}(x_1, x_2) = f_{P_x}(x_1) f_{P_x}(x_2) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha^2}, & \text{για } 0 \leq x_1, x_2 \leq \alpha \\ 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (3.8)$$

Η απόσταση μεταξύ δύο τυχαίων σημείων ορίζεται ως $L = |P_{x_1} - P_{x_2}|$. Η πιθανότητα η απόσταση να είναι μικρότερη από μια δοσμένη τιμή l μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση της από κοινού συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας στην περιοχή που ορίζεται από τις σχέσεις $D = |x_1 - x_2| \leq l$ στο χώρο $x_1 - x_2$, δηλαδή:

$$P(L \leq l) = \iint_D f_{P_{x_1} P_{x_2}}(x_1, x_2) dx_2 dx_1, \quad (3.9)$$

για $0 \leq l \leq a$. Είναι φανερό πως $P(L \leq l) = 1$ για $l > a$. Λαμβάνοντας υπόψη τα όρια τόσο του D όσο και της $f_{P_{x_1} P_{x_2}}(x_1, x_2)$, λαμβάνουμε την αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας:

$$P(L \leq l) = \frac{1}{a^2} \int_0^l \int_0^{x_1+l} dx_2 dx_1 + \int_l^{a-l} \int_{x_1-l}^{x_1+l} dx_2 dx_1 + \int_{a-l}^a \int_{a-x_1-l}^a dx_2 dx_1 = -\frac{1}{a^2} l^2 + \frac{2}{a} l. \quad (3.10)$$

Η παράγωγος αυτής της συνάρτησης ως προς l δίνει εξ' ορισμού την επιθυμητή συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας:

$$f_L(l) = \frac{\partial}{\partial l} P(L \leq l) = -\frac{2}{a^2} l + \frac{2}{a}, \quad (3.11)$$

για $0 \leq l \leq a$ και $f_L(l) = 0$ αλλιώς. Η αναμενόμενη απόσταση είναι:

$$E\{L\} = \int_0^a l f_L(l) dl = \frac{1}{3} a \quad (3.12)$$

και η δεύτερη ροπή της δίνει:

$$E\{L^2\} = \int_0^a l^2 f_L(l) dl = \frac{1}{6} a^2 \quad (3.13)$$

Με τα πιο πάνω αποτελέσματα για την εργοδικότητα, παρατηρούμε πως αυτές οι στοχαστικές ιδιότητες της απόστασης μεταξύ ενός ζευγαριού ανεξάρτητων και ομοιόμορφα κατανεμημένων σημείων παριστάνουν επίσης τις στοχαστικές ιδιότητες της μετακινούμενης απόστασης ενός κόμβου μέσα σε μια περίοδο (μήκος μετάβασης) στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων.

3.3.3. Μήκος μετάβασης σε ορθογώνια περιοχή

Ας θεωρήσουμε τώρα μια κίνηση που ακολουθεί το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε μια ορθογώνια περιοχή μεγέθους $a \times b$ και ας προσπαθήσουμε πάλι να εξαγάγουμε την κατανομή του μήκους μετάβασης L . Υποθέτουμε, χωρίς απώλεια της γενικότητας, ότι $a \geq b$. Η χωρική κατανομή των δισδιάστατων σημείων στάσης $\mathbf{P} = (P_x, P_y)$ δίνεται τώρα από την ομοιόμορφη κατανομή:

$$f_{P_x, P_y}(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{ab}, & \text{για } 0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, \\ 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (3.14)$$

Η απόσταση μεταξύ δύο σημείων $\mathbf{P}_1 = (P_{x1}, P_{y1})$ και $\mathbf{P}_2 = (P_{x2}, P_{y2})$ είναι:

$$L = \|\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1\| = \sqrt{|P_{x1} - P_{x2}|^2 + |P_{y1} - P_{y2}|^2} = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} \quad (3.15)$$

Σημειώνεται πως η τυχαία μεταβλητή $L_x = |P_{x1} - P_{x2}|$ παριστάνει την τυχαία απόσταση μεταξύ δύο ομοιόμορφα κατανεμημένων συντεταγμένων P_{x1} και P_{x2} σε ένα μονοδιάστατο τμήμα γραμμής $[0, a]$. Επομένως, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της δίνεται από την εξίσωση (11). Το ίδιο ισχύει για την τυχαία μεταβλητή $L_y = |P_{y1} - P_{y2}|$ αν αντικαταστήσουμε τη διάσταση a με τη διάσταση b . Επιπρόσθετα, οι δύο τυχαίες αποστάσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και συνεπώς η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των L_x και L_y δίνεται από τη σχέση:

$$f_{L_x, L_y}(l_x, l_y) = f_{L_x}(l_x) f_{L_y}(l_y) = \frac{4}{a^2 b^2} (-l_x + a)(-l_y + b) \quad (3.16)$$

για $0 \leq l_x \leq a$ και $0 \leq l_y \leq b$, και 0, αλλιώς. Γνωρίζοντας αυτή την έκφραση, μπορούμε να εξάγουμε την από κοινού αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(L \leq l)$ με ολοκλήρωση της $f_{L_x, L_y}(l_x, l_y)$ πάνω στην κυκλική περιοχή $D = l_x^2 + l_y^2 \leq l$ στο σύστημα $l_x - l_y$, δηλαδή:

$$P(L \leq l) = \iint_D f_{L_x, L_y}(l_x, l_y) dl_y dl_x \quad (3.17)$$

Όπως και στη μονοδιάστατη περίπτωση, δεν είναι δυνατόν να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα με απλό τρόπο, δηλαδή, αντικαθιστώντας το δεξί μέλος της (3.16) στην (3.17), αλλά πρέπει να λάβουμε υπόψη πως $f_{L_x, L_y}(l_x, l_y) = 0$ για $l_x > a$ και $l_y > b$. Επομένως, ξεχωρίζουμε τρεις περιπτώσεις:

$$P(L \leq l) = \begin{cases} \int_0^l \int_0^{\sqrt{l^2 - l_x^2}} f(l_x, l_y) dl_y dl_x, & \text{για } 0 \leq l \leq b, \\ \int_0^b \int_0^{\sqrt{l^2 - b^2}} f(l_x, l_y) dl_y dl_x + \int_0^{\sqrt{l^2 - l_x^2}} \int_{\sqrt{l^2 - b^2}}^l f(l_x, l_y) dl_y dl_x, & \text{για } b \leq l \leq a, \\ \int_0^b \int_0^{\sqrt{l^2 - b^2}} f(l_x, l_y) dl_y dl_x + \int_0^{\sqrt{l^2 - l_x^2}} \int_0^a f(l_x, l_y) dl_y dl_x, & \text{για } a \leq l \leq \sqrt{a^2 + b^2}. \end{cases} \quad (3.18)$$

Επιλύοντας αυτά τα ολοκληρώματα, παίρνοντας την παράγωγο ως προς l και πραγματοποιώντας κάποιες τριγωνομετρικές απλοποιήσεις, οδηγούμαστε στο παρακάτω αποτέλεσμα:

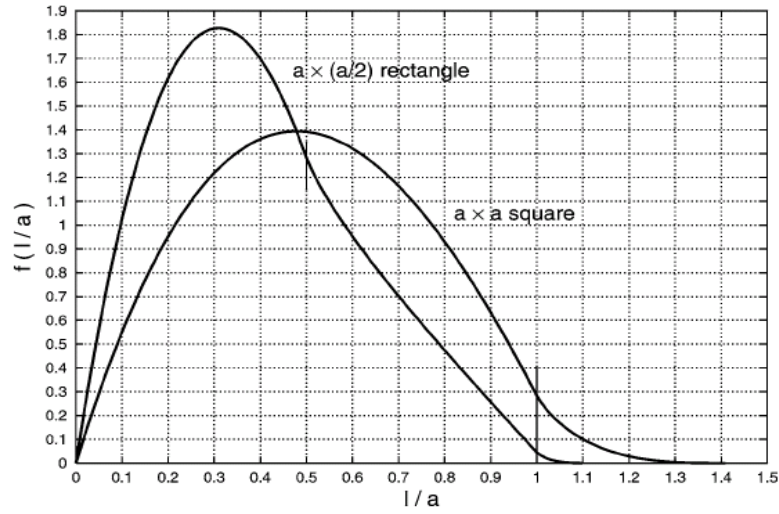
Αποτέλεσμα: Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης L των κόμβων που κινούνται σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε μια ορθογώνια περιοχή μεγέθους $a \times b$, με $a \geq b$, είναι:

$$f_L(l) = \frac{4l}{a^2 b^2} f_0(l), \quad (3.19)$$

όπου

$$f_0(l) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} ab - al - bl + \frac{1}{2} l^2, & \text{για } 0 \leq l \leq b, \\ ab \arcsin \frac{b}{l} + a\sqrt{l^2 - b^2} - \frac{1}{2} b^2 - al, & \text{για } b < l < a, \\ ab \arcsin \frac{b}{l} + a\sqrt{l^2 - b^2} - \frac{1}{2} b^2 \\ - ab \arccos \frac{a}{l} + b\sqrt{l^2 - a^2} - \frac{1}{2} a^2 - \frac{1}{2} l^2, & \text{για } a \leq l \leq \sqrt{a^2 + b^2}, \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.20)$$

Το ίδιο αποτέλεσμα για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της απόστασης μεταξύ δύο τυχαίων σημείων είχε εξαχθεί από τον Gosh το 1951 [3] χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό σε πολικές συντεταγμένες.



Σχήμα 3.2: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης κόμβων που ακολουθούν το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε ορθογώνια και σε τετράγωνη περιοχή

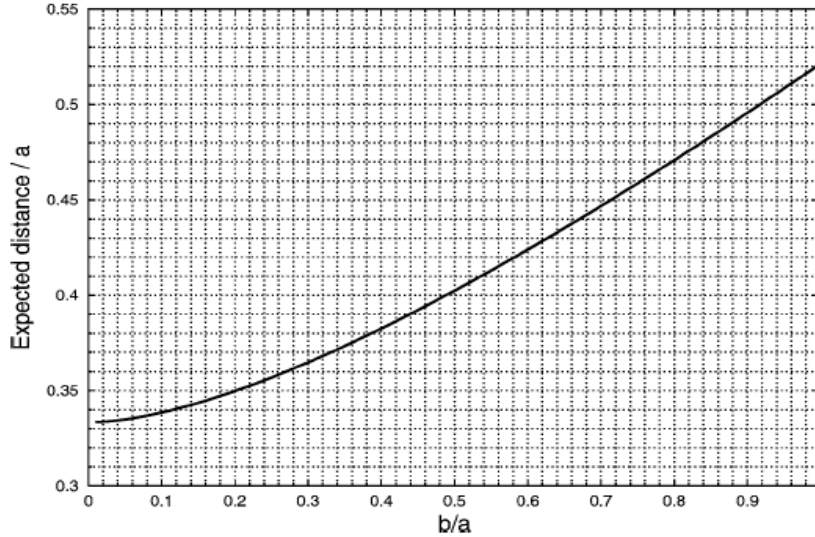
Εισάγοντας το κανονικοποιημένο μήκος μετάβασης $\hat{L} = L/a$, παρουσιάζουμε στο σχήμα 3.2 τη συνάρτηση $f_{\hat{L}}(\hat{l})$ για περιοχές μεγέθους $a \times a$ και $a \times (a/2)$. Για αυθαίρετες τιμές του a , η τιμή της $f_L(l)$ υπολογίζεται από τη σχέση $f_L(l) = \left(\frac{1}{a}\right) f_{\hat{L}}(\hat{l})$. Η αναμενόμενη τιμή του μήκους μετάβασης L [3] προκύπτει:

$$E\{L\} = \frac{1}{15} \left[\frac{a^3}{b^2} + \frac{b^3}{a^2} + \sqrt{a^2 + b^2} \left(3 - \frac{a^2}{b^2} - \frac{b^2}{a^2} \right) \right] + \frac{1}{6} \left[\frac{b^2}{a} \operatorname{arccosh} \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{b} + \frac{a^2}{b} \operatorname{arccosh} \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a} \right], \quad (3.21)$$

Όπου $\operatorname{arccosh}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η καμπύλη της $E\{L\}/a$ συναρτήσει του b/a . Για παράδειγμα, το αναμενόμενο μήκος σε μια τετράγωνη περιοχή μεγέθους $a \times a$ είναι $E\{L\} = 0.5214a$ και σε μια ορθογώνια περιοχή μεγέθους $a \times (a/2)$ είναι $E\{L\} = 0.402a$. Η δεύτερη ροπή του μήκους μετάβασης L δίνεται από τη σχέση:

$$E\{L^2\} = \frac{1}{6}(a^2 + b^2) \quad (3.22)$$

Παρατηρούμε πως για $b \rightarrow 0$ προκύπτουν οι αντίστοιχες ροπές για τη μονοδιάστατη περίπτωση, δηλαδή $\lim_{b \rightarrow 0} E\{L\} = \frac{1}{3}a$ και $\lim_{b \rightarrow 0} E\{L^2\} = \frac{1}{6}a^2$.



Σχήμα 3.3: Αναμενόμενο μέσο μήκος μετάβασης κόμβων σε μια $a \times b$ ορθογώνια περιοχή στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

3.3.4. Χρόνος μετάβασης

Ας εφαρμόσουμε τώρα τα αποτελέσματά μας για το μήκος μετάβασης για να υπολογίσουμε τις στοχαστικές ιδιότητες του χρόνου μετάβασης (transition time), δηλαδή του χρόνου που χρειάζεται ένας κόμβος για να κινηθεί από ένα σημείο στάσης στο επόμενο σημείο στάσης. Η αντίστοιχη τυχαία μεταβλητή συμβολίζεται με T και ένα δείγμα γράφεται ως τ .

Αν η ταχύτητα ενός κόμβου είναι σταθερή κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας κίνησης, δηλαδή $V_i = v = \text{const} \forall i$ και $v > 0$, τότε έχουμε:

$$T = \frac{1}{v}L. \quad (3.23)$$

Επομένως, ο αναμενόμενος χρόνος μετάβασης είναι:

$$E\{T\} = \frac{1}{v}E\{L\}. \quad (3.24)$$

και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$f_T(\tau) = v f_L(v\tau), \quad (3.25)$$

όπου $E\{L\}$ και f_L λαμβάνονται από τις σχέσεις (3.20) - (3.21), αντίστοιχα.

Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση κατά την οποία η ταχύτητα ενός κόμβου δεν είναι σταθερή αλλά επιλέγεται από μια τυχαία κατανομή $f_V(v)$ σε κάθε σημείο στάσης (και ακολούθως παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια μιας μετάβασης). Απαιτούμε $v_{\min} \leq V \leq v_{\max}$ και $v_{\min} > 0$ και μπορούμε να γράψουμε:

$$T = \frac{L}{V}. \quad (3.26)$$

Στην περίπτωση αυτή, σχηματίζεται η τυχαία μεταβλητή T ως μια συνάρτηση $g(L, V) = \frac{L}{V}$ των δύο τυχαίων μεταβλητών L και V . Γενικά, η αναμενόμενη τιμή μιας μεταβλητής $g(L, V)$ μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με την από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_{LV}(l, v)$ όπως στο [4]:

$$E\{g(L, V)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(l, v) f_{LV}(l, v) dl dv. \quad (3.27)$$

Στην περίπτωση που μελετάμε, οι L και V είναι ανεξάρτητες και επομένως η από κοινού σ.π.π. είναι η $f_{LV}(l, v) = f_L(l) f_V(v)$. Η αναμενόμενη τιμή μπορεί μετά να απλοποιηθεί στην εξής σχέση:

$$E\{T\} = E\{L\} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \frac{1}{v} f_V(v) dv. \quad (3.28)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της $T = \frac{L}{V}$ είναι δυνατόν να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$f_T(\tau) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} v f_L(v\tau) f_V(v) dv \quad (3.29)$$

για $0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$ με $\tau_{\max} = l_{\max} / v_{\min}$ και $f_T(\tau) = 0$, αλλιώς. Ας εξηγήσουμε αυτά τα αποτελέσματα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια χρησιμοποιώντας τρεις τυπικές κατανομές ταχύτητας: μια συνεχή ομοιόμορφη κατανομή, μια διακριτή κατανομή και μια συνεχή κατανομή βήτα.

I. Ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας

Αν εφαρμόσουμε μια ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας στο διάστημα $[v_{\min}, v_{\max}]$, ο αναμενόμενος χρόνος μετάβασης θα είναι:

$$E\{T\} = \frac{\ln(v_{\max}/v_{\min})}{v_{\max} - v_{\min}} E\{L\}. \quad (3.30)$$

Παρατηρούμε πως το $\lim_{v_{\max} \rightarrow v_{\min}} E\{T\} = E\{L\}/v_{\min}$ αντιστοιχεί στο αποτέλεσμα (3.24) για σταθερή ταχύτητα $v = v_{\min}$. Επίσης, ως σημειωθεί πως ο αναμενόμενος χρόνος για $v_{\min} = 0$ είναι απροσδιόριστος. Αυτό είναι πολύ λογικό, επειδή αν ένας κόμβος επιλέξει $V = 0$ η μετάβαση θα διαρκέσει άπειρο χρόνο. Αν η μέγιστη ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί ως πολλαπλάσιο της ελάχιστης ταχύτητας, δηλαδή $v_{\max} = kv_{\min}$, με $k > 1$, καταλήγουμε στην εξής σχέση:

$$E\{T\} = \frac{\ln k}{k-1} \frac{E\{L\}}{v_{\min}}. \quad (3.31)$$

II. Διακριτή κατανομή ταχύτητας

Παρατηρούμε τώρα έναν κόμβο, ο οποίος επιλέγει την ταχύτητά του από ένα σύνολο J διακριτών τιμών, $\{v_1, \dots, v_j, \dots, v_J\}$, με μια συγκεκριμένη πιθανότητα, p_j , για κάθε τιμή.

Είναι φανερό, ότι πρέπει να ισχύει $\sum_{j=1}^J p_j = 1$. Μια τέτοια διακριτή κατανομή ταχύτητας

μπορεί να εκφραστεί μέσω της $f_V(v) = \sum_{j=1}^J p_j \delta(v - v_j)$, όπου με $\delta(x)$ δηλώνεται η

συνάρτηση δέλτα Dirac. Η τελευταία έχει τις ιδιότητες $\delta(x) = 0$ για $x \neq 0$, $\delta(0) = \infty$ και $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$. Ο αναμενόμενος χρόνος μετάβασης δίνεται επομένως από τη σχέση:

$$E\{T\} = E\{L\} \sum_{j=1}^J \frac{p_j}{v_j}. \quad (3.32)$$

III. Βήτα κατανομή ταχύτητας

Μια μη ομοιόμορφη, συνεχής κατανομή ταχύτητας, η οποία περιορίζεται εντός των τιμών v_{\min} και v_{\max} , μπορεί να εκφραστεί σε όρους της κατανομής βήτα:

$$f_V(v) = \frac{1}{B(\mu_1, \mu_2)} \frac{v_*^{\mu_1-1} (1-v_*)^{\mu_2-1}}{v_{\max} - v_{\min}}. \quad (3.33)$$

με $v_* = (v - v_{\min}) / (v_{\max} - v_{\min})$. Η συνάρτηση βήτα $B(\mu_1, \mu_2)$ ορίζεται από το ολοκλήρωμα

$\int_0^1 z^{\mu_1-1} (1-z)^{\mu_2-1} dz$. Εξαρτώμενη από τις μη μηδενικές παραμέτρους μ_1 και μ_2 , η

συνάρτηση $f_V(v)$ παίρνει μια ποικιλία σχημάτων. Για παράδειγμα, αν $\mu_1 > 1$ και $\mu_2 > 1$, η συνάρτηση στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω με $f_V(v) \rightarrow 0$ τόσο για $V = v_{\min}$ όσο και για

v_{\max} . Αν $\mu_1 = \mu_2$, η καμπύλη είναι συμμετρική γύρω από το $(1/2)(v_{\max} - v_{\min})$, διαφορετικά το μέγιστο ή το ελάχιστο μετατοπίζεται πιο κοντά στο v_{\max} ή στο v_{\min} . Για $\mu_1 = \mu_2 = 1$, παρατηρείται μια ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας. Η μέση ταχύτητα δίνεται πάντοτε από την ακόλουθη σχέση: $E\{V\} = 1/(\mu_1 + \mu_2)(\mu_1 v_{\max} + \mu_2 v_{\min})$. Παραδείγματα διαγραμμάτων της κατανομής βήτα μπορούν να βρεθούν, στα [4,5]. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μεγάλη κλάση των κατανομών ταχύτητας, το ολοκλήρωμα στη σχέση (3.28) είναι πάλι επιλύσιμο και μπορούμε να υπολογίσουμε την $E\{T\}$ για μια δεδομένη περιοχή συστήματος με έναν απλό τρόπο.

3.3.5. Χρόνος μεταξύ δύο αλλαγών κατεύθυνσης

Επεκτείνουμε τώρα τη μελέτη μας στην περίπτωση κατά την οποία ένας κόμβος σταματά για ένα συγκεκριμένο χρόνο παύσης σε κάθε σημείο στάσης. Έτσι, ο συνολικός χρόνος T' μιας περιόδου στο μοντέλο Τυχαίων Στάσεων αποτελείται από το χρόνο κίνησης της μετάβασης T και το χρόνο παύσης T_p , δηλαδή:

$$T' = T + T_p \quad (3.34)$$

Αυτός ο γραμμικός συνδυασμός των δύο ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών παράγει μια αναμενόμενη τιμή:

$$E\{T'\} = E\{T\} + E\{T_p\} \quad (3.35)$$

και τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$f_{T'}(\tau') = \int_0^{\tau'} f_T(\tau) f_{T_p}(\tau' - \tau) d\tau \quad \text{για } \tau' \geq 0. \quad (3.36)$$

Η τιμή της $E\{T'\}$ παριστάνει το μέσο χρόνο μεταξύ δύο αλλαγών κατεύθυνσης. Επομένως, η συχνότητα αλλαγής της κατεύθυνσης δίνεται από τη σχέση $1/E\{T'\}$ σε μονάδα 1/s.

Παράδειγμα: Θεωρούμε μια περιοχή προσομοίωσης $1000 \times 500 \text{ m}^2$. Οι κόμβοι κινούνται σύμφωνα με το μοντέλο Τυχαίων Στάσεων με σταθερή ταχύτητα $v = 10 \text{ m/s}$ και χρόνο παύσης που λαμβάνεται από μια εκθετική κατανομή $f_{T_p}(\tau_p) = \mu e^{-\mu\tau_p}$ με μέσο χρόνο παύσης $\mu = 10 \text{ s}$. Το αναμενόμενο μήκος μετάβασης είναι $E\{L\} = 402 \text{ m}$. Ο αναμενόμενος συνολικός χρόνος $E\{T'\} = 40.2 \text{ s} + 10 \text{ s} = 50.2 \text{ s}$. Αν αυξήσουμε την ταχύτητα στα $v = 20 \text{ m/s}$, λαμβάνουμε $E\{T'\} = 20.1 \text{ s} + 10 \text{ s} = 30.1 \text{ s}$, δηλαδή ένας κόμβος αναμένεται να αλλάζει την κατεύθυνσή του πιο συχνά. Αυξάνοντας επίσης την περιοχή προσομοίωσης σε $1000 \times 1000 \text{ m}^2$, ελαττώνουμε τη συχνότητα αλλαγής της

κατεύθυνσης. Τότε θα έχουμε $E\{T'\} = 62.1s$ (για $v = 10m/s$) και $E\{T'\} = 36.05s$ (για $v = 20m/s$).

Αυτό το παράδειγμα υποδηλώνει πως, στο μοντέλο RWP, το μέτρο κινητικότητας «ταχύτητα» καθώς και το μέγεθος και το σχήμα της περιοχής προσομοίωσης επηρεάζουν το μέτρο κινητικότητας «αλλαγή κατεύθυνσης». Με άλλα λόγια, τα δύο αυτά μέτρα, «ταχύτητα» και «αλλαγή κατεύθυνσης», δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ανεξάρτητες παράμετροι εισόδου στο μοντέλο αυτό.

3.4. Χωρική κατανομή των κόμβων

Στο προηγούμενο κομμάτι, μελετήσαμε την απόσταση και το χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων στάσης στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Αυτά τα σημεία στάσης, τα οποία παριστάνουν τα σημεία εκκίνησης και τερματισμού των περιόδων κίνησης ενός κόμβου, είναι εξ' ορισμού καταναμημένα ομοιόμορφα. Στην παράγραφο αυτή θα λάβουμε επίσης υπόψη τις τοποθεσίες που ένας κόμβος επισκέπτεται καθώς κινείται σε μια ευθεία γραμμή μεταξύ των δύο αυτών σημείων στάσης: εξετάζουμε τη χωρική κατανομή των κόμβων που προκύπτει από την κίνηση που εκτελούν σε μια ορθογώνια περιοχή \mathcal{A} . Και στην περίπτωση αυτή, είναι αρκετό πιο απλό να παρατηρήσουμε ένα μόνο κόμβο, επειδή κάθε κόμβος κινείται ανεξάρτητα.

Έστω ότι η τυχαία μεταβλητή $\mathbf{X} = (X, Y)$ δηλώνει την Καρτεσιανή θέση ενός κινητού κόμβου στη περιοχή \mathcal{A} σε αυθαίρετη χρονική στιγμή t . Ένα συγκεκριμένο δείγμα αυτής της μεταβλητής δηλώνεται με \mathbf{x} . Με τον ορισμό αυτό, μπορούμε να εκφράσουμε τη χωρική κατανομή ενός κόμβου σε όρους της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας

$$f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = f_{XY}(x, y) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{P\left(\left(x - \frac{\delta}{2} < X < x + \frac{\delta}{2}\right) \wedge \left(y - \frac{\delta}{2} < Y < y + \frac{\delta}{2}\right)\right)}{\delta^2}. \quad (3.37)$$

Σημειώνουμε πως, γενικά, μια μετατροπή σε πολικές συντεταγμένες $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ και $\Phi = \arctan(Y/X)$ παράγει την από κοινού κατανομή $f_{R\Phi}(r, \phi) = f_{XY}(r \cos \phi, r \sin \phi)$.

Η πιθανότητα ένας δεδομένος κόμβος να βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη υποπεριοχή $\mathcal{A}' \subset \mathcal{A}$ μπορεί να υπολογιστεί ολοκληρώνοντας την $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ στην υποπεριοχή αυτή, δηλαδή:

$$P(\text{κόμβος στην } \mathcal{A}') = P(\mathbf{X} \in \mathcal{A}') = \iint_{\mathcal{A}'} f_{XY}(x, y) dA \quad (3.38)$$

Το στοιχειώδες στοιχείο περιοχής dA ισούται με $dA = dx dy$ σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Η προκύπτουσα πιθανότητα $P(\mathbf{X} \in \mathcal{A}')$ μπορεί να ερμηνευθεί ως το ποσοστό του χρόνου που ένας συγκεκριμένος κινητός κόμβος βρίσκεται στην υποπεριοχή \mathcal{A}' κατά τη διάρκεια μιας μακράς διαδικασίας κίνησης με πολλές

μεταβάσεις. Όμως, μπορεί επίσης να ερμηνευθεί ως μέσος συνόλου αν παρατηρήσουμε μια προσομοίωση με πολλούς κινητούς κόμβους RWP ($n \gg I$). Τότε, η $E\{n'\} = nP$ (κόμβος στην A') δηλώνει τον αναμενόμενο αριθμό των κόμβων που βρίσκονται στην A' σε μια αυθαίρετα επιλεγμένη χρονική στιγμή.

Στην αρχή της προσομοίωσης, όλοι οι κόμβοι είναι τυπικά κατανομημένοι ομοιόμορφα, επομένως η $f_x(\mathbf{x})$ περιγράφεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στην περιοχή A τη χρονική στιγμή $t = 0$. Ωστόσο, όπως έχει παρατηρηθεί στα [1, 6, 7], αυτή η κατανομή αλλάζει καθώς ο κόμβος ξεκινά την κίνησή του. Αυτό συμβαίνει, επειδή τα μονοπάτια κίνησης των κόμβων τείνουν να περνούν από το κέντρο της περιοχής του συστήματος. Για παράδειγμα, ένας κόμβος που ξεκινά σε ένα σημείο στάσης κοντά στο σύνορο της περιοχής του συστήματος, είναι φανερό πως βρίσκει περισσότερα σημεία στάσης σε κατευθύνσεις προς το κέντρο της περιοχής παρά προς το σύνορο. Μάλιστα, πιο πιθανόν είναι να επιλέξει ένα σημείο προορισμού το οποίο απαιτεί από τον κόμβο να περάσει από την κεντρική περιοχή κατά τη διάρκεια της επόμενης περιόδου κίνησης. Με την πάροδο του χρόνου, και καθώς οι κόμβοι εκτελούν ένα αριθμό από περιόδους κίνησης, η κατανομή των κόμβων γίνεται ολοένα και περισσότερο μη ομοιόμορφη, με μέγιστο στο μέσο της περιοχής και με τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $f_x(\mathbf{x}) = 0$ στη γραμμή του συνόρου της περιοχής. Τελικά, μετά από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα της διαδικασίας κίνησης, επιτυγχάνεται μια στατική κατανομή (κατανομή στη σταθερή κατάσταση). Ακολουθώντας, παρουσιάζουμε αυτή τη στατική κατανομή για κίνηση Τυχαίων Στάσεων με και χωρίς χρόνο παύσης.

3.4.1. Χωρική κατανομή χωρίς χρόνο παύσης

Αρχικά εξετάζουμε το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων χωρίς χρόνο παύσης στα σημεία στάσης, δηλαδή με τους κόμβους να κινούνται συνεχώς. Όπως προτείνεται στο [8], μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αναλυτική έκφραση:

$$f_x(\mathbf{x}) = f_{XY}(x, y) \approx \frac{36}{a^6} \left(x^2 - \frac{a^2}{4} \right) \left(y^2 - \frac{a^2}{4} \right) \quad (3.39)$$

για να προσεγγίσουμε την κατανομή σε μια τετράγωνη περιοχή μεγέθους $a \times a$ που ορίζεται από τα διαστήματα $-a/2 \leq x \leq a/2$ και $-a/2 \leq y \leq a/2$. Ως συνήθως, ισχύει $\iint_A f_x(\mathbf{x}) dA = 1$. Παρατηρούμε πως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_x(\mathbf{x})$

έχει μέγιστο στο κέντρο της περιοχής του συστήματος, παρουσιάζει μια συμμετρία ως προς x και y ενώ η πιθανότητα ένας κόμβος να βρίσκεται κοντά σε σύνορο της περιοχής τείνει στο μηδέν. Η ποιότητα αυτής της προσέγγισης εκτιμάται από τους Santi και Resta στο [9]. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί πως η σχέση (3.39) προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την κατανομή που λαμβάνεται από υψηλά αξιόπιστες προσομοιώσεις. Μια σχεδόν ακριβής εξίσωση για τη χωρική κατανομή σε ένα τετράγωνο έχει εξαχθεί στο [10]. Η ασυμπτωτική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας σε ένα τμήμα γραμμής $[0, a]$ δίνεται από την εξής σχέση:

$$f_X(x) = -\frac{6}{a^3}x^2 + \frac{6}{a^2}x \quad (3.40)$$

για $0 < x < a$ και $f_X(x) = 0$ αλλιώς [8,10].

3.4.2. Χωρική κατανομή με χρόνο παύσης

Συνεχίζουμε τη μελέτη της χωρικής κατανομής των κόμβων, μελετώντας τώρα κόμβους στους οποίους επιτρέπεται να σταματήσουν για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τ_p στα σημεία στάσεων. Η προκύπτουσα χωρική κατανομή των κόμβων $f_X(\mathbf{x})$ δίνεται επομένως από την υπέρθεση δύο ξεχωριστών συνιστωσών, μια συνιστώσα παύσης και μια συνιστώσα κινητικότητας. Και οι δύο συνιστώσες είναι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας με βάρη τις πιθανότητες ο κόμβος να έχει κάνει παύση ή να κινηθεί, αντίστοιχα [9]. Έστω ότι με p_p δηλώνεται η πιθανότητα ένας δεδομένος κόμβος να κάνει παύση σε έναν τυχαία επιλεγμένο χρόνο. Μπορούμε τότε να ορίσουμε:

$$f_X(\mathbf{x}) = \underbrace{p_p f_{X,p}(\mathbf{x})}_{\text{συνιστώσα παύσης}} + \underbrace{(1-p_p) f_{X,m}(\mathbf{x})}_{\text{συνιστώσα κινητικότητας}}. \quad (3.41)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_{X,p}(\mathbf{x})$ παριστάνει τη χωρική κατανομή όλων των κόμβων που την τρέχουσα χρονική στιγμή κάνουν παύση σε κάποιο σημείο στάσης. Εφόσον τα σημεία στάσης επιλέγονται από μια ομοιόμορφη κατανομή, η $f_{X,p}(\mathbf{x})$ είναι επίσης ομοιόμορφη συνάρτηση. Κατά συνέπεια:

$$f_{X,p}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{1}{\|\mathcal{A}\|} & \text{για } \mathbf{x} \in \mathcal{A}, \\ 0 & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (3.42)$$

Η σ.π.π. $f_{X,m}(\mathbf{x})$ της συνιστώσας της κινητικότητας παριστάνει τη χωρική κατανομή όλων των κινούμενων κόμβων. Επομένως, δίνεται από τα αποτελέσματα της παραγράφου 3.3.1, δηλαδή το δεξί μέλος της (3.39) για ένα τετράγωνο.

Ας θυμηθούμε πως τ_i και $\tau_{p,i}$ δηλώνουν το χρόνο στον οποίο ένας κόμβος κινείται ή σταματά, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου i . Η πιθανότητα παύσης p_p δίνεται από το ποσοστό του χρόνου που ο κόμβος κάνει παύση κατά τη διάρκειας μιας μεγάλης σε χρόνο προσομοίωσης. Υποθέτωντας πως κάθε κόμβος σταματά για μια σταθερή χρονική περίοδο τ_p σε κάθε σημείο στάσης i (δηλαδή $T_{p,i} = \tau_p \quad \forall i$), έχουμε [9]:

$$p_p = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^m \tau_{p,i}}{\sum_{i=1}^m (\tau_{p,i} + \tau_i)} = \frac{\tau_p}{\tau_p + E\{T\}} \quad (3.43)$$

με τον αναμενόμενο χρόνο μετάβασης $E\{T\} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tau_i$ να δίνεται στην παράγραφο

3.3.4. Αν θεωρήσουμε την πιο γενική περίπτωση σύμφωνα με την οποία ο χρόνος παύσης λαμβάνεται από μια σ.π.π. $f_{T_p}(\tau_p)$ με αναμενόμενη τιμή $E\{T_p\}$, η πιθανότητα παύσης μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$p_p = \frac{E\{T_p\}}{E\{T_p\} + E\{T\}}. \quad (3.44)$$

Εφαρμόζοντας τις τιμές του p_p στη σχέση (3.41) γίνεται δυνατός ο υπολογισμός της κατανομής των κόμβων για διάφορα σενάρια. Ο Πίνακας 3.1 δείχνει κάποιες αντιστοιχίες ανάμεσα στην πιθανότητα παύσης p_p και στον αναμενόμενο χρόνο

παύσης $E\{T_p\} = \frac{p_p}{1-p_p} \cdot \frac{E\{L\}}{v}$ σε μια τετράγωνη περιοχή συστήματος μεγέθους $a \times a$.

Πίνακας 3.1

Αντιστοιχία μεταξύ πιθανότητας παύσης και αναμενόμενου χρόνου παύσης (τετράγωνη περιοχή)

p_p	0	0.1	0.161	0.2	0.5	0.658	0.9	0.951	1.0
$(v/a)E\{T_p\}$	0	0.058	0.1	0.130	0.521	1.0	4.689	10	∞

3.5. Ρυθμός αλλαγής της κυψέλης

Θα εξετάσουμε τώρα κινήσεις Τυχαίων Στάσεων σε μια περιοχή συστήματος που είναι δομημένη σε ένα πλέγμα από κυψέλες. Ενδιαφερόμαστε επίσης για τον αντίστοιχο ρυθμό αλλαγής της κυψέλης ενός κόμβου, που ορίζεται ως ο αριθμός των αλλαγών κυψέλης ανά μονάδα χρόνου. Υπάρχουν δύο λόγοι για τους οποίους μελετούμε την παράμετρο αυτή: πρώτον, το μεγάλο μας κίνητρο είναι ότι κάποιες υπηρεσίες δικτύου σε ένα κινητό δίκτυο ad hoc, όπως για παράδειγμα η Υπηρεσία Θέσης Πλέγματος (Grid Location service) [11], υποθέτουν ότι η περιοχή του συστήματος παρουσιάζει μια δομή πλέγματος και πως οι κόμβοι στέλνουν κάποια μηνύματα σηματοδότησης όποτε μετακινούνται από μια κυψέλη σε άλλη. Ένας δεύτερος λόγος, είναι ότι το μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων μπορεί να εφαρμοστεί για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της κινητικότητας ενός κόμβου σε ένα κυψελωτό δίκτυο, π.χ. σε ένα σύστημα ασύρματου LAN, όπου οι κυψέλες αναπαριστούν την ραδιοκάλυψη των σταθμών βάσης. Και στα

δύο σενάρια, το ποσό της κίνησης της σηματοδοσίας σχετίζεται με το ρυθμό αλλαγής της κυψέλης.

Για την ανάλυση μας αυτή, θεωρούμε μια ορθογώνια περιοχή συστήματος μεγέθους $a \times b$. Αυτή η περιοχή χωρίζεται σε ορθογώνιες κυψέλες ίδιου μεγέθους $\alpha \times \beta$. Το σχήμα 3.4 δίνει ένα παράδειγμα με $a = b$ και $\alpha = \beta = 3$. Μια αλλαγή κυψέλης λαμβάνει χώρα όταν ένας κόμβος διασχίζει τη γραμμή του συνόρου μεταξύ δύο κυψελών. Είναι φανερό πως η υπόθεση ορθογώνιων, μη επικαλυπτόμενων κυψελών είναι μια εξιδανίκευση για το δεύτερο σενάριο που περιγράφηκε πιο πάνω. Οι πραγματικές ραδιοκυψέλες έχουν διάφορα σχήματα και επικαλύπτονται. Επιπλέον, ο ρυθμός αλλαγής κυψέλης εξαρτάται, για παράδειγμα, από την απόφαση μεταγωγής και τον αλγόριθμο ανανέωσης της θέσης. Ωστόσο, δεδομένου ότι δεν είναι εφικτό να καθορίσουμε μια έκφραση που να καλύπτει όλες τις συγκεκριμένες περιπτώσεις, μελετούμε την πιο απλή αλλά και πιο γενική περίπτωση, το σενάριο ορθογωνικού πλέγματος.

3.5.1. Αλλαγές κυψέλης ανά μετάβαση

Ο αρχικός μας στόχος είναι να αναλύσουμε πόσα σύνορα κυψελών διασχίζει ένας κόμβος, κατά μέσο όρο, κατά τη διάρκεια μιας μετάβασης από ένα σημείο σε ένα άλλο. Η αντίστοιχη τυχαία μεταβλητή συμβολίζεται με C . Δηλώνοντας ως c_i ένα δείγμα της τυχαίας αυτής μεταβλητής στη μετάβαση i , μπορούμε να γράψουμε:

$$E\{C\} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_i. \quad (3.45)$$

Το δείγμα της τυχαίας μεταβλητής C είναι μια ντετερμινιστική συνάρτηση του τυχαίου αρχικού σημείου στάσης $\mathbf{P}_1 = (P_{x_1}, P_{y_1})$ ενός κόμβου και του επόμενου σημείου στάσης $\mathbf{P}_2 = (P_{x_2}, P_{y_2})$. Συγκεκριμένα, στη δομή πλέγματος που έχουμε, ο αριθμός των αλλαγών κυψέλης εξαρτάται μόνο από τις θέσεις των κυψελών των δύο ανεξάρτητων σημείων στάσης. Στη συνέχεια, δεικτοδοτούμε την οριζόντια θέση μιας κυψέλης με $\xi = 1, 2, \dots, \alpha$ και την κατακόρυφη θέση με $\psi = 1, 2, \dots, \beta$. Η θέση της κυψέλης ενός σημείου μπορεί επομένως να γραφεί ως (ξ, ψ) . Ένα σημείο στη θέση (x, y) αντιστοιχεί σε κυψέλη θέσης $\xi = \lceil x\alpha/a \rceil$ και $\psi = \lceil y\beta/b \rceil$, όπου με $\lceil x \rceil$ συμβολίζεται η συνάρτηση ταβάνι (ceiling function), η οποία δίνει το μικρότερο ακέραιο που είναι μεγαλύτερος ή ίσος με το όρισμα x . Αν ένας κόμβος κινείται από ένα σημείο στάσης που βρίσκεται σε μια κυψέλη (ξ_1, ψ_1) προς ένα σημείο στάσης που βρίσκεται σε μια άλλη κυψέλη (ξ_2, ψ_2) , ο αριθμός των αλλαγών κυψέλης δίνεται από την απόσταση Μανχάταν (νόρμα l_1) μεταξύ των κυψελών, δηλαδή θα έχουμε:

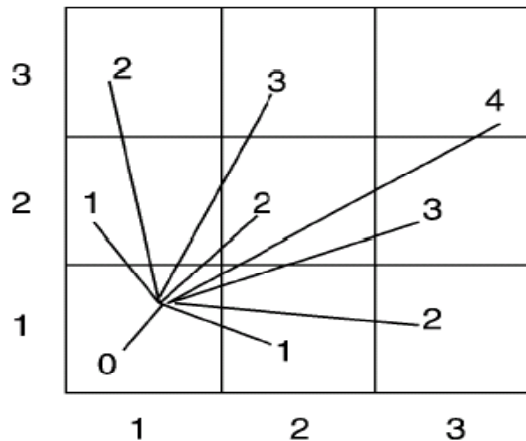
$$c(\xi_1, \psi_1, \xi_2, \psi_2) = |\xi_1 - \xi_2| + |\psi_1 - \psi_2|. \quad (3.46)$$

Η αναμενόμενη τιμή της C μπορεί ακολούθως να υπολογιστεί από το μέσο του $c(\xi_1, \psi_1, \xi_2, \psi_2)$ πάνω σε όλα τα δυνατά ζεύγη κυψελών:

$$E\{C\} = \frac{1}{\alpha^2 \beta^2} \sum_{\xi_1=1}^{\alpha} \sum_{\psi_1=1}^{\beta} \sum_{\xi_2=1}^{\alpha} \sum_{\psi_2=1}^{\beta} c(\xi_1, \psi_1, \xi_2, \psi_2). \quad (3.47)$$

Παράδειγμα: Δίνουμε ένα απλό παράδειγμα με 3 x 3 κυψέλες (βλέπε σχήμα 3.4). Μια μετάβαση από την κυψέλη (1,1) στην κυψέλη (1,1) δεν παράγει καμία αλλαγή κυψέλης, μια μετάβαση από την κυψέλη (1,2) στην (1,1) ή αντίστροφα δίνει $c=1$ αλλαγή κυψέλης, μεταξύ (2,2) και (1,1) λαμβάνουμε $c=2$ κ.ο.κ. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.47) στην (3.48) με $\alpha = \beta = 3$ παίρνουμε $E\{C\} = 1.778$ αλλαγές κυψέλης ανά μετάβαση. Παρατηρούμε ότι αν χρησιμοποιήσουμε την απόσταση Μανχάταν $|\xi_1 - \xi_2| + |\psi_1 - \psi_2|$, ο αναμενόμενος αριθμός των αλλαγών μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα $E\{C\} = E\{C_{\xi}\} + E\{C_{\psi}\}$, όπου $C_{\xi} = |\xi_1 - \xi_2|$ και $C_{\psi} = |\psi_1 - \psi_2|$ παριστάνουν τον αριθμό των οριζόντιων και κατακόρυφων αλλαγών κυψέλης, αντίστοιχα. Από τη στιγμή που οι συντεταγμένες x και y είναι ομοιόμορφα καταναμημένες, οι συντεταγμένες κυψέλης ξ και ψ είναι επίσης ομοιόμορφα καταναμημένες. Έχουμε προσεγγιστικά:

$$E\{C\} = \frac{1}{3} \left(\alpha + \beta - \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \right). \quad (3.48)$$



Σχήμα 3.4: Αλλαγές κυψέλης ανά μετάβαση

Το σχετικό λάθος αυτής της προσέγγισης, $\varepsilon / E\{C\}$, είναι μικρότερο από 1% αν $\alpha > 10$ και $\beta > 10$ και μειώνεται για αυξανόμενα α και β . Στην οριακή περίπτωση, έχουμε $\lim_{\alpha, \beta \rightarrow \infty} \varepsilon = 0$.

Χρησιμοποιώντας την απόσταση Μανχάταν ως μέτρο, η κίνηση ενός κόμβου σε μια διαγώνια γειτονική κυψέλη μετρείται πάντα ως δύο αλλαγές κυψέλης. Το κάνουμε αυτό, γιατί η πιθανότητα μια τέτοια μετάβαση να περάσει απευθείας μέσω ενός μόνο σημείου του πλέγματος τείνει στο μηδέν.

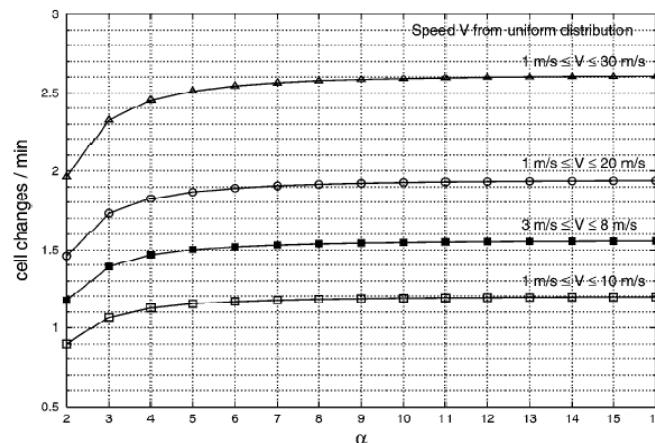
3.5.2. Ρυθμός αλλαγής κυψέλης

Ενδιαφερόμαστε στη συνέχεια για τον μέσο αριθμό αλλαγών κυψέλης ενός κόμβου ανά μονάδα χρόνου, που συμβολίζεται με $E\{C_i\}$. Αυτή η τιμή μπορεί να ερμηνευθεί ως ο «ρυθμός αλλαγής κυψέλης» ή «συχνότητα αλλαγής κυψέλης» και αποτελεί ένα καλό μέτρο για το βαθμό της κινητικότητας ενός κόμβου ή ενός συγκεκριμένου σεναρίου.

Ο αναμενόμενος αριθμός των αλλαγών κυψέλης ανά μονάδα χρόνου δίνεται από το άθροισμα όλων των αλλαγών κυψέλης σε μια μακράς διάρκειας προσομοίωση διαιρεμένος με ολόκληρο το χρόνο προσομοίωσης. Κατά συνέπεια, μπορούμε να εφαρμόσουμε τα αποτελέσματά μας από τον αριθμό των αλλαγών κυψέλης ανά μετάβαση και το χρόνο μετάβασης (παράγραφος 3.2). Γράφουμε:

$$E\{C_i\} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\sum_i^m C_i}{\sum_i^m T_i} = \frac{E\{C\}}{E\{T\}}. \quad (3.49)$$

Παράδειγμα: Ένας κόμβος κινείται σε μια τετράγωνη περιοχή συστήματος \mathcal{A} που αποτελείται από $\alpha \times \alpha$ κυψέλες, κάθε κυψέλη με πλευρά μήκους 250 m. Σε κάθε σημείο στάσης επιλέγει μια καινούρια ταχύτητα V από μια ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ v_{\min} και v_{\max} . Δεν υπάρχει χρόνος παύσης στα σημεία προορισμού. Μελετούμε τώρα το ρυθμό αλλαγής κυψέλης καθώς ο αριθμός των κυψελών α^2 αυξάνει. Χρησιμοποιώντας $\alpha \times \alpha$ κυψέλες με σταθερή πλευρά μήκους 250 m, το μέγεθος της περιοχής του συστήματος δίνεται από τη σχέση: $\|\mathcal{A}\| = 62500\alpha^2 \text{ m}^2$. Χρησιμοποιώντας τη σχέση $E\{C_i\} = E\{C\} / E\{T\}$ και με τη βοήθεια των σχέσεων (3.46), (3.47) και (3.30), υπολογίσαμε τον αριθμό των αλλαγών της κυψέλης ανά λεπτό για διαφορετικά ζευγάρια v_{\min} και v_{\max} . Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Αναμενόμενος ρυθμός αλλαγής κυψέλης $E\{C_i\}$ σε μια τετράγωνη περιοχή μεγέθους $\|\mathcal{A}\| = 62500\alpha^2 \text{ m}^2$. Η πλευρά μιας τετράγωνης κυψέλης είναι πάντα 250 m.

Για κάθε κατανομή ταχύτητας λαμβάνουμε διαφορετικό ρυθμό αλλαγών κυψέλης. Η εξάρτηση από τον αριθμό των κυψελών δείχνει μια ασυμπτωτική συμπεριφορά για αυξανόμενη περιοχή συστήματος: αν το α είναι μικρό, ο ρυθμός αλλαγών κυψέλης αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του α , όμως αν το α είναι αρκετά μεγάλο ο ρυθμός δεν εξαρτάται σχεδόν καθόλου από το α και συγκλίνει ομαλά σε μια ασυμπτωτική τιμή. Αυτό συμβαίνει, γιατί για μια μεγάλη περιοχή συστήματος, ο μέγιστος αριθμός διασχίσεων κυψελών ανά μετάβαση περιορίζεται μόνο από την ταχύτητα του κόμβου. Ο ασυμπτωτικός ρυθμός αλλαγών κυψέλης μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της σχέσης (3.48). Παριστάνει ένα μέτρο για την κινητικότητα των κόμβων σε ένα δεδομένο σενάριο. Για παράδειγμα, ένας κόμβος με ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας στο διάστημα 3,...,8 m/s έχει υψηλότερο ρυθμό αλλαγών κυψέλης από έναν κόμβο με ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας στο διάστημα 1,...,10 m/s, παρά το γεγονός πως και οι δύο τύποι κόμβων έχουν την ίδια μέση ταχύτητα $E\{C\} = 5.5m/s$.

3.6. Κατανομή διάρκειας ζεύξης και διαθεσιμότητα ζεύξης σε δίκτυο ad hoc

3.6.1. Εισαγωγή

Τα κινητά δίκτυα ad hoc έχουν τύχει τεράστιας προσοχής τα τελευταία χρόνια. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, δεν υπάρχουν υποδομές όπως σταθμοί βάσης και τα δεδομένα αναμεταδίδονται από τους ενδιάμεσους κινητούς κόμβους αν ο δέκτης βρίσκεται εκτός εμβέλειας του πομπού. Κάθε κόμβος είναι ελεύθερος να κινηθεί αυθαίρετα και επομένως η τοπολογία του δικτύου μπορεί να αλλάζει συχνά και με απρόβλεπτο τρόπο. Η διάρκεια ζεύξης (link duration) είναι μια από τις πιο σημαντικές παράμετρους του συστήματος για τον υπολογισμό της απόδοσης ενός δικτύου, η οποία ωστόσο αναφέρεται λιγότερο από τις υπόλοιπες στη βιβλιογραφία. Η διάρκεια ζεύξης είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο δύο κόμβοι παραμένουν ο ένας μέσα στην ακτίνα μετάδοσης του άλλου. Διαπιστώνουμε πως η διάρκεια ζεύξης καθορίζεται από τη σχετική ταχύτητα και την ενεργή απόσταση μεταξύ δύο κόμβων, οι οποίες καθορίζονται με τη σειρά τους από τις γωνίες των ταχυτήτων των δύο κόμβων και τη γωνία πρόσπτωσης του ενός κόμβου στο εύρος μετάδοσης του άλλου κόμβου. Στην παράγραφο αυτή λοιπόν, μελετούμε την κατανομή της διάρκειας ζεύξης του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων σε κινητά δίκτυα ad hoc. Συγκεκριμένα, εξάγουμε την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης μεταξύ δύο κόμβων. Ακολουθώντας, με βάση τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, μελετούμε τη διαθεσιμότητα ζεύξης (*link availability*) σε ένα κινητό δίκτυο ad hoc.

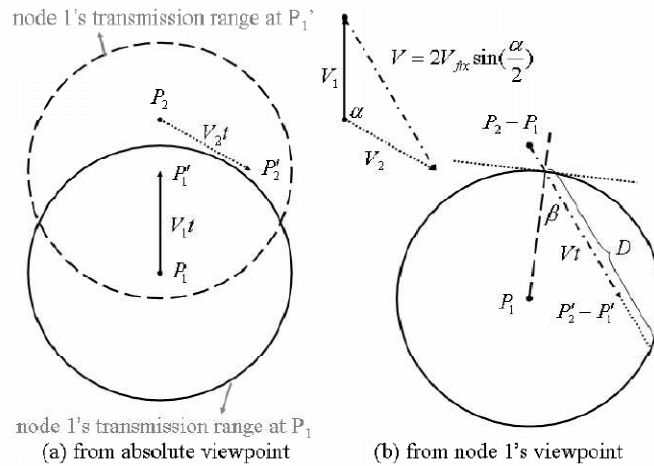
3.6.2. Αναλυτικό Μοντέλο της Διάρκειας Ζεύξης

I. Υποθέσεις και Παραδοχές

Υποθέτουμε πως κάθε κόμβος έχει την ίδια ακτίνα μετάδοσης r . Όταν δύο κόμβοι εισέλθουν ο ένας στην εμβέλεια μετάδοσης του άλλου, η ζεύξη ενεργοποιείται. Όταν οποιοσδήποτε από τους δύο φεύγει από την ακτίνα μετάδοσης του άλλου, η ζεύξη σπάει.

Ο χρόνος που διαρκεί μια ζεύξη που υφίσταται ανάμεσα σε δύο κόμβους αναφέρεται ως διάρκεια ζεύξης στη συνέχεια.

II. Διάρκεια Ζεύξης



Σχήμα 3.6: Σχέση μεταξύ δύο κόμβων

Το Σχήμα 3.6 παρουσιάζει ένα παράδειγμα μιας ζεύξης που ενεργοποιείται μεταξύ των κόμβων N_1 και N_2 . Ο κύκλος παριστάνει την εμβέλεια μετάδοσης του κόμβου που βρίσκεται στο κέντρο. Τα \vec{V}_1 και \vec{V}_2 συμβολίζουν τις ταχύτητες των κόμβων N_1 και N_2 , αντίστοιχα και P_i (P_i') δηλώνει τη θέση του κόμβου N_i . Για την εύρεση της διάρκειας της ζεύξης, παρατηρούμε τη σχετική συμπεριφορά κίνησης του κόμβου N_2 από τη θέση του κόμβου N_1 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 (b), αντί να πάρουμε ένα απόλυτο σύστημα αναφοράς των δύο κόμβων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 (a). Κατά συνέπεια, από την οπτική του N_1 , ο κόμβος N_2 κινείται με μια σχετική ταχύτητα $\vec{V} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$, με μέτρο $V = |\vec{V}|$.

Για χάρη της απλότητας, θεωρούμε αρχικά πως και οι δυο κόμβοι κινούνται με την ίδια ταχύτητα (δηλαδή, $|\vec{V}_1| = |\vec{V}_2| = V_{fix}$) και αργότερα θα επεκτείνουμε στην περίπτωση που κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες. Από το Σχήμα 3.6 η γωνία μεταξύ \vec{V}_1 και \vec{V}_2 συμβολίζεται ως α και καθορίζει το μέτρο της V , δηλαδή:

$$V = 2V_{fix} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.50)$$

Επιπρόσθετα, η σχετική ταχύτητα \vec{V} τέμνει την περιοχή μετάδοσης του κόμβου N_1 με μια ενεργή απόσταση D . Η γωνία πρόσπτωσης β στο Σχήμα 3.6 καθορίζει παρακάτω το μέγεθος D , δηλαδή:

$$D = 2r \cos(\beta) \tag{3.51}$$

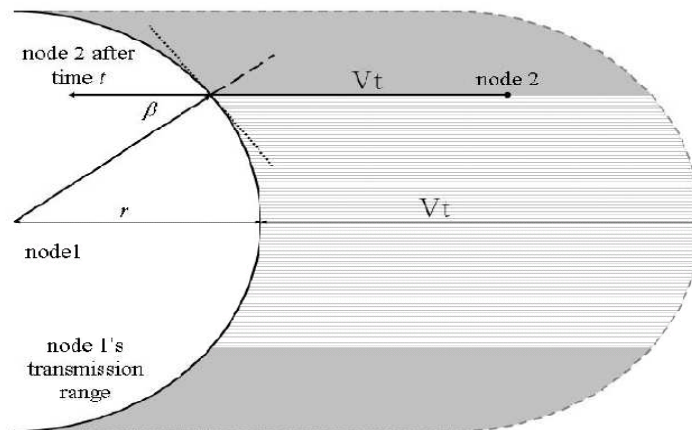
Δεδομένου ότι η ενεργή απόσταση D και η σχετική ταχύτητα V είναι αμοιβαία ανεξάρτητα μεγέθη (το οποίο θα αποδειχθεί στη συνέχεια), η αναμενόμενη διάρκεια ζεύξης T για τους κόμβους N_1 και N_2 μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E\{T\} = E\left\{\frac{D}{V}\right\} = E\{D\} \cdot E\left\{\frac{1}{V}\right\} \tag{3.52}$$

Επίσης, εφόσον οι κατανομές των V και D καθορίζονται από εκείνες των α και β αντίστοιχα, εξάγονται αρχικά οι κατανομές πιθανότητας των α και β και στη συνέχεια αυτές των V και D , με βάση τις οποίες μπορεί να εξαχθεί η κατανομή του T . Ας σημειωθεί, πως η γωνία α αναφέρεται στις πιθανές γωνίες μεταξύ \vec{V}_1 και \vec{V}_2 , δεδομένου ότι η ζεύξη έχει ενεργοποιηθεί.

III. Η συνάρτηση κατανομής της διάρκειας ζεύξης

Το Σχήμα 3.7 παρουσιάζει την πιθανή αρχική θέση που πρέπει να έχει ο N_2 ώστε να φτάσει στην εμβέλεια μετάδοσης του N_1 σε χρόνο $T_{init} = t$, δεδομένης της σχετικής κατεύθυνσης και ταχύτητας κίνησης του κόμβου N_2 ως προς τον N_1 . Αυτή αντιστοιχεί στην περιοχή που περικλείεται από τη διακεκομμένη γραμμή και την ακτίνα μετάδοσης του κόμβου N_1 . Η πιθανότητα η ζεύξη μεταξύ των κόμβων N_1 και N_2 να ενεργοποιηθεί, δεδομένου ότι η σχετική ταχύτητα είναι $V = v$ και ο κόμβος N_2 χρειάζεται χρόνο $T_{init} = t$ για να πλησιάσει τον κόμβο N_1 , είναι ίση με την πιθανότητα ο κόμβος N_2 να βρίσκεται στη σκιασμένη περιοχή του Σχήματος 3.7, δηλαδή $\Pr = \{E_{LA} | V = v, T_{init} = t\} = 2rvt \propto v$, θεωρώντας πως ο χρόνος t είναι ένα αυθαίρετο χρονικό διάστημα και r είναι μια δεδομένη τιμή.



Σχήμα 3.7: Πιθανές θέσεις του κόμβου N_2 , ώστε να φτάσει τον κόμβο N_1 σε χρόνο $T_{init} = t$

Επιπρόσθετα, η πιθανότητα να ισχύει $\beta \leq b$ δεδομένου ότι $V = v$ και $T_{init} = t$ ισούται με την πιθανότητα ο κόμβος N_2 να βρίσκεται μέσα στην γραμμοσκιασμένη περιοχή του Σχήματος 3.7. Επομένως, θα έχουμε:

$$\Pr = \{\beta \leq b | V = v, T_{init} = t\} = 2rvt \sin b \propto v \sin b. \quad (3.53)$$

Από την (3.51) παίρνουμε:

$$\Pr = \{\beta \leq b | \alpha = a, T_{init} = t\} \propto 2V_{fix} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin b \propto \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin b. \quad (3.54)$$

Επομένως,

$$\Pr = \{\alpha = a, \beta \leq b | T_{init} = t\} \propto \int_{x=0}^a f_{\alpha}(x) \sin\left(\frac{x}{2}\right) \sin b dx. \quad (3.55)$$

Εφόσον η κατανομή της γωνίας μεταξύ δύο αυθαίρετων κόμβων μπορεί να προσεγγιστεί από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, \pi]$, επειδή οι κατευθύνσεις κίνησης των κόμβων N_1 και N_2 θεωρούνται ανεξάρτητες και σχεδόν ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα $[0, 2\pi]$ (αν και αυτό δεν ισχύει παρά μόνο προσεγγιστικά για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων όπως αναφέρεται στο [12]), η σχέση (3.55) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$\int_{x=0}^a \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{x}{2}\right) \sin b dx = \frac{2}{\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{a}{2}\right)\right] \sin b \quad (3.56)$$

Δεδομένου ότι η από κοινού συνάρτηση κατανομής των γωνιών α και β στην εξίσωση (3.56), είναι ανεξάρτητη από την τιμή που παίρνει ο χρόνος T_{init} , που καθορίζει μόνο τη σκιασμένη περιοχή του σχήματος 3.7, η από κοινού συνάρτηση κατανομής των α και β μπορεί να βρεθεί ως ακολούθως:

$$F_{\alpha,\beta}(a,b) = \Pr\{\alpha \leq a, \beta \leq b\} \propto \frac{2}{\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{a}{2}\right)\right] \sin b, \quad (3.57)$$

δηλαδή $F_{\alpha,\beta}(a,b) = \frac{2}{\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{a}{2}\right)\right] \sin b \cdot K$.

Δεδομένου ότι $F_{\alpha,\beta}\left(\pi, \frac{\pi}{2}\right) = 1$, θα έχουμε $K = \frac{\pi}{2}$. Κατά συνέπεια, λαμβάνουμε:

$$F_{\alpha,\beta}(a,b) = \left[1 - \cos\left(\frac{a}{2}\right)\right] \sin b, \quad (3.58)$$

$$F_\alpha(a) = 1 - \cos\left(\frac{a}{2}\right) \quad (3.59)$$

$$F_\beta(b) = \sin b \quad (3.60)$$

Από τις (3.58), (3.59) και (3.60), προκύπτει πως οι κατανομές των α και β είναι ανεξάρτητες. Επομένως, θα έχουμε:

$$f_\alpha(a) = \frac{dF_\alpha(a)}{da} = \frac{1}{2} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad \text{και} \quad f_\beta(b) = \frac{dF_\beta(b)}{db} = \cos b. \quad (3.61)$$

Με βάση τις κατανομές των α και β , μπορούμε στη συνέχεια να εξάγουμε τις κατανομές των D και V . Από τις (3.51) και (3.59),

$$\begin{aligned} F_V(v) &= \Pr\{V \leq v\} = \Pr\left\{2V_{fix} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \leq v\right\} = F_\alpha\left(2 \sin^{-1}\left(\frac{v}{2V_{fix}}\right)\right) \\ &= 1 - \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{v}{2V_{fix}}\right)\right) = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v}{2V_{fix}}\right)^2}. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Από τις (3.51) και (3.60),

$$\begin{aligned} F_D(d) &= \Pr\{D \leq d\} = \Pr\{2r \cos \beta \leq d\} = \Pr\left\{\beta \leq \cos^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right)\right\} \\ &= 1 - F_\beta\left(\cos^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right)\right) = 1 - \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right)\right) = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2r}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.63)$$

και

$$f_D(d) = \frac{dF_D(d)}{dd} = \frac{d}{2r\sqrt{4r^2 - d^2}}. \quad (3.64)$$

Με βάση τις κατανομές των D και V που βρήκαμε στις (3.62), (3.63) και (3.64) και τη σχέση που τα συνδέει με το T από την εξίσωση (3.52), μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανομή του T . Επομένως, θα έχουμε:

$$\begin{aligned}
F_T(t) &= \Pr\{T \leq t\} = \Pr\left\{\frac{D}{V} \leq t\right\} = \Pr\left\{\frac{2r \cos \beta}{2V_{fix} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \leq t\right\} \\
&= \int_{b=0}^{\frac{\pi}{2}} f_\beta(b) \cdot \Pr\left\{\frac{2r \cos \beta}{2V_{fix} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \leq t\right\} db = \int_{b=0}^{\frac{\pi}{2}} f_\beta(b) \cdot \Pr\left\{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \geq \frac{r \cos b}{V_{fix} \cdot t}\right\} db.
\end{aligned}$$

(3.65)

Δεδομένου ότι

$$\Pr\left\{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \geq \frac{r \cos b}{V_{fix} \cdot t} \mid t \leq \frac{r}{V_{fix}}, b \leq \cos^{-1}\left(\frac{V_{fix} \cdot t}{r}\right)\right\} = \Pr\left\{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \geq \frac{r \cos b}{V_{fix} \cdot t} \geq 1\right\} = 0$$

(3.66)

μπορούμε να εκφράσουμε την κατανομή $F_{T_A}(t)$ θεωρώντας δύο περιπτώσεις:

(i) όταν $t \leq \frac{r}{V_{fix}}$,

$$\begin{aligned}
F_T(t) &= \int_{b=\cos^{-1}\left(\frac{V_{fix} \cdot t}{r}\right)}^{\frac{\pi}{2}} f_\beta(b) \cdot \Pr\left\{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \geq \frac{r \cos b}{V_{fix} \cdot t}\right\} db = \\
&= \int_{b=\cos^{-1}\left(\frac{V_{fix} \cdot t}{r}\right)}^{\frac{\pi}{2}} \cos b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r \cos b}{V_{fix} \cdot t}\right)^2} db \\
&= \frac{1}{2} - \frac{r^2 - V_{fix}^2 t^2}{2rV_{fix}t} \ln\left(\frac{r + V_{fix}t}{\sqrt{r^2 - V_{fix}^2 t^2}}\right)
\end{aligned} \tag{3.67}$$

(ii) όταν $t > \frac{r}{V_{fix}}$,

$$F_T(t) = \int_{b=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r \cos b}{V_{fix} \cdot t}\right)^2} db = \frac{1}{2} - \frac{r^2 - V_{fix}^2 t^2}{2rV_{fix}t} \ln\left(\frac{r + V_{fix}t}{\sqrt{V_{fix}^2 t^2 - r^2}}\right) \tag{3.68}$$

Από τις (3.67) και (3.68), παίρνουμε:

$$F_T(t) = \frac{1}{2} - \frac{r^2 - V_{fix}^2 t^2}{2rV_{fix}t} \ln \left(\frac{r + V_{fix}t}{\sqrt{|r^2 - V_{fix}^2 t^2|}} \right) \quad (3.69)$$

$$\text{και } f_T(t) = \frac{dF_T(t)}{dt} = \frac{r^2 + V_{fix}^2 t^2}{2rV_{fix}t^2} \ln \left(\frac{r + V_{fix}t}{\sqrt{|r^2 - V_{fix}^2 t^2|}} \right) - \frac{1}{2t}.$$

Στη συνέχεια, θεωρούμε την περίπτωση όπου οι ταχύτητες των κόμβων N_1 και N_2 δεν είναι πλέον σταθερές. Κατά συνέπεια, θα ισχύει η σχέση:

$$V = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cos \alpha} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{2v_1v_2}{v_1^2 + v_2^2} \cos \alpha}, \quad (3.70)$$

η οποία προσεγγιστικά μπορεί να γραφεί ως:

$$V \approx \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \cdot \left(1 - \frac{v_1v_2}{v_1^2 + v_2^2} \cos \alpha \right). \quad (3.71)$$

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \Pr \{ \alpha \leq a, \beta \leq b | T = t \} &= \int_{x=0}^a \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \cdot \left(1 - \frac{v_1v_2}{v_1^2 + v_2^2} \cos \alpha \right) \sin b dx \\ &= \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \cdot \left(\alpha - \frac{v_1v_2}{v_1^2 + v_2^2} \sin \alpha \right) \sin b, \end{aligned} \quad (3.72)$$

και

$$\begin{aligned} F_T(t) = \Pr \{ T \leq t \} &= \int_{b=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos b \cdot \Pr \left\{ V > \frac{2r \cos b}{t} \right\} db \\ &= \int_{\cos^{-1} \left(\frac{tk_1(k_1+k_2)}{2r} \right)}^{\cos^{-1} \left(\frac{tk_1(k_1-k_2)}{2r} \right)} \cos b \cdot \left[1 - \frac{1}{\pi} (-k_2 x_1 + \cos^{-1} x_2) \right] db \end{aligned} \quad (3.73)$$

$$\text{όπου } k_1 = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}, \quad k_2 = \frac{v_1v_2}{v_1^2 + v_2^2}, \quad x_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{k_1 - \frac{2r \cos b}{t}}{k_1 k_2} \right)^2} \quad \text{και} \quad x_2 = \left(\frac{k_1 - \frac{2r \cos b}{t}}{k_1 k_2} \right).$$

3.7. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μια μαθηματική ανάλυση κάποιων στοχαστικών ιδιοτήτων του πολύ γνωστού Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Σημείων Στάσεων. Αφού δόθηκε μια τυπική περιγραφή του μοντέλου σε όρους μιας στοχαστικής διαδικασίας διακριτού χρόνου, μελετήθηκαν (i) το μήκος και η διάρκεια της κίνησης (μετάβασης) μεταξύ δύο σημείων στάσης, (ii) η χωρική κατανομή των κόμβων που προκύπτει καθώς και η εξάρτησή της από το χρόνο παύσης, (iii) ο ρυθμός αλλαγών κυψέλης για ένα μοντέλο Τυχαίων Στάσεων που χρησιμοποιείται σε ένα κυψελωτά δομημένο δίκτυο και (iv) η κατανομή της διάρκειας ζεύξης μεταξύ δύο κόμβων σε ένα δίκτυο *ad hoc*. Αυτά τα αποτελέσματα δίνουν μια βαθύτερη κατανόηση του πως το μοντέλο αυτό συμπεριφέρεται σε μια ανάλυση των ασύρματων κινητών δικτύων που βασίζεται σε προσομοίωση.

Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις για το χρόνο μετάβασης, όπως επίσης και αυτές για το ρυθμό των αλλαγών κυψέλης αλλά και τη διάρκεια μιας ζεύξης, μας παρέχουν τη δυνατότητα να αποφανθούμε για το «βαθμό κινητικότητας» σε ένα δεδομένο σενάριο. Ένα τέτοιο μέτρο κινητικότητας είναι απαραίτητο αν θέλουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα προσομοίωσης που λαμβάνουμε με χρήση του μοντέλου Τυχαίων Στάσεων και ενός άλλου διαφορετικού μοντέλου και για να καθορίσουμε την επίδραση της κινητικότητας στα αποτελέσματα προσομοίωσης. Αποδείχθηκε ότι ο χρόνος μεταξύ δύο αλλαγών κατεύθυνσης καθορίζεται από την ταχύτητα των κόμβων και το σχήμα και το μέγεθος της περιοχής. Η γνώση της χωρικής κατανομής των κόμβων είναι απαραίτητη π.χ. για έρευνες, που βασίζονται σε προσομοίωση και μελετούν την αλληλεπίδραση μεταξύ των κόμβων, για τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο και θέματα συνδεσιμότητας. Τελικά, η κατανομή που εξάγεται επεξηγεί με ένα αναλυτικό τρόπο το φαινόμενο που αναφέρεται στο [1,7] ότι οι κόμβοι τείνουν να κινηθούν πίσω στο κέντρο της περιοχής. Άγνοια αυτής της συμπεριφοράς μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.3

Α.3.1. Υπολογισμός θεωρητικών σχέσεων για σύγκριση αποτελεσμάτων στην προσομοίωση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

Στην παράγραφο αυτή εξάγουμε τις θεωρητικές σχέσεις, με τις οποίες θα επιχειρήσουμε στη συνέχεια της εργασίας να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιείται τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης, όπου $\max X = \max Y$ το μήκος κάθε πλευράς της περιοχής στους άξονες x και y αντίστοιχα.

Α.3.1.1. Κατανομή της ταχύτητας των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση

Η κατανομή της ταχύτητας των κόμβων χρησιμοποιείται για την παραμετροποίηση της κινητικότητας των χρηστών. Μια ευρέως διαδεδομένη κατανομή για την ταχύτητα που επιλέγει ένας κόμβος σε μια μετάβασή του είναι η ομοιόμορφη κατανομή, όπου η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας θα ισούται με $1/(\max V - \min V)$. Τα $\min V$ και $\max V$ ορίζουν το διάστημα τιμών από το οποίο η ταχύτητα λαμβάνει τιμές. Με τις ρυθμίσεις αυτές, η κατανομή της ταχύτητας που παρατηρείται στη μόνιμη κατάσταση είναι μη ομοιόμορφη [13], όπως περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{pdf}V_{Th} = \begin{cases} \frac{1}{V \ln\left(\frac{\max V}{\min V}\right)} & \min V < V < \max V \\ 0 & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (\text{A3.1})$$

Αυτή η μη ομοιόμορφη κατανομή είναι το αποτέλεσμα ενός προβλήματος πολωμένης δειγματοληψίας, όπως αυτό περιγράφεται στο [14]. Καθώς δειγματοληπτούμε σε τυχαία χρονικά διαστήματα, οι χαμηλές ταχύτητες δειγματοληπτούνται συχνότερα από τις υψηλές ταχύτητες, επειδή απαιτείται περισσότερος χρόνος από τους χρήστες για να ταξιδέψουν από ένα σημείο στάσης σε ένα άλλο, κινούμενοι με μια μικρή ταχύτητα αντί με μια μεγάλη ταχύτητα.

Σημείωση: Η κατανομή της ταχύτητας στη μόνιμη κατάσταση, $p(V)$, μπορεί να μετατραπεί εύκολα σε ομοιόμορφη, στο διάστημα $[v_{\min}, v_{\max}]$, επιλέγοντας ταχύτητες στα σημεία στάσης σύμφωνα με τη μη ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$p(V_m = v) = \begin{cases} \frac{2v}{v_{\max}^2 - v_{\min}^2} & v_{\min} < v < v_{\max} \\ 0 & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (\text{A3.2})$$

Η αναμενόμενη τιμή της ταχύτητας των κόμβων προκύπτει είτε εφαρμόζοντας τον ορισμό της μέσης τιμής στη σ.π.π. της σχέσης (A3.1) είτε από τη σχέση (3.30) αν λάβουμε υπόψη πως $E\{V\} = E\{L\} / E\{T\}$. Αντικαθιστώντας $v_{\max} = \max V$ και $v_{\min} = \min V$, θα έχουμε τελικά:

$$\text{meanVTh} = \frac{\max V - \min V}{\ln(\max V / \min V)} \quad (\text{A3.3})$$

A.3.1.2. Μήκος μετάβασης

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης L των κόμβων που κινούνται σύμφωνα με το μοντέλο Τυχαίων Στάσεων σε μια τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις (3.19) και (3.20) της παραγράφου 3.3. Αντικαθιστώντας $a = \max X = \max Y$, $l = L$ και $\pi = \rho$ στις σχέσεις αυτές και μετά από κάποιες απλοποιήσεις, θα έχουμε τελικά:

$$\text{pdfLTh} = \frac{4L}{\max X^4} \cdot \begin{cases} \frac{\pi}{2} (\max X)^2 - 2L \max X + \frac{1}{2} L^2, \\ \text{για } 0 \leq L \leq \max X, \\ \\ (\max X)^2 \arcsin \frac{\max X}{L} + 2 \max X \sqrt{L^2 - (\max X)^2} \\ - (\max X)^2 - (\max X)^2 \arccos \frac{\max X}{L} - \frac{1}{2} L^2, \\ \text{για } \max X \leq L \leq \max X \sqrt{2}, \\ \\ 0, \quad \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (\text{A3.4})$$

Η αναμενόμενη τιμή του μήκους μετάβασης υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3.21) με χρήση των ίδιων αντικαταστάσεων. Μετά από κάποιες πράξεις και απλοποιήσεις, καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση:

$$\text{meanLTh} = \frac{(\max X)^3}{3} \left(\frac{2 + \sqrt{2}}{5} + \arccos h\sqrt{2} \right) \quad (\text{A3.5})$$

A.3.1.3. Χρόνος μετάβασης

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3.29) της παραγράφου 3.3.4. Ωστόσο, στην περίπτωση της προσομοίωσης, επειδή δειγματοληπτούμε στο πεδίο του χρόνου, το ολοκλήρωμα της σχέσης (3.29) μετατρέπεται στο αντίστοιχο άθροισμα. Επομένως, θα έχουμε:

$$\text{pdfTTh}(T) = \frac{1}{(\max V - \min V)} \sum_{m=1}^n (V_m \cdot \text{pdfLTh}(V_m T)) , \quad (\text{A3.6})$$

όπου η pdfLTh έχει υπολογιστεί στην προηγούμενη παράγραφο (σχέση (A3.4)). Η άθροιση γίνεται για όλες τις (κβαντισμένες) ταχύτητες από $\min V$ ως $\max V$.

Ο αναμενόμενος χρόνος μετάβασης υπολογίζεται επομένως από τη σχέση:

$$\text{meanTTh} = \frac{\text{meanLTh}}{\text{meanVTh}} , \quad (\text{A3.7})$$

όπου τα meanVTh και meanLTh υπολογίζονται από τις σχέσεις (A3.3) και (A3.5) αντίστοιχα.

A.3.1.4. Χωρική κατανομή των κόμβων χωρίς χρόνο παύσης

Από τη σχέση (3.39), με μετατόπιση των ορίων από $-a/2 \leq X \leq a/2$ και $-a/2 \leq Y \leq a/2$ σε $0 \leq X \leq a$ και $0 \leq Y \leq a$ αντίστοιχα και με αντικατάσταση $a = \max X = \max Y$, $x = X$ και $y = Y$ παίρνουμε την παρακάτω σχέση για τη χωρική κατανομή των κινούμενων κόμβων:

$$\begin{aligned} \text{pdfMovTh} &\approx \frac{36}{(\max X)^6} \left(\left(X - \frac{\max X}{2} \right)^2 - \frac{(\max X)^2}{4} \right) \left(\left(Y - \frac{\max Y}{2} \right)^2 - \frac{(\max Y)^2}{4} \right) \\ \Rightarrow \text{pdfMovTh} &\approx \frac{36}{(\max X)^6} (X^2 - X \max X) (Y^2 - Y \max Y) \end{aligned} \quad (\text{A3.8})$$

A.3.1.5. Χωρική κατανομή με χρόνο παύσης

Η χωρική κατανομή των κόμβων όταν σε αυτούς επιτρέπεται να σταματήσουν για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στα σημεία προορισμού δίνεται, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3.4.2, από την υπέρθεση δύο ξεχωριστών συνιστωσών, της συνιστώσας παύσης και της συνιστώσας κινητικότητας. Από τη σχέση (3.41), θα έχουμε:

$$\text{pdfPositionTh} = \underbrace{\text{pauseProbTh} \cdot \text{pdfStatTh}}_{\text{συνιστώσα παύσης}} + \underbrace{(1 - \text{pauseProbTh}) \cdot \text{pdfMovTh}}_{\text{συνιστώσα κινητικότητας}} , \quad (\text{A3.9})$$

όπου pauseProbTh είναι η πιθανότητα ένας κόμβος να κάνει παύση σε έναν τυχαία επιλεγμένο χρόνο, pdfStatTh είναι η χωρική κατανομή όλων των κόμβων που την τρέχουσα χρονική στιγμή κάνουν παύση σε ένα σημείο - προορισμό και η pdfMovTh δίνεται από τη σχέση (A3.8) της προηγούμενης παραγράφου.

Η pdfStatTh , σύμφωνα με τη σχέση (3.42), είναι μια ομοιόμορφη συνάρτηση. Υπολογίζοντας το εμβαδόν της περιοχής προσομοίωσης:

$$\|A\| = \max X \cdot \max Y = (\max X)^2$$

και αντικαθιστώντας στη σχέση (3.42) θα έχουμε:

$$\text{pdfStatTh} = \frac{1}{(\max X)^2} \quad (\text{A3.10})$$

Η πιθανότητα παύσης pauseProbTh δίνεται από το ποσοστό του χρόνου που ο κόμβος κάνει παύση κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης σε χρόνο προσομοίωσης. Κατά συνέπεια, με βάση τις σχέσεις (3.43) και (3.44), η πιθανότητα παύσης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\text{pauseProbTh} = \frac{\text{meanPauseTTh}}{\text{meanPauseTTh} + \text{meanTTh}} \quad (\text{A3.11})$$

όπου meanPauseTTh είναι ο αναμενόμενος χρόνος παύσης, ο οποίος δίνεται από την εξής σχέση:

$$\text{meanPauseTTh} = \frac{\text{minPauseTime} + \text{maxPauseTime}}{2}, \quad (\text{A3.12})$$

όπου minPauseTime και maxPauseTime είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή αντίστοιχα που μπορεί να λάβει ο χρόνος παύσης και ορίζουν το διάστημα μέσα στο οποίο ο χρόνος παύσης ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή.

A.3.2. Υπολογισμός θεωρητικών σχέσεων για σύγκριση αποτελεσμάτων στην προσομοίωση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης

Στην παράγραφο αυτή εξάγουμε τις θεωρητικές σχέσεις, με τις οποίες θα επιχειρήσουμε στη συνέχεια της εργασίας να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης. Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιείται τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης, όπου $\max X = \max Y$, το μήκος κάθε πλευράς της περιοχής στους άξονες x και y αντίστοιχα.

A.3.2.1. Κατανομή της ταχύτητας κόμβων στη μόνιμη κατάσταση

Οι θεωρητικές σχέσεις που προκύπτουν για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και την αναμενόμενη τιμή της ταχύτητας των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης είναι οι ίδιες με τις σχέσεις (A3.1) και (A3.2) της παραγράφου A.3.1.1., που προκύπτουν για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι πρόκειται για το ίδιο πρόβλημα

δειγματοληψίας ταχυτήτων κόμβων που επιλέγουν τις ταχύτητές τους από μια ομοιόμορφη κατανομή.

A.3.2.2. Μήκος μετάβασης

Στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, επειδή το μήκος μετάβασης L επιλέγεται εξ' ορισμού από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[\min L, \max L]$, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης θα είναι η ομοιόμορφη, η οποία θα δίνεται από τη σχέση:

$$\text{pdfLTh} = \frac{1}{(\max L - \min L)} \quad (\text{A3.13})$$

και η αναμενόμενη τιμή του μήκους μετάβασης θα υπολογίζεται επομένως εξής:

$$\text{meanLTh} = \frac{\max L + \min L}{2}. \quad (\text{A3.14})$$

A.3.2.3. Χρόνος μετάβασης

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης υπολογίζεται, όπως και στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, με βάση τη σχέση (3.29) της παραγράφου 3.3.4. Και στην περίπτωση αυτής της προσομοίωσης, επειδή δειγματοληπούμε στο πεδίο του χρόνου, το ολοκλήρωμα της σχέσης (3.29) μετατρέπεται στο αντίστοιχο άθροισμα. Επομένως, θα έχουμε:

$$\text{pdfTTh}(T) = \frac{1}{(\max V - \min V)} \sum_{m=1}^n (V_m \cdot \text{pdfLTh}(V_m T)) \quad (\text{A3.15})$$

όπου η pdfLTh έχει υπολογιστεί στην προηγούμενη παράγραφο (σχέση (A3.13)). Η άθροιση γίνεται για όλες τις (κβαντισμένες) ταχύτητες από $\min V$ ως $\max V$.

Ο αναμενόμενος χρόνος μετάβασης υπολογίζεται, όπως και για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, από τη σχέση (A3.7), η οποία ξαναγράφεται εδώ για λόγους ευκολίας:

$$\text{meanTTh} = \frac{\text{meanLTh}}{\text{meanVTh}}, \quad (\text{A3.16})$$

όπου τα meanVTh και meanLTh υπολογίζονται από τις σχέσεις (A3.3) και (A3.14) αντίστοιχα.

A.3.2.4. Χωρική κατανομή των κόμβων

Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει θεωρητική απόδειξη της χωρικής κατανομής των κόμβων για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης. Ωστόσο, όπως αναφέρεται στο [15], η κατανομή των κόμβων που παράγεται στη μόνιμη κατάσταση στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, όπως και στην κίνηση Brown, είναι πολύ κοντά στην ομοιόμορφη κατανομή είτε υπάρχει είτε δεν υπάρχει η δυνατότητα πάυσης των κόμβων.

A.3.3. Υπολογισμός θεωρητικών σχέσεων για σύγκριση αποτελεσμάτων στην προσομοίωση του κυψελωτού συστήματος

Στην παράγραφο αυτή εξάγουμε τις θεωρητικές σχέσεις, με τις οποίες θα επιχειρήσουμε στη συνέχεια της εργασίας να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε ένα τετράγωνο κυψελωτό σύστημα, με πλευρές $\max X = \max Y$.

Ο αναμενόμενος αριθμός αλλαγών κυψέλης ανά μετάβαση ενός κόμβου και για τα δύο μοντέλα κινητικότητας μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (3.47) της παραγράφου (3.5) ως ακολούθως:

$$E\{C\} = \frac{1}{(\text{numOfCellsX})^2 \cdot (\text{numOfCellsY})^2} \sum_{i_1=1}^{\text{numOfCellsX}} \sum_{j_1=1}^{\text{numOfCellsY}} \sum_{i_2=1}^{\text{numOfCellsX}} \sum_{j_2=1}^{\text{numOfCellsY}} (|i_1 - i_2| + |j_1 - j_2|) \quad (\text{A3.17}),$$

όπου numOfCellsX και numOfCellsY ο αριθμός των κυψελών σε κάθε πλευρά της τετράγωνης περιοχής προσομοίωσης.

Η επόμενη παράμετρος που υπολογίζουμε είναι ο αναμενόμενος αριθμός των αλλαγών κυψέλης ενός κόμβου ανά μονάδα χρόνου (αλλαγές κυψέλης / sec) και για τα δύο μοντέλα κινητικότητας. Με βάση τη σχέση (3.49) της παραγράφου (3.5) θα έχουμε:

$$\text{handoverRateTh} = \frac{E\{C\}}{\text{meanTTh}}, \quad (\text{A3.18})$$

όπου $E\{C\}$ δίνεται από τη σχέση (A17) και meanTTh υπολογίζεται από τις σχέσεις (A3.7) και (A3.16) για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης αντίστοιχα.

A.3.4. Υπολογισμός θεωρητικών σχέσεων για σύγκριση αποτελεσμάτων στην προσομοίωση ad hoc δικτύου

Στην παράγραφο αυτή εξάγουμε τις θεωρητικές σχέσεις, που θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια για να εξετάσουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

ενός δικτύου ad hoc, όπου οι κόμβοι κινούνται είτε σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων είτε σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης. Κατά την προσομοίωση, χρησιμοποιείται τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης, όπου $\max X = \max Y$, τα μήκη των πλευρών της περιοχής στους άξονες x και y αντίστοιχα.

Μια σημαντική παράμετρος για τον υπολογισμό της απόδοσης ενός δικτύου ad hoc είναι η διάρκεια ζεύξης. Σύμφωνα λοιπόν με τη σχέση (3.69), υπολογίζουμε τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης για σταθερή ταχύτητα των κόμβων ($\min V = \max V = \text{const}$) από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{pdfLinkDuration} = A \cdot \ln \left(\frac{\max \text{LinkDist} + \min V \cdot \text{LinkDuration}}{\sqrt{(\max \text{LinkDist})^2 - (\min V)^2 \cdot (\text{LinkDuration})^2}} \right) - \frac{1}{2 \cdot \text{LinkDuration}} \quad (\text{A3.19})$$

όπου A είναι σταθερά που δίνεται από τη σχέση:

$$A = \frac{(\max \text{LinkDist})^2 + (\min V)^2 \cdot (\text{LinkDuration})^2}{2 \cdot \max \text{LinkDist} \cdot \min V \cdot (\text{LinkDuration})^2} \quad (\text{A3.20})$$

Μια δεύτερη σημαντική παράμετρος στη μελέτη των ad hoc δικτύων είναι η διαθεσιμότητα ζεύξης. Ορίζουμε τη διαθεσιμότητα ζεύξης ως την πιθανότητα μια ζεύξη που δημιουργήθηκε τη χρονική στιγμή 0 να είναι διαθέσιμη τη χρονική στιγμή AvailTime, δηλαδή ισοδύναμα την πιθανότητα η διάρκεια της ζεύξης να είναι μεγαλύτερη από μια δοσμένη τιμή AvailTime. Αυτό ισούται με το ολοκλήρωμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης με όρια από AvailTime έως άπειρο. Το ολοκλήρωμα προσεγγίζεται από το αντίστοιχο άθροισμα και έτσι καταλήγουμε στην εξής σχέση για τη διαθεσιμότητα ζεύξης:

$$\text{LinkAvailTh} = \sum_{k=\text{AvailTime}}^{\infty} \text{pdfLinkDuration}_k, \quad (\text{A3.21})$$

όπου η pdfLinkDuration υπολογίζεται από τη σχέση (A3.19).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] C. Bettstetter, Smooth is better than sharp: A random mobility model for simulation of wireless networks, in: Proc. ACM International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Rome, Italy (July 2001).
- [2] C. Bettstetter. Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects. ACM Mobile Comput. and Comm. Rev. 5(3) (2001), σελίδες 55–67.
- [3] B. Ghosh. Random distances within a rectangle and between two rectangles. Bull. Calcutta Math. Soc. 43 (1951), σελίδες 17–24.
- [4] A. Papoulis and S.U. Pillai. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 4th ed. (McGraw-Hill, 2002).
- [5] E. Weisstein (ed.). Eric Weisstein’s World of Mathematics, online edition (Wolfram Research, December 2002), chapter Probability and Statistics: Statistical Distributions.
- [6] D.M. Blough, G. Resta and P. Santi. A statistical analysis of the longrun node spatial distribution in mobile ad hoc networks. In Proceedings of ACM International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Atlanta, GA (September 2002).
- [7] E.M. Royer, P.M. Melliar-Smith and L.E. Moser. An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks. In Proceedings of IEEE International Conference on Communication (ICC), Helsinki, Finland (June 2001).
- [8] C. Bettstetter and C. Wagner. The spatial node distribution of the random waypoint mobility model. In Proceedings of German Workshop on Mobile Ad Hoc Networks (WMAN), Ulm, Germany (March 2002).
- [9] G. Resta and P. Santi. An analysis of the node spatial distribution of the random waypoint model for ad hoc networks. In Proceedings of ACM Workshop on Principles of Mobile Computing (POMC), Toulouse, France (October 2002).
- [10] C. Bettstetter, G. Resta and P. Santi. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks, Technical Report, Technische Universität München, Institute of Communication Networks, Munich, Germany (September 2002).
- [11] J. Li, J. Jannotti, D.D. Couto, D. Karger and R. Morris. A scalable location service for geographic ad hoc routing. In Proceedings of ACM Internat. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Boston, MA (2000).

- [12] C. Bettstetter, H. Hartenstein and X. Perez-Costa, Stochastic properties of the random waypoint mobility model, *ACM/KluwerWireless Networks: Special Issue on Modeling and Analysis of Mobile Networks*, 10 (September 2004).
- [13] J. Kraaier and U. Killat. Mobile Networks: Random direction or random waypoint? A comparison of mobility models for urban environments. Published online in Wiley InterScience, Hamburg University of Technology, Hamburg, Germany, 6 March 2007.
- [14] Xie H, Goodman D. Mobility Models and Biased Sampling Problem. In Conference Record of the 2nd International Conference on Universal Personal Communications Personal Communications: Gateway to the 21st Century, vol. 2, Ottawa, Ont., October 1993, σελίδες 803–807.
- [15] Blough D, Resta G, Santi P (2004): A statical analysis of the long-run node spatial distribution in mobile ad hoc networks. *Wireless Networks*. 10:σελίδες 543–554.
- [16] C.-L. Tsao, Y.-T. Wu, W. Liao, and J.-C. Kuo. Link Duration of the Random Waypoint Model in Mobile Ad Hoc Networks. Department of Electrical Engineering National Taiwan University, Taipei, Taiwan.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εκτέλεση προσομοιώσεων και συμπεράσματα

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, εκτελέσαμε μια σειρά προσομοιώσεων, σύμφωνα με τους κώδικες των προγραμμάτων που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2. Για διάφορες τιμές παραμέτρων, λάβαμε τα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται και σχολιάζονται στη συνέχεια.

Αρχικά, εκτελέσαμε τα προγράμματα που υλοποιούν τα δύο μοντέλα κινητικότητας χωρίς κάποια δικτυακή υποδομή και λάβαμε αποτελέσματα σχετικά με κάποια μέτρα κινητικότητας. Στη συνέχεια, προχωρήσαμε σε προσομοιώσεις κυβελωτών συστημάτων με 9 και 25 κυψέλες για τα δύο μοντέλα κινητικότητας και μελετήσαμε κάποια μεγέθη σε σχέση με τα συστήματα αυτά. Τέλος, προχωρήσαμε σε προσομοιώσεις που αφορούσαν δίκτυα ad hoc, όπου μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά των ζεύξεων και των μονοπατιών δύο και τριών αλμάτων που δημιουργούνταν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Και στην περίπτωση αυτή, μελετήθηκαν και τα δύο μοντέλα κινητικότητας.

Σε κάθε προσομοίωση που εκτελέσαμε, παρατηρήσαμε τη μορφή και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των καμπυλών που προέκυψαν και συγκρίναμε τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα θεωρητικά (βλέπε κεφάλαιο 3), όπου αυτό ήταν εφικτό. Επίσης έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μεταξύ των δύο μοντέλων κινητικότητας. Επιπλέον, καταλήξαμε σε κάποια συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο επίδρασης ορισμένων παραμέτρων στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζουμε μια σύνοψη των συμπερασμάτων.

4.2. Προσομοιώσεις μοντέλων κινητικότητας χωρίς δικτυακή υποδομή

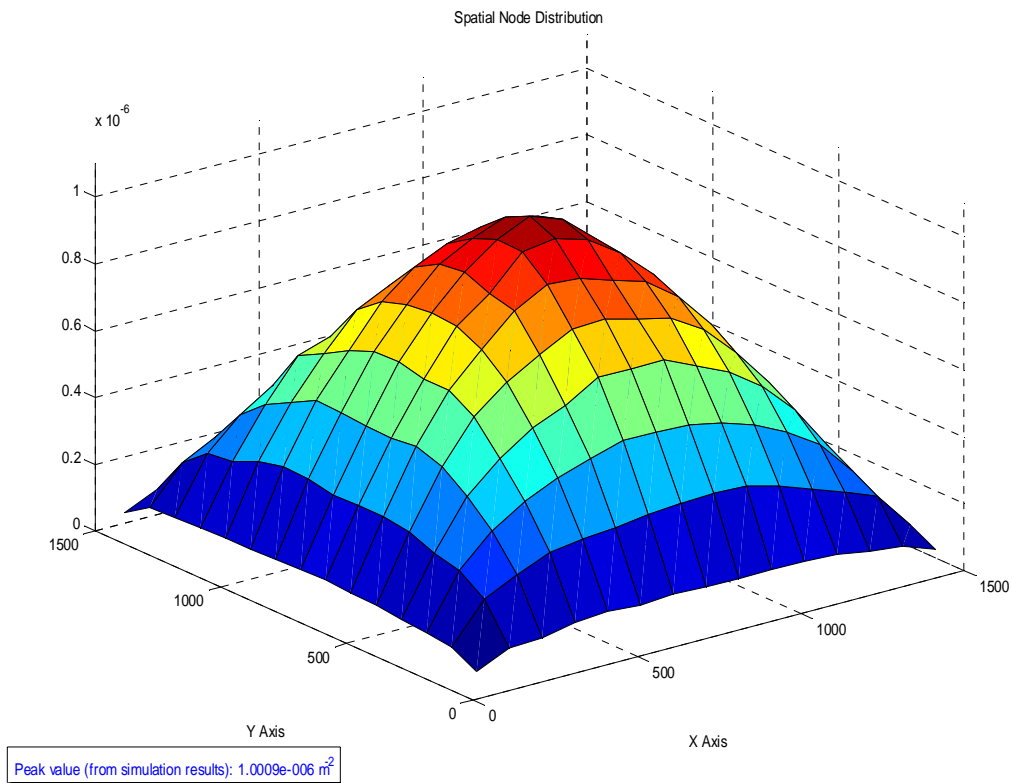
Η πρώτη ομάδα προσομοιώσεων (Προσομοιώσεις 1 ως 10) αφορούν στην υλοποίηση των Μοντέλων Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και Τυχαίας Κατεύθυνσης χωρίς κάποια δικτυακή υποδομή. Οι πρώτες πέντε προσομοιώσεις αφορούν στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και οι επόμενες πέντε στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.

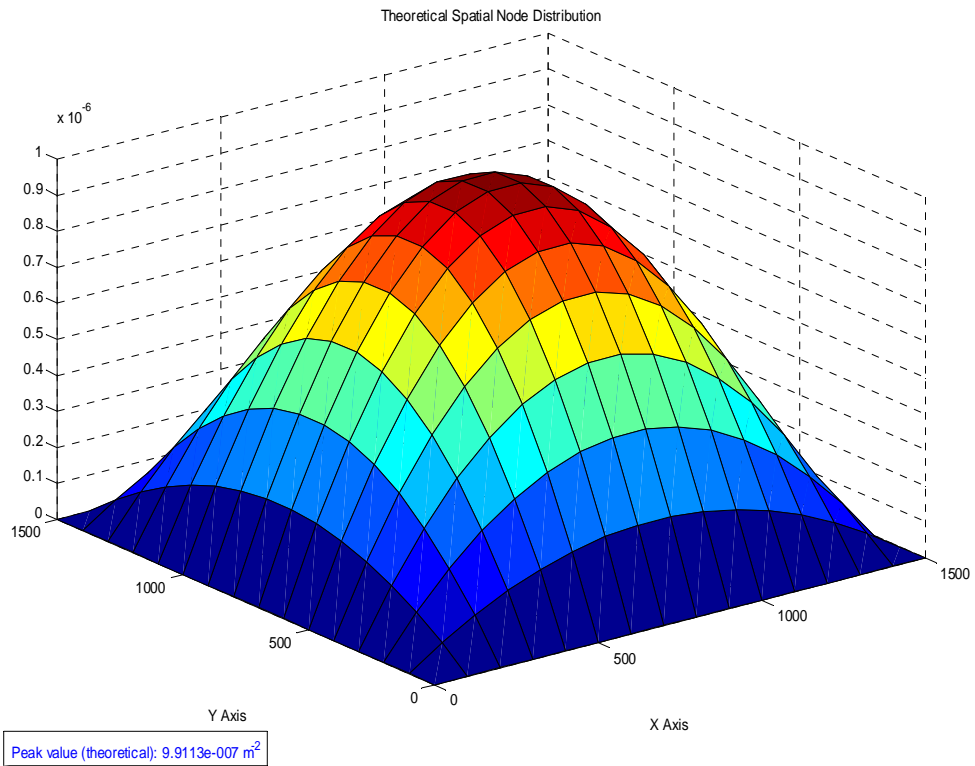
Για κάθε ένα από τα δύο μοντέλα κινητικότητας, εξετάσαμε τα εξής σενάρια:

- (i) Μηδενικός χρόνος παύσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητες από 15 ως 45 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 1500m.
- (ii) Χρόνος παύσης μεταξύ 0 και 15s στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητες 15 - 45 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 1500m.
- (iii) Χρόνος παύσης μεταξύ 0 και 5s στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητες 5 - 25 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 1500m.
- (iv) Μηδενικός χρόνος παύσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητες 5 - 35 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 1500m με αυξημένο πλήθος κόμβων.
- (v) Μηδενικός χρόνος παύσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητες 5 - 35 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 2500m με αυξημένο πλήθος κόμβων.

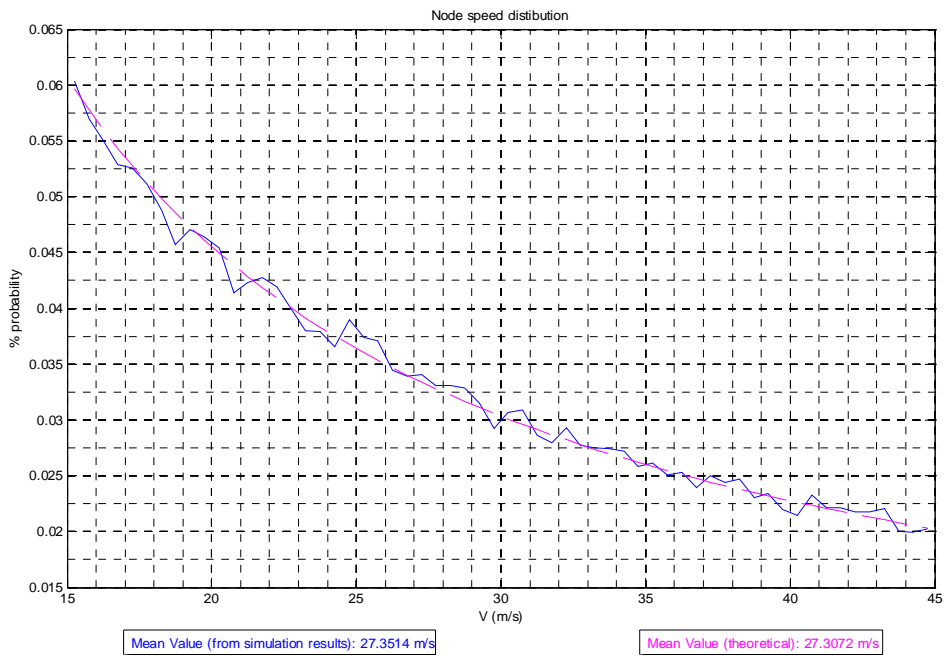
1^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple*Πίνακας 1: Παράμετροι 1^{ης} προσομοίωσης*

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[15, 45] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s

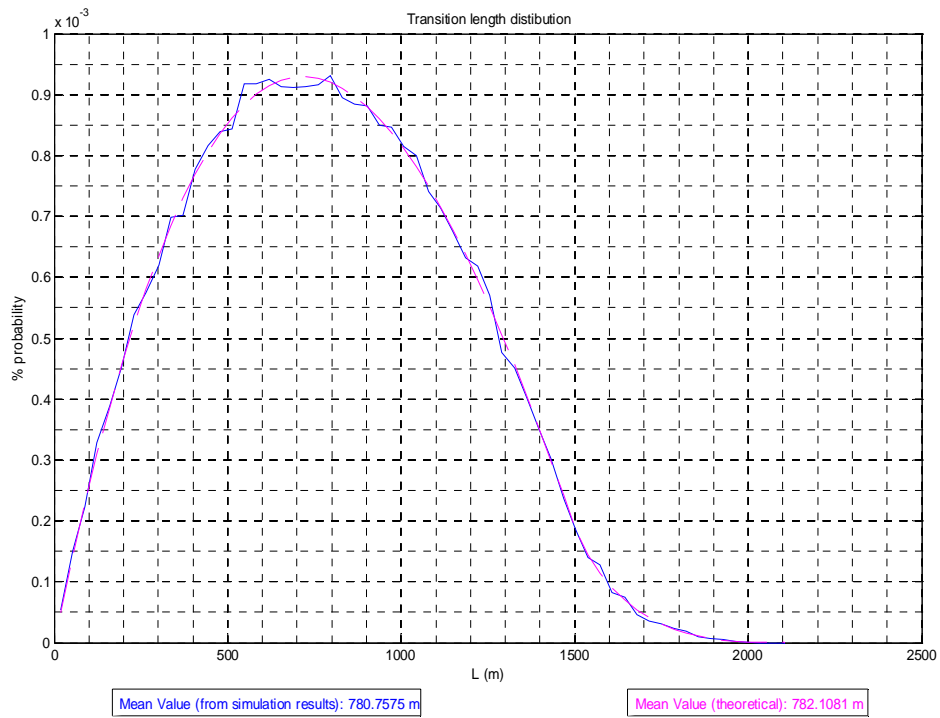
*Σχήμα 1: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)*



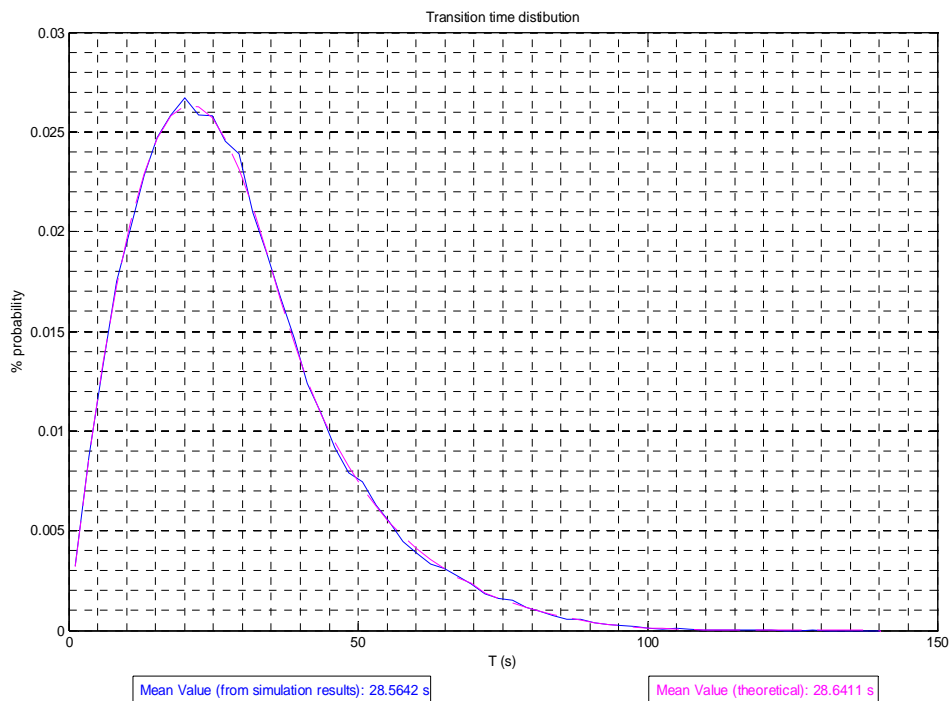
Σχήμα 2: Χωρική κατανομή των κόμβων (θεωρητική)



Σχήμα 3: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 4: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 5: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην πρώτη προσομοίωση μελετούμε την κίνηση των κόμβων σε μια τετράγωνη περιοχή, μέσα στην οποία οι κόμβοι κινούνται σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων (RWP). Στο Σχήμα 1, απεικονίζεται η χωρική κατανομή των κόμβων όπως προκύπτει από την προσομοίωση. Παρατηρούμε πως η κατανομή αυτή συγκλίνει σε μεγάλο βαθμό προς τη θεωρητική χωρική κατανομή των κόμβων, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρούμε μια συμμετρία της κατανομής ως προς το κέντρο της περιοχής προσομοίωσης. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι η πυκνότητα των κόμβων έχει μια μέγιστη τιμή στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης και φθίνει καθώς προχωρούμε προς τα όρια της περιοχής, τείνοντας στο μηδέν στο σύνορο. Με άλλα λόγια, είναι μεγαλύτερη η πιθανότητα να βρεθεί ένας κόμβος στο κεντρικό τμήμα της περιοχής προσομοίωσης παρά κοντά στο σύνορο. Συγκρίνοντας επίσης τη μέγιστη τιμή (peak value) της χωρικής κατανομής των κόμβων που προκύπτει από την προσομοίωση με τη μέγιστη τιμή της θεωρητικής χωρικής κατανομής, διαπιστώνουμε πως η πρώτη έχει μια απόκλιση 0.986 % από τη δεύτερη, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Ωστόσο, από τη σύγκριση των δύο κατανομών, παρατηρούμε πως η θεωρητική χωρική κατανομή των κόμβων είναι πιο απότομη από την αντίστοιχη της προσομοίωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σχέση που αντιστοιχεί στη θεωρητική κατανομή είναι προσεγγιστική (βλέπε παράγραφο 3.4.1).

Μελετώντας στη συνέχεια, από το Σχήμα 3, τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων, διαπιστώνουμε πως, παρόλο που οι κόμβοι στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων επιλέγουν στα σημεία στάσης την ταχύτητά τους από μια ομοιόμορφη κατανομή, εντούτοις η κατανομή της ταχύτητας στη μόνιμη κατάσταση δεν είναι ομοιόμορφη αλλά είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε κάποιες αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης (μπλε χρώμα) από τη θεωρητική καμπύλη (μωβ χρώμα). Συγκεκριμένα, για μικρές τιμές της ταχύτητας οι απόλυτες αποκλίσεις των δύο κατανομών είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αποκλίσεις για μεγάλες τιμές της ταχύτητας. Ωστόσο, καθώς η ταχύτητα των κόμβων παίρνει μεγαλύτερες τιμές, η τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας μειώνεται (αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη), με αποτέλεσμα οι σχετικές αποκλίσεις της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη να παραμένουν στα ίδια επίπεδα για όλες τις τιμές της ταχύτητας. Στη χειρότερη περίπτωση, η σχετική απόκλιση των δύο κατανομών είναι της τάξης του 6% ενώ η σχετική απόκλιση της μέσης τιμής της ταχύτητας της προσομοίωσης σε σχέση με τη θεωρητική τιμή είναι 0.162%.

Στο Σχήμα 4, παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης. Η καμπύλη που προκύπτει από την προσομοίωση αρχικά αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια φθίνει μέχρις ότου μηδενιστεί και συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τη θεωρητική κατανομή. Οι σχετικές αποκλίσεις της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη παρατηρούνται κυρίως στην περιοχή του μεγίστου και στη χειρότερη περίπτωση είναι της τάξης του 6%. Αντίστοιχα, η σχετική απόκλιση των μέσων τιμών είναι ίση με 0,173%.

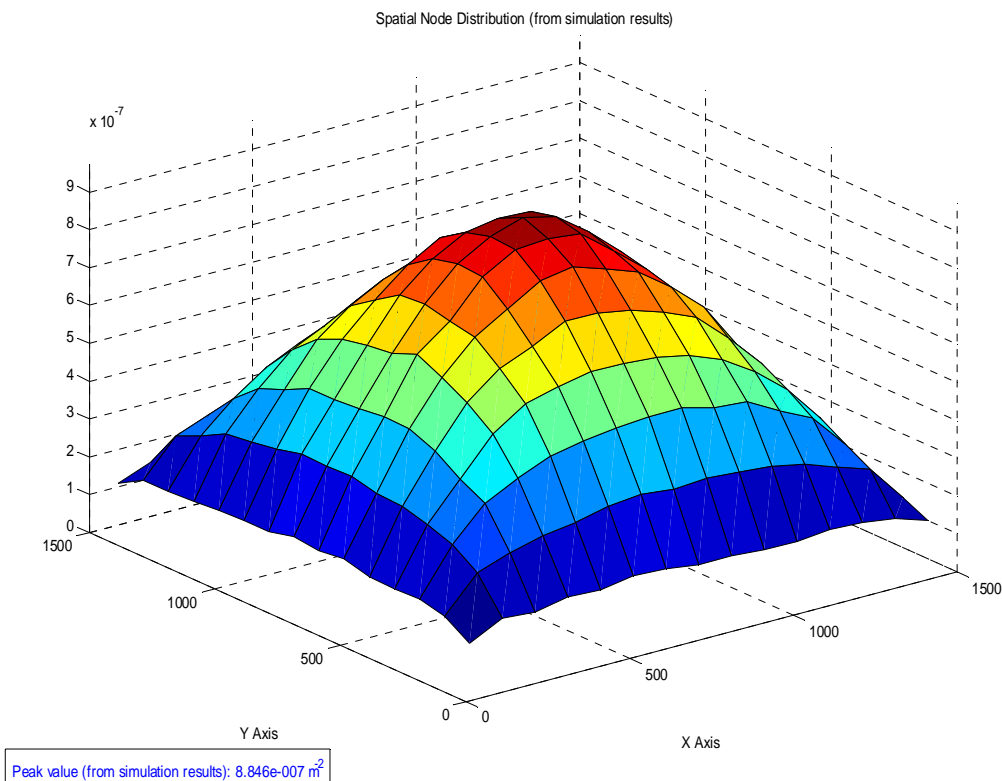
Τέλος, στο Σχήμα 5, απεικονίζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης. Η κατανομή που προκύπτει από την προσομοίωση έχει παρόμοια μορφή με την αντίστοιχη καμπύλη του μήκους μετάβασης και σχεδόν ταυτίζεται με τη θεωρητική

κατανομή του χρόνου μετάβασης. Η μέγιστη σχετική απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη παρατηρείται στην περιοχή του μεγίστου της καμπύλης και είναι της τάξης του 1% ενώ η σχετική απόκλιση των μέσων τιμών ισούται με 0.268%.

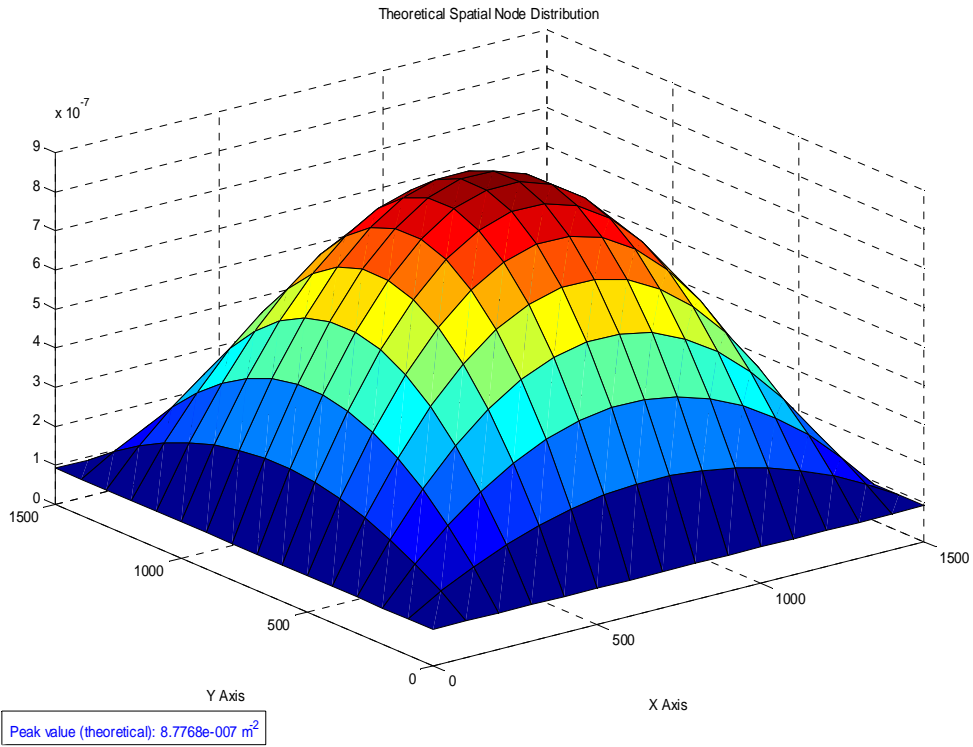
2^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple

Πίνακας 2: Παράμετροι 2^{ης} προσομοίωσης

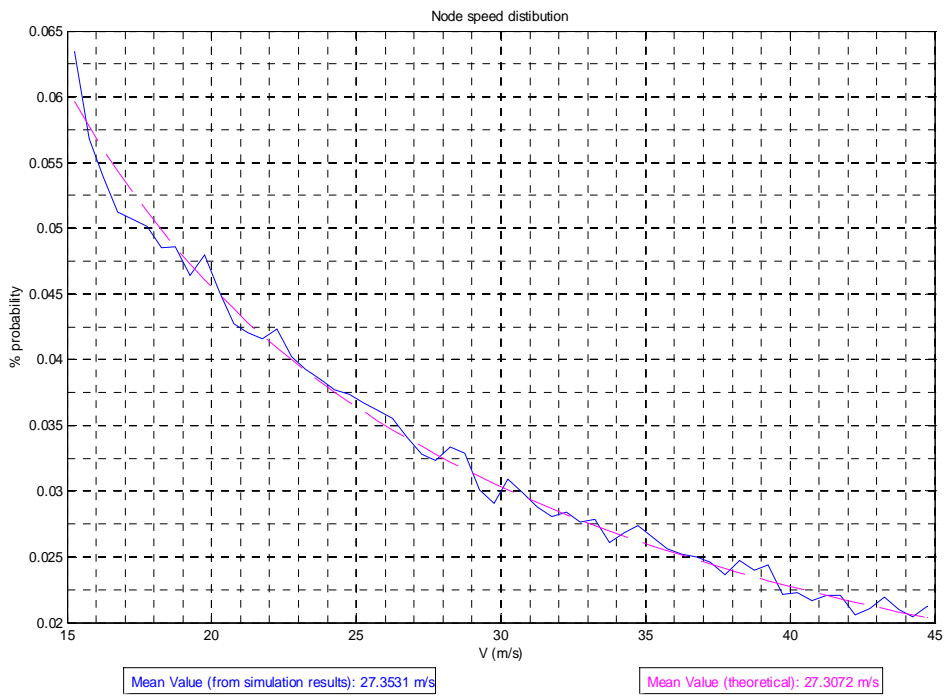
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 15] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[15, 45] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s



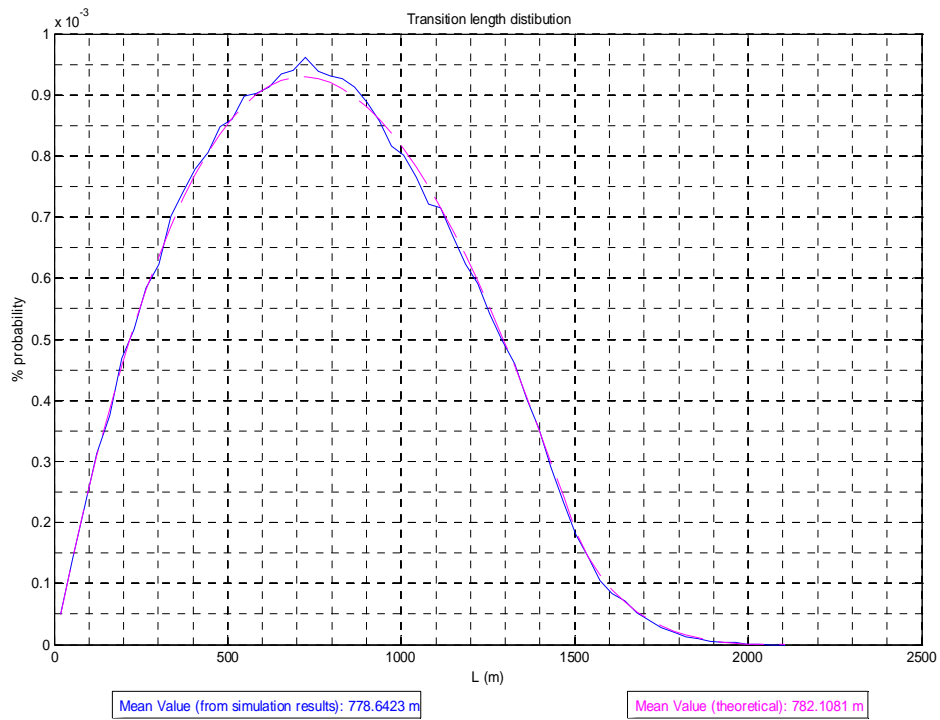
Σχήμα 6: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)



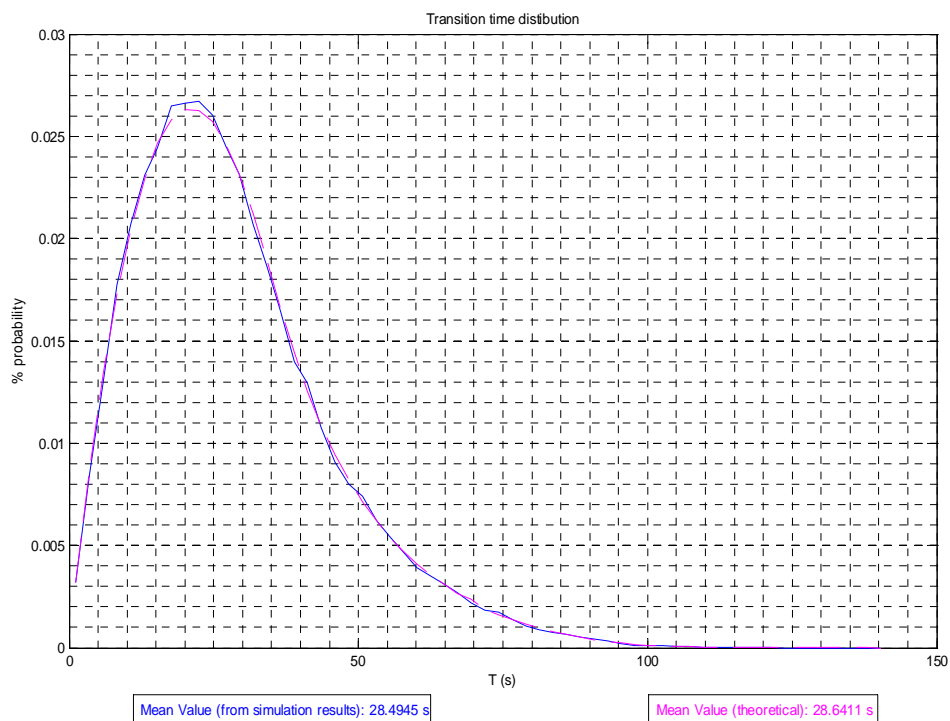
Σχήμα 7: Χωρική κατανομή των κόμβων (θεωρητική)



Σχήμα 8: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 9: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 10: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στη δεύτερη προσομοίωση, αυτό που αλλάζει σε σχέση με την πρώτη, είναι ότι έχει προστεθεί η δυνατότητα παύσης των κόμβων στα σημεία στάσης για ένα συγκεκριμένο χρόνο παύσης, ο οποίος επιλέγεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 15]$ s. Αυτή η προσθήκη επιφέρει κάποια αλλαγή στην χωρική κατανομή των κόμβων σε σχέση με την πρώτη προσομοίωση, αφού τώρα λαμβάνεται υπόψη, εκτός από τη συνιστώσα της κινητικότητας και η συνιστώσα παύσης, η οποία αντιστοιχεί σε ομοιόμορφη κατανομή. Οι δύο αυτές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας έχουν ως βάρη τις πιθανότητες ο κόμβος να κινηθεί ή να κάνει παύση, αντίστοιχα. Λόγω της σχέσης αυτής λοιπόν, αναμένουμε η χωρική κατανομή με χρόνο παύσης στη μόνιμη κατάσταση να είναι λιγότερο απότομη από την αντίστοιχη χωρίς χρόνο παύσης, δηλαδή η πυκνότητα των κόμβων στο κεντρικό τμήμα της περιοχής προσομοίωσης να είναι μικρότερη και κοντά στο σύνορο να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση, δεδομένου ότι οι υπόλοιπες παράμετροι της προσομοίωσης παραμένουν αμετάβλητες (μέγεθος περιοχής προσομοίωσης, χρόνος προσομοίωσης, αριθμός των κόμβων). Για αυτόν ακριβώς το λόγο, η μέγιστη τιμή της χωρικής κατανομής με χρόνο παύσης είναι μικρότερη από τη μέγιστη τιμή της χωρικής κατανομής χωρίς χρόνο παύσης, που απεικονίζεται στο Σχήμα 1 της πρώτης προσομοίωσης κατά ένα ποσοστό 11.620%. Η σχετική απόκλιση της μέγιστης τιμής της κατανομής που προκύπτει από την προσομοίωση και της θεωρητικής κατανομής του Σχήματος 6 είναι ίση με 0.788%. Παρόμοια με την πρώτη προσομοίωση, η πιο απότομη μορφή της θεωρητικής κατανομής από την αντίστοιχη της προσομοίωσης οφείλεται στο γεγονός ότι η σχέση που υπολογίζει τη θεωρητική κατανομή είναι προσεγγιστική.

Όσον αφορά τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7, παρατηρούμε πως δεν αλλάζει κάτι ως προς τη μορφή της σε σχέση με την πρώτη προσομοίωση. Ωστόσο, στη δεύτερη προσομοίωση παρατηρούμε μεγαλύτερες απόλυτες αποκλίσεις από την πρώτη προσομοίωση, οι οποίες και πάλι είναι πιο έντονες για μικρές τιμές της ταχύτητας. Στη χειρότερη περίπτωση μάλιστα, η σχετική απόκλιση από τη θεωρητική τιμή είναι της τάξης του 7-8%. Αυτό συμβαίνει, επειδή στην προσομοίωση αυτή, λόγω του μεγάλου χρόνου παύσης, οι κόμβοι που βρίσκονται σε κίνηση σε κάθε χρονική στιγμή είναι λιγότεροι από ότι στην περίπτωση της πρώτης προσομοίωσης. Επομένως, επειδή στην προσομοίωση λαμβάνουμε μετρήσεις για την ταχύτητα των κόμβων που είναι σε κίνηση, θα έχουμε λιγότερα δείγματα άρα και μικρότερη ακρίβεια στην περίπτωση της δεύτερης προσομοίωσης. Η σχετική απόκλιση της μέσης τιμής της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη είναι 0.168%.

Στο Σχήμα 8, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης, παρατηρούμε και πάλι μεγάλη σύγκλιση της καμπύλης προσομοίωσης και της θεωρητικής καμπύλης. Οι μεγαλύτερες σχετικές αποκλίσεις της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη παρατηρούνται, όπως και στην πρώτη προσομοίωση, κυρίως στην περιοχή του μεγίστου και στη χειρότερη περίπτωση είναι της τάξης του 9%, ποσοστό που δείχνει μια χειρότερηση σε σχέση με την πρώτη προσομοίωση. Επίσης, στην περίπτωση της δεύτερης προσομοίωσης έχουμε σημαντική αύξηση της σχετικής απόκλισης των μέσων τιμών, αφού έχουμε σχετική απόκλιση ίση με 0,443% (σε σχέση με 0,173% στην πρώτη προσομοίωση). Αυτό οφείλεται στην προσθήκη του χρόνου παύσης που έχει ως συνέπεια να εκτελούνται λιγότερες

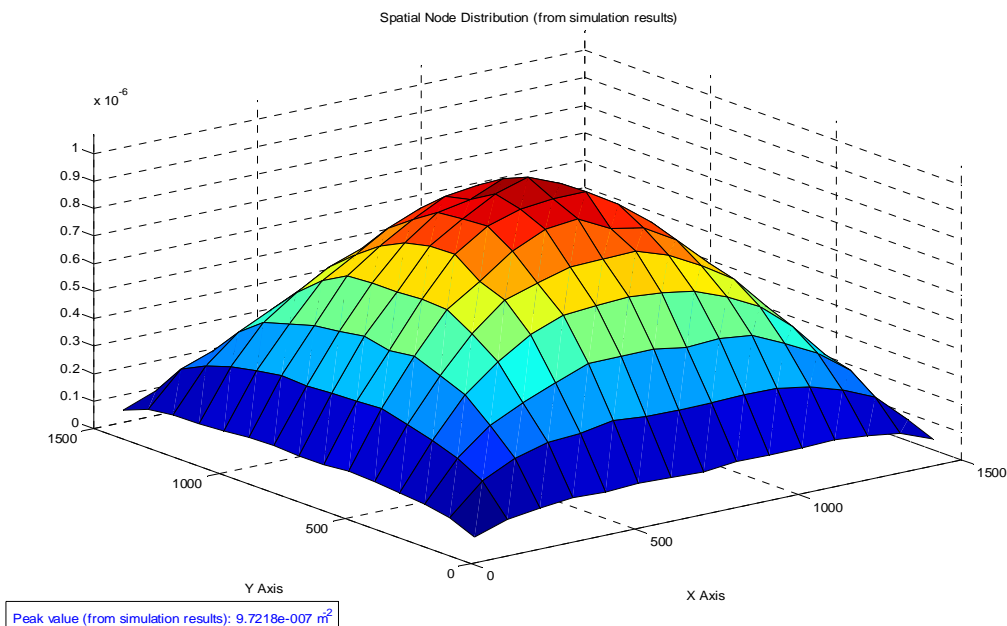
μεταβάσεις ανά μονάδα χρόνου στην προσομοίωση αυτή, αφού οι κόμβοι δεν κινούνται συνεχώς αλλά σταματούν για κάποιο χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών μεταβάσεων.

Μελετώντας τέλος το Σχήμα 9, στο οποίο απεικονίζεται η κατανομή του χρόνου μετάβασης, παρατηρούμε πως και στην προσομοίωση αυτή τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πολύ κοντά στις θεωρητικές τιμές. Η μέγιστη σχετική απόκλιση μεταξύ της καμπύλης προσομοίωσης και της θεωρητικής καμπύλης είναι της τάξης του 1%, όπως και στην περίπτωση χωρίς χρόνο παύσης. Διαπιστώνεται όμως, μια χειροτέρευση στη σχετική απόκλιση των μέσων τιμών σε σχέση με την πρώτη προσομοίωση, αφού έχουμε σχετική απόκλιση 0.512%.

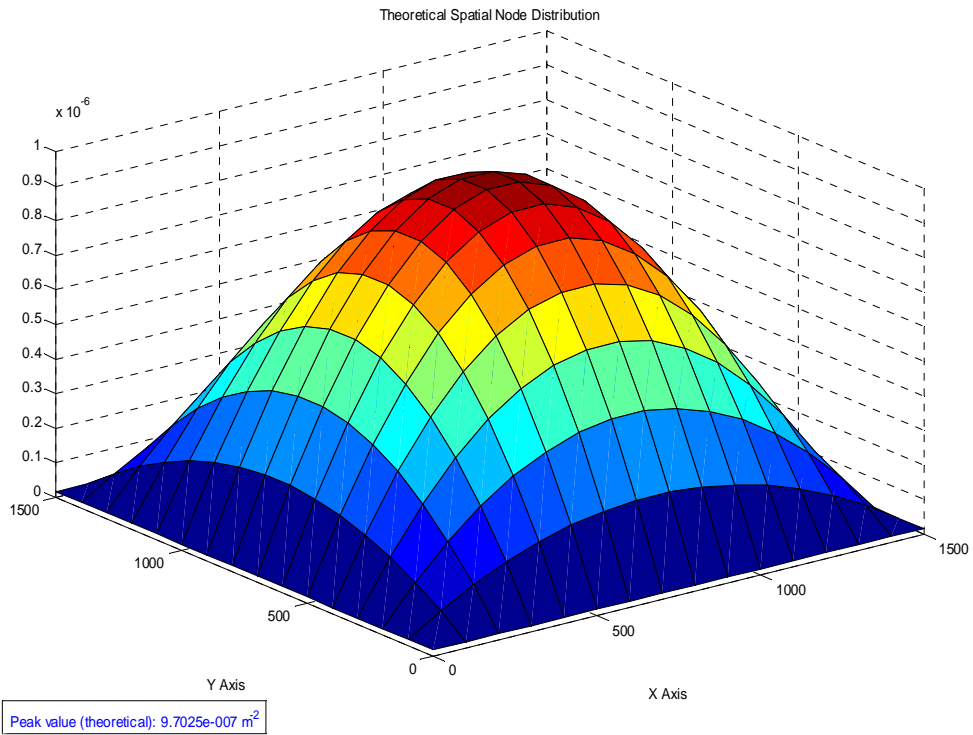
3^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple

Πίνακας 3: Παράμετροι 3^{ης} προσομοίωσης

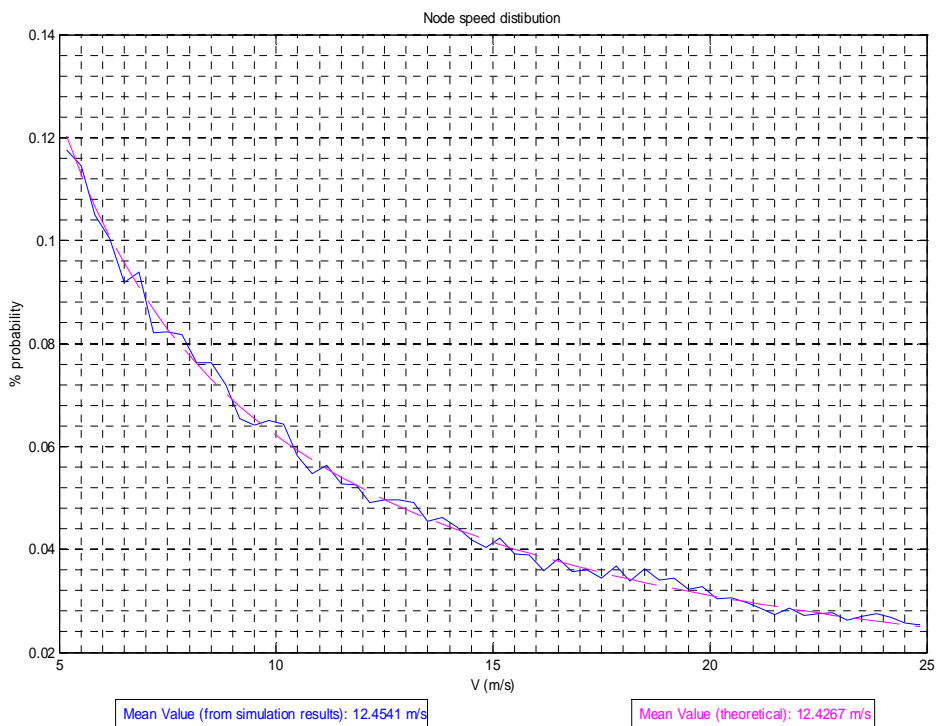
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 5] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 25] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s



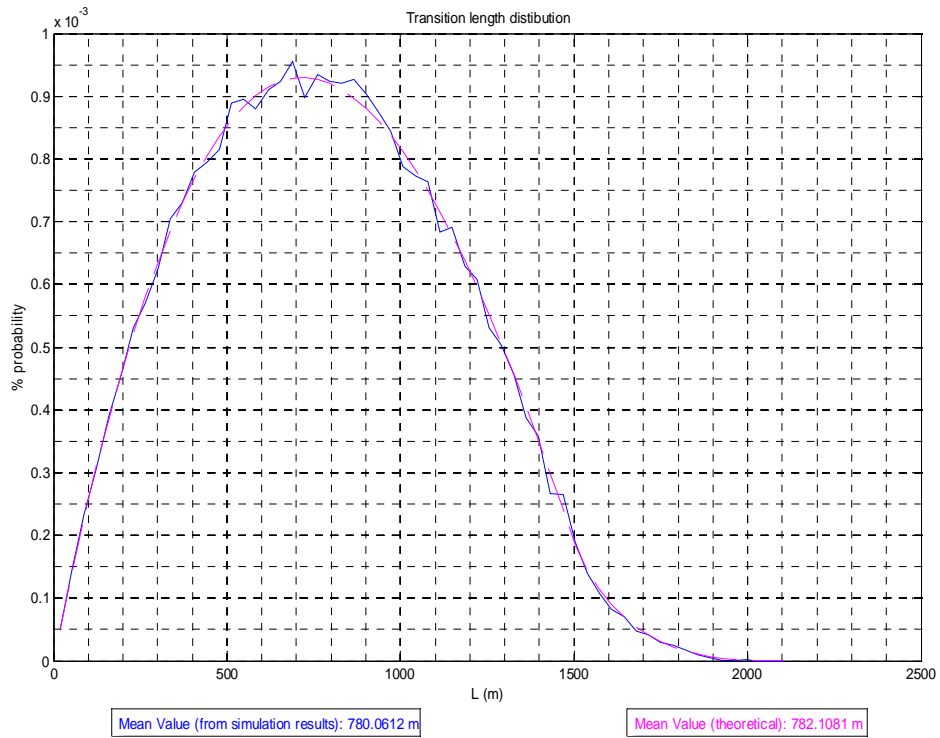
Σχήμα 11: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)



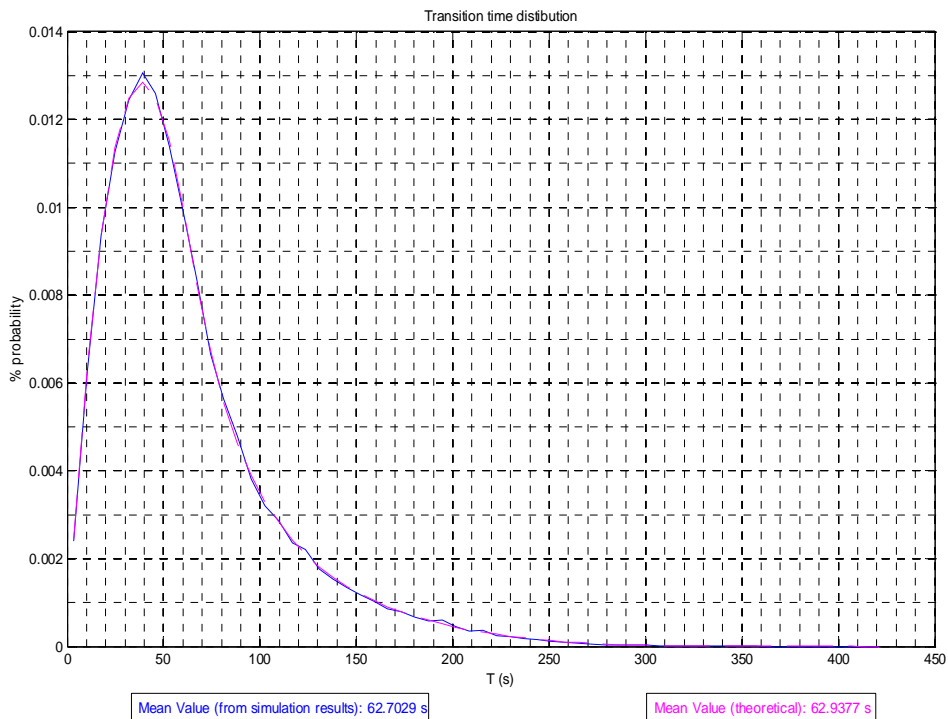
Σχήμα 12: Χωρική κατανομή των κόμβων (θεωρητική)



Σχήμα 13: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 14: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 15: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην τρίτη προσομοίωση, εκτός από το χρόνο παύσης, το διάστημα επιλογής του οποίου μειώθηκε σε σχέση με τη δεύτερη προσομοίωση στα $[0, 5]$ s, μεταβάλαμε και το εύρος των τιμών της ταχύτητας που μπορεί ένας κόμβος να επιλέξει, μειώνοντάς το από $[15, 45]$ m/s σε $[5, 25]$ m/s. Σύμφωνα και με τα συμπεράσματά μας από τη δεύτερη προσομοίωση (Σχήμα 6), παρατηρούμε πως λόγω της ύπαρξης της δυνατότητας χρόνου παύσης από τους κόμβους σε σχέση με την πρώτη προσομοίωση, η μέγιστη τιμή της χωρικής κατανομής στην τρίτη προσομοίωση είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της πρώτης κατά 2.869%. Αντίστοιχα, επειδή οι τιμές που μπορεί να λάβει ο χρόνος παύσης στην προσομοίωση αυτή είναι περιορισμένες και μικρότερες από αυτές της δεύτερης προσομοίωσης, η μέγιστη τιμή της χωρικής κατανομής στην τρίτη προσομοίωση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της δεύτερης προσομοίωσης κατά ένα ποσοστό 9,901%.

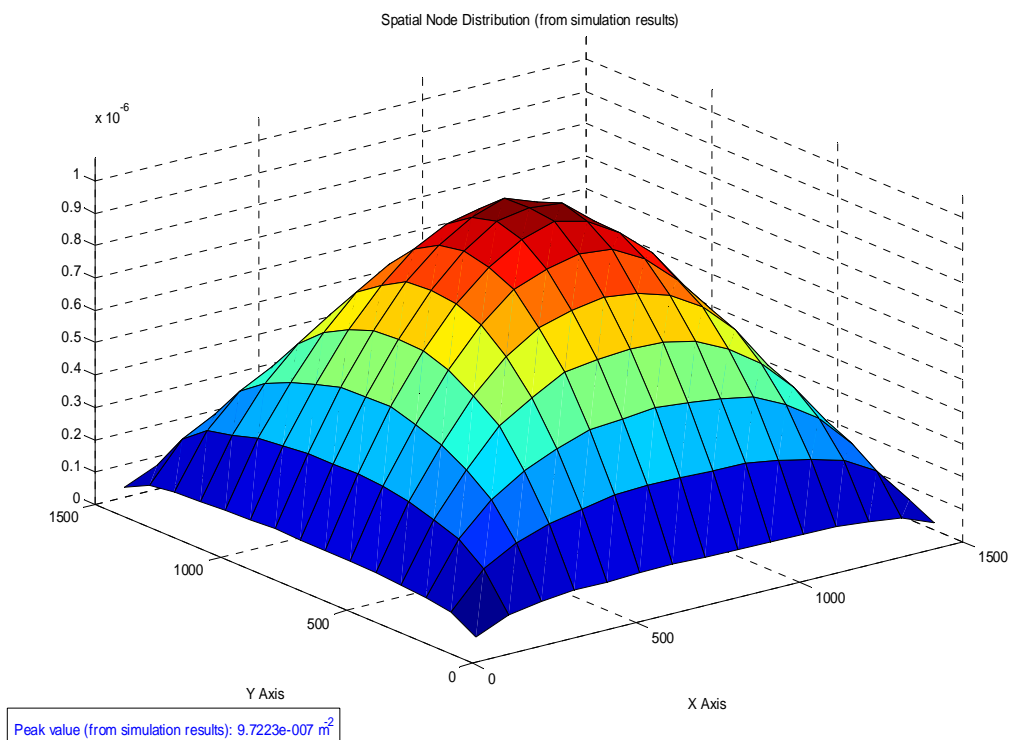
Παρατηρώντας το Σχήμα 13, διαπιστώνουμε μια εξομάλυνση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων στην τρίτη προσομοίωση σε σχέση με την πρώτη και τη δεύτερη προσομοίωση. Αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι η μέγιστη σχετική απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη είναι της τάξης του 4 - 5%, αρκετά μικρότερη από τις αντίστοιχες σχετικές αποκλίσεις των άλλων δύο προσομοιώσεων. Ωστόσο, η σχετική απόκλιση, της μέσης τιμής της ταχύτητας που προκύπτει από την προσομοίωση από τη θεωρητική μέση τιμή είναι ίση με 0,220%, μεγαλύτερη δηλαδή από τις αντίστοιχες αποκλίσεις της πρώτης και δεύτερης προσομοίωσης.

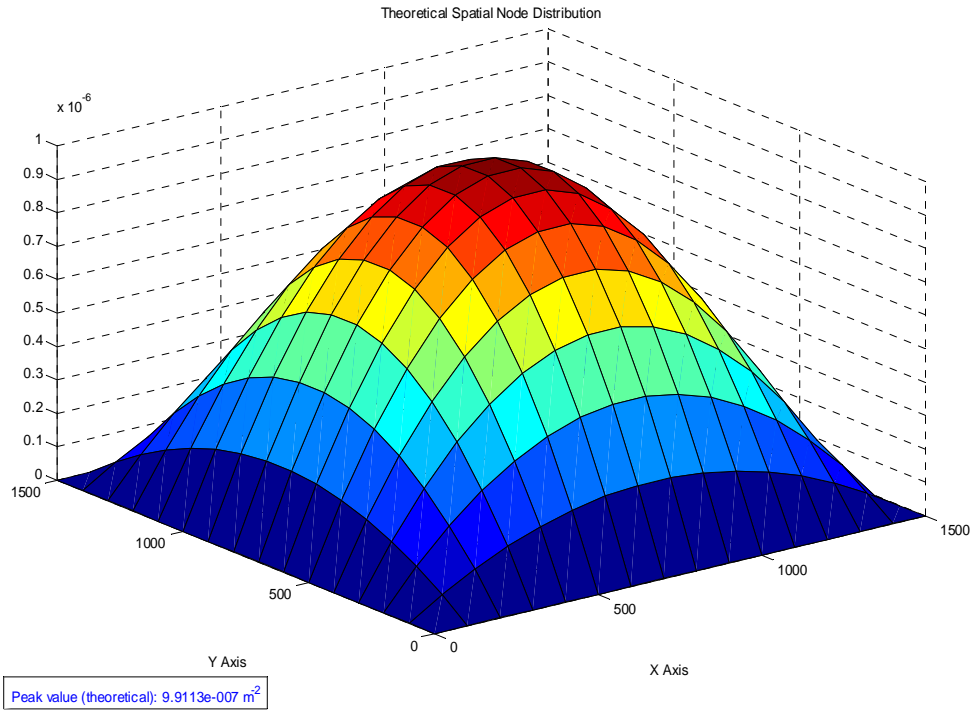
Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης που παράγεται από την τρίτη προσομοίωση (Σχήμα 14) παρουσιάζει κάποιες μικρές αποκλίσεις από την αντίστοιχη θεωρητική. Στη χειρότερη περίπτωση, η σχετική απόκλιση είναι της τάξης του 5%. Η σχετική απόκλιση των μέσων τιμών (προσομοίωσης και θεωρητικής) είναι ίση με 0.128%, μικρότερη δηλαδή από τις σχετικές αποκλίσεις της πρώτης και δεύτερης προσομοίωσης.

Τέλος, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης της προσομοίωσης στο Σχήμα 15 συγκλίνει σχεδόν απόλυτα με τη θεωρητική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Η μέση τιμή του χρόνου μετάβασης στην προσομοίωση αποκλίνει κατά 0.373% από τη θεωρητική μέση τιμή της, μία σχετική απόκλιση η οποία είναι χειρότερη από την αντίστοιχη απόκλιση της πρώτης προσομοίωσης αλλά καλύτερη από αυτήν της δεύτερης. Η μέγιστη απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη λαμβάνει χώρα στο μέγιστο της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας και είναι της τάξης του 1%.

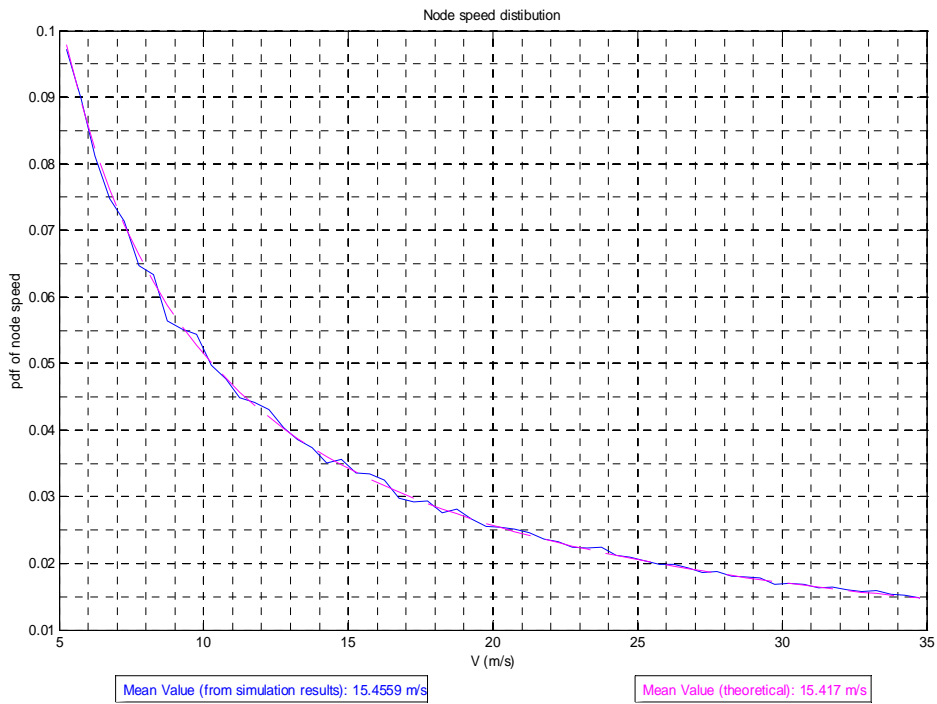
4^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple*Πίνακας 4: Παράμετροι 4^{ης} προσομοίωσης*

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 35] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	150
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s

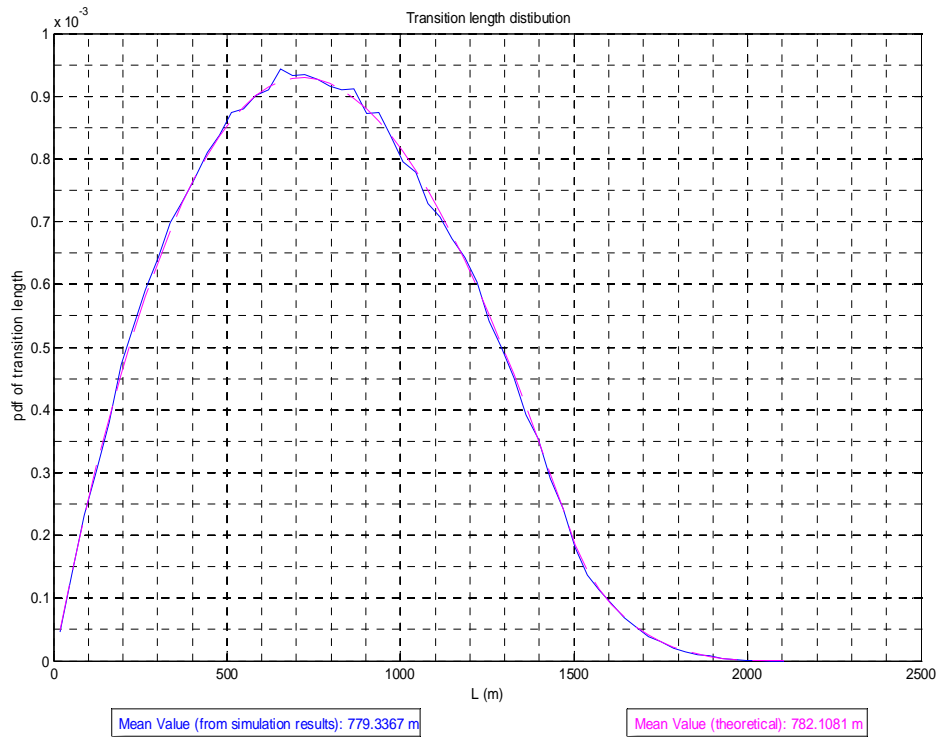
*Σχήμα 16: Χωρική κατανομή των κόμβων (θεωρητική)*



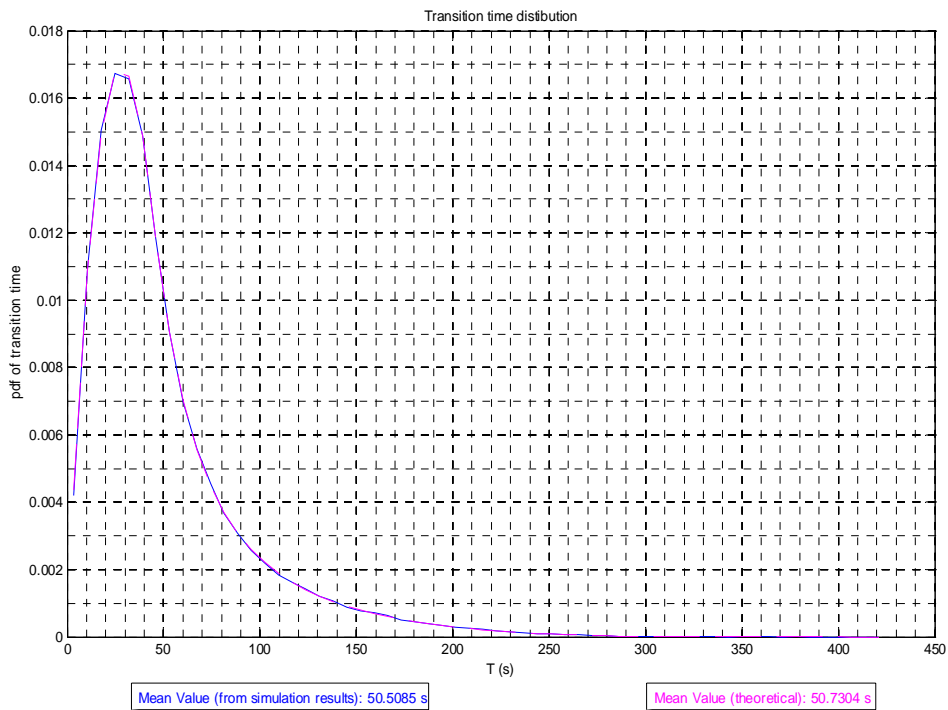
Σχήμα 17: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)



Σχήμα 18: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 19: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 20: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην τέταρτη προσομοίωση, η κύρια διαφορά με τις προηγούμενες προσομοιώσεις είναι η αλλαγή του πλήθους των κόμβων από 50 σε 150 και η μεταβολή του εύρους των τιμών της ταχύτητας σε [5, 35] m/s, το οποίο είναι πιο ρεαλιστικό σε σχέση με τα προηγούμενα. Παρατηρώντας τα Σχήματα 16 και 17, διαπιστώνουμε μεγάλη σύγκλιση ανάμεσα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα θεωρητικά αποτελέσματα. Η σχετική απόκλιση ανάμεσα στις μέγιστες τιμές είναι ίση με 1.907%. Η εξομάλυνση της χωρικής κατανομής των κόμβων που προκύπτει από την προσομοίωση οφείλεται στον τριπλάσιο αριθμό των κόμβων της προσομοίωσης σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Συνεπώς, έχουμε τριπλάσια δείγματα στην προσομοίωση αυτή για όλες τις καμπύλες, άρα και τριπλάσια ακρίβεια στα αποτελέσματά μας. Με άλλα λόγια, μπορούμε να πούμε πως αυτό ισοδυναμεί με εκτέλεση της προσομοίωσης με τον ίδιο αριθμό κόμβων με προηγουμένως (50) αλλά για τριπλάσιο χρόνο προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 18, όπου απεικονίζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων, παρατηρούμε μια μεγάλη διαφορά στην ομαλότητα της καμπύλης προσομοίωσης σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα, σε σχέση με την πρώτη προσομοίωση, η οποία έχει το ίδιο εύρος τιμών ταχύτητας (30 m/s) και ίδια χαρακτηριστικά προσομοίωσης με την τέταρτη προσομοίωση, έχουμε περίπου τριπλάσια ακρίβεια λόγω του τριπλάσιου αριθμού κόμβων. Η σχετική απόκλιση της της μέσης τιμής της ταχύτητας στην προσομοίωση σε σχέση με τη θεωρητική είναι ίση με 0.252% ενώ η μέγιστη απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη είναι της τάξης του 3%, γεγονός που επιβεβαιώνει τα πιο πάνω.

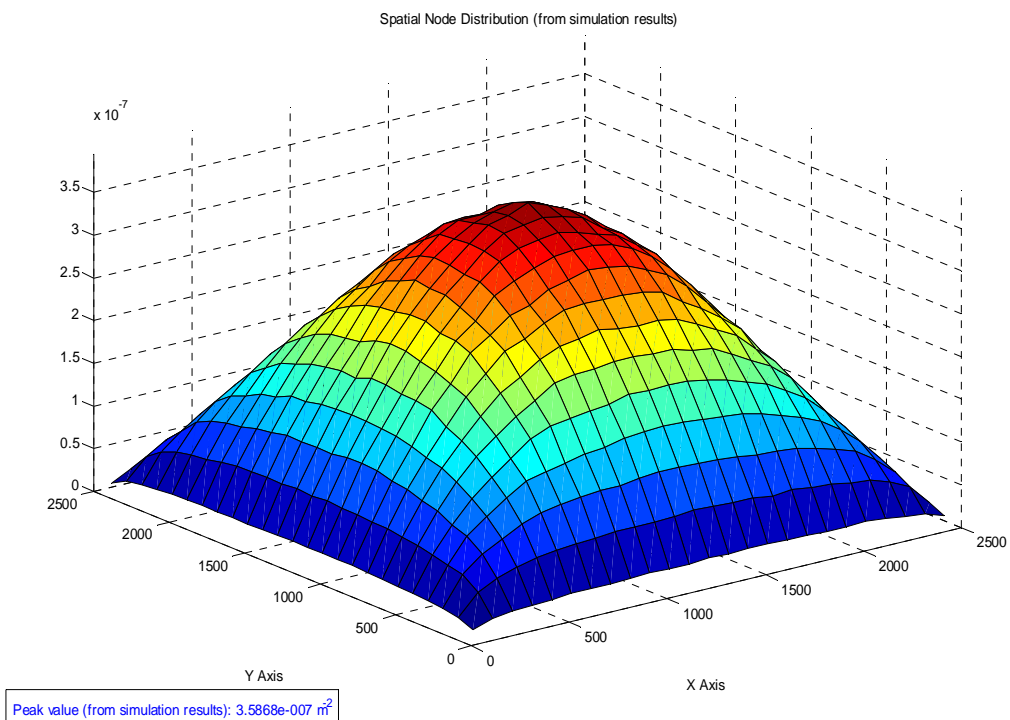
Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης που παράγεται από την τέταρτη προσομοίωση (Σχήμα 19), παρουσιάζει κάποιες μικρές αποκλίσεις από την αντίστοιχη θεωρητική, κυρίως στην περιοχή του μεγίστου, ωστόσο και πάλι έχει πιο ομαλή μορφή από τις αντίστοιχες καμπύλες των προηγούμενων προσομοιώσεων. Η μέγιστη απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη είναι λίγο μεγαλύτερη από 2%, σημαντικά καλύτερη από τις μέγιστες σχετικές αποκλίσεις των προηγούμενων προσομοιώσεων.

Τέλος, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης της προσομοίωσης στο Σχήμα 20, παρουσιάζει σχεδόν μηδενική απόκλιση από την αντίστοιχη θεωρητική και δείχνει με τον καλύτερο τρόπο τη διαφορά στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

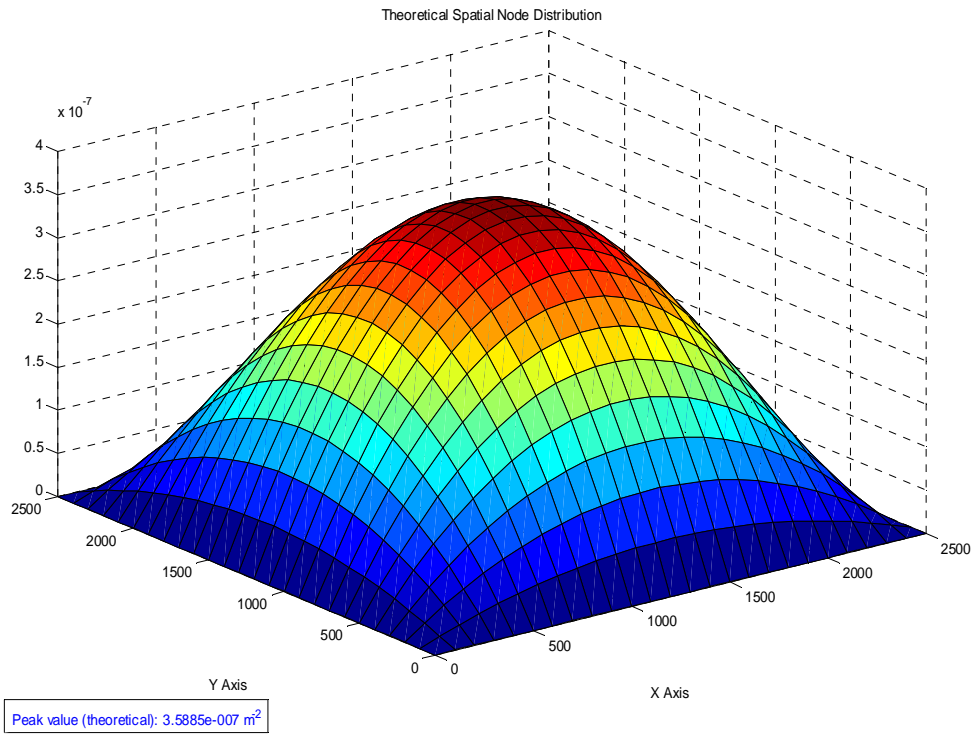
5^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_simple

Πίνακας 5: Παράμετροι 5^{ης} προσομοίωσης

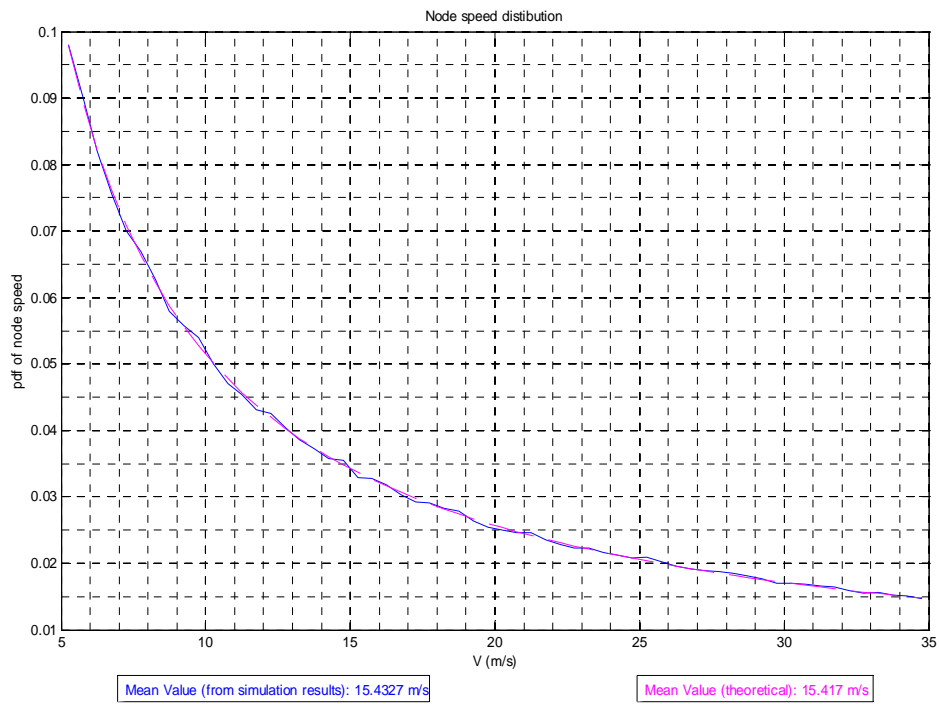
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 2500] x [0, 2500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 35] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	420
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s



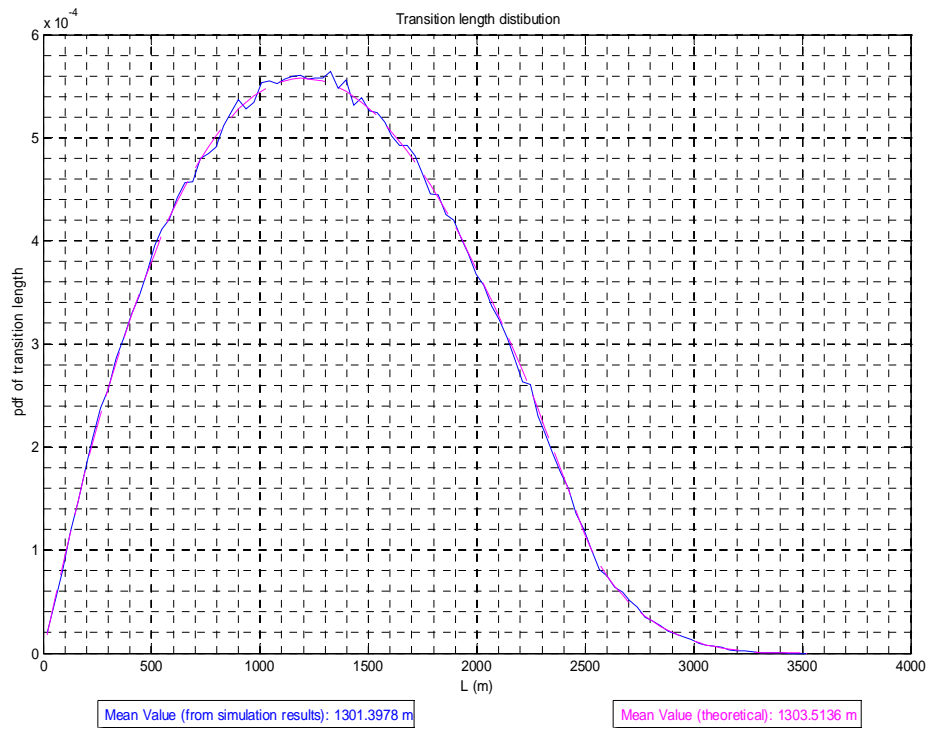
Σχήμα 21: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)



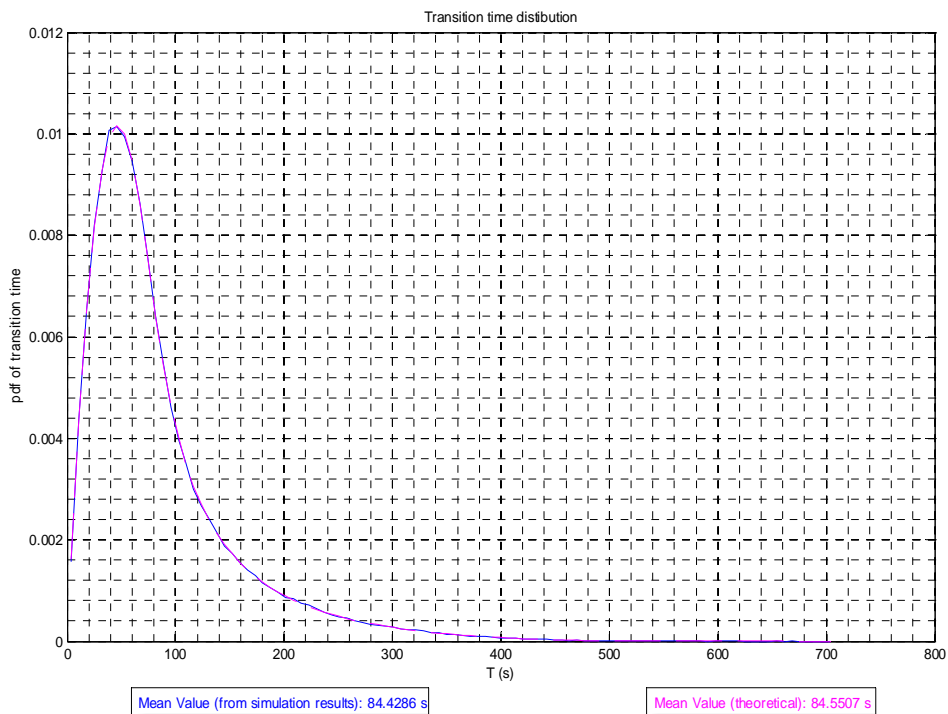
Σχήμα 22: Χωρική κατανομή των κόμβων (θεωρητική)



Σχήμα 23: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 24: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 25: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην πέμπτη προσομοίωση αλλάζουμε ουσιαστικά, σε σχέση με την τέταρτη, το μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης (αυξάνοντας το σε $[0, 2500] \times [0, 2500] \text{ m}^2$). Αυξάνουμε επίσης τον αριθμό των κόμβων από 150 σε 420, ωστόσο η αύξηση αυτή γίνεται αναλογικά με την αύξηση του εμβαδού της περιοχής προσομοίωσης, έτσι ώστε να έχουμε τον ίδιο αριθμό κόμβων ανά μονάδα επιφάνειας και στις δύο προσομοιώσεις. Επομένως, αυτό που παρατηρούμε στο Σχήμα 21 είναι μια ομαλή μορφή της χωρικής κατανομής, που συγκλίνει σημαντικά προς τη θεωρητική κατανομή του Σχήματος 22. Η ακρίβεια της προσομοίωσης είναι και πάλι περίπου τριπλάσια από τις πρώτες τρεις προσομοιώσεις, αφού τα δείγματα που λάβαμε είναι, λόγω αναλογίας του εμβαδού της περιοχής και του αριθμού των κόμβων, τριπλάσια από αυτά που είχαμε σε αυτές. Αυτό φαίνεται και από την πολύ μικρή τιμή της σχετικής απόκλισης των μέγιστων τιμών των δύο κατανομών (προσομοίωσης και θεωρητικής), που είναι ίση με 0.047%.

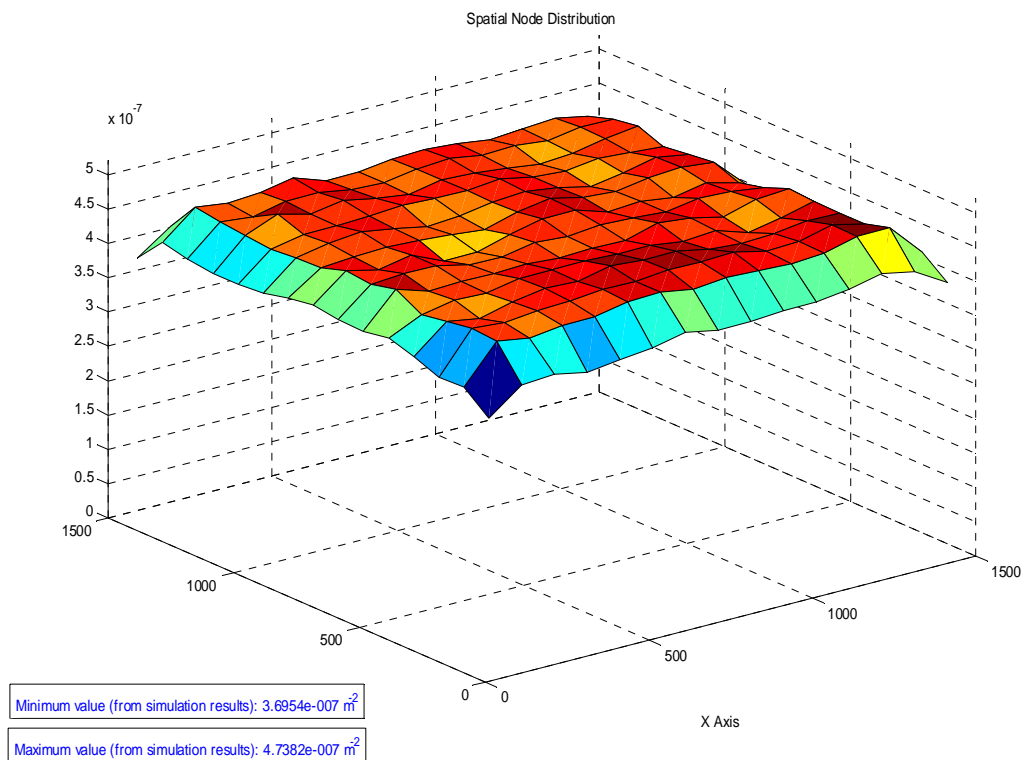
Στο Σχήμα 23, παρατηρούμε πως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων σχεδόν συμπίπτει με τη θεωρητική συνάρτηση. Η βελτίωση αυτή σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις οφείλεται στο μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων που λαμβάνονται για την ταχύτητα των κόμβων, λόγω ακριβώς του μεγαλύτερου αριθμού κόμβων της προσομοίωσης.

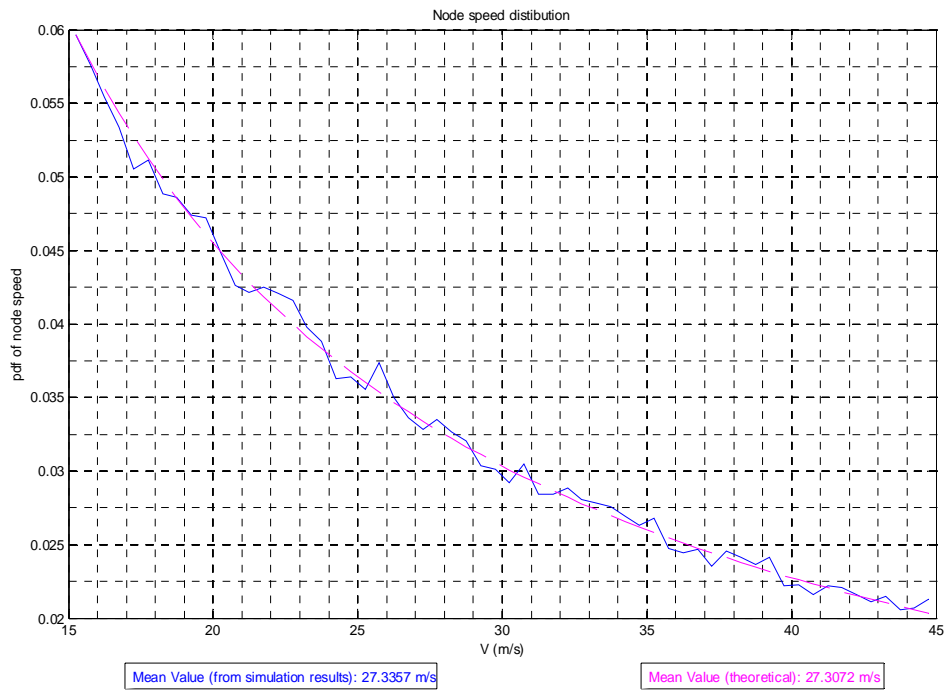
Στο Σχήμα 24, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης, παρατηρούμε όπως ήταν αναμενόμενο, μια διαπλάτυνση της καμπύλης και μια αύξηση στη μέση τιμή του μήκους μετάβασης, αφού λόγω της αύξησης του μεγέθους της περιοχής προσομοίωσης το μήκος μετάβασης μπορεί να πάρει μεγαλύτερες τιμές. Επιπρόσθετα, λόγω ακριβώς αυτής της αύξησης του εύρους τιμών για το μήκος μετάβασης, διαπιστώνουμε μια μείωση του μέγιστου της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

Τέλος, μελετώντας στο Σχήμα 25 τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης, παρατηρούμε πως οι δύο καμπύλες (προσομοίωση και θεωρητική) σχεδόν ταυτίζονται. Επίσης, παρατηρούμε και πάλι μια διαπλάτυνση της καμπύλης και μια αύξηση της μέσης τιμής του χρόνου μετάβασης σε σχέση με την τέταρτη προσομοίωση, λόγω της αύξησης του μήκους μετάβασης. Παρόμοια με το μήκος μετάβασης, το μέγιστο της συνάρτησης μειώνεται σημαντικά συγκρινόμενο με αυτό στην τέταρτη προσομοίωση, επειδή ακριβώς ο χρόνος μετάβασης κυμαίνεται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών από προηγουμένως.

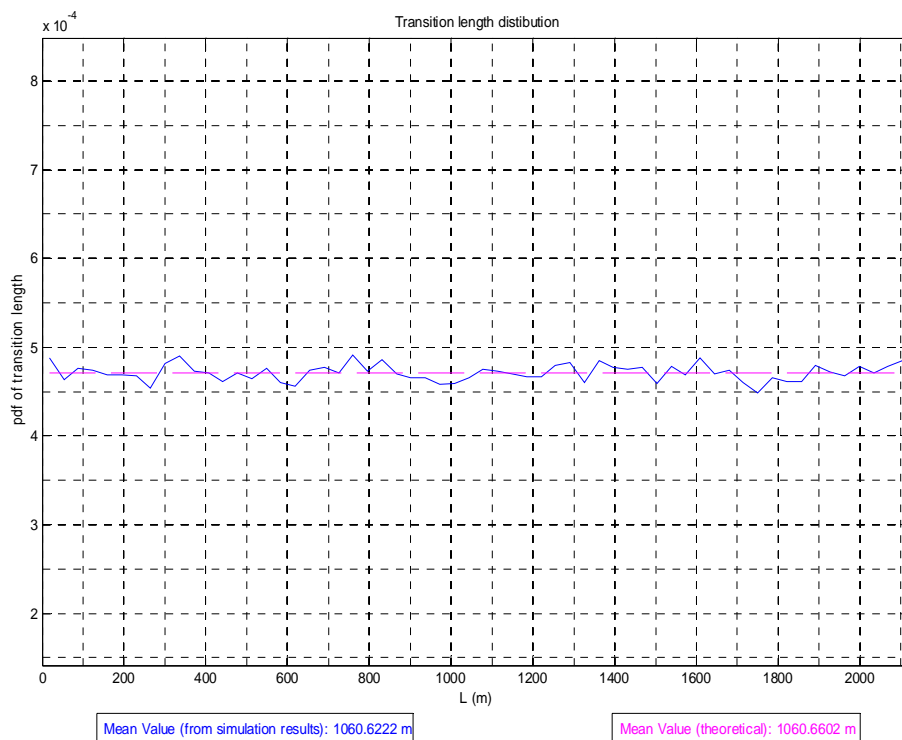
6^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple*Πίνακας 6: Παράμετροι 6^{ης} προσομοίωσης*

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[15, 45] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s

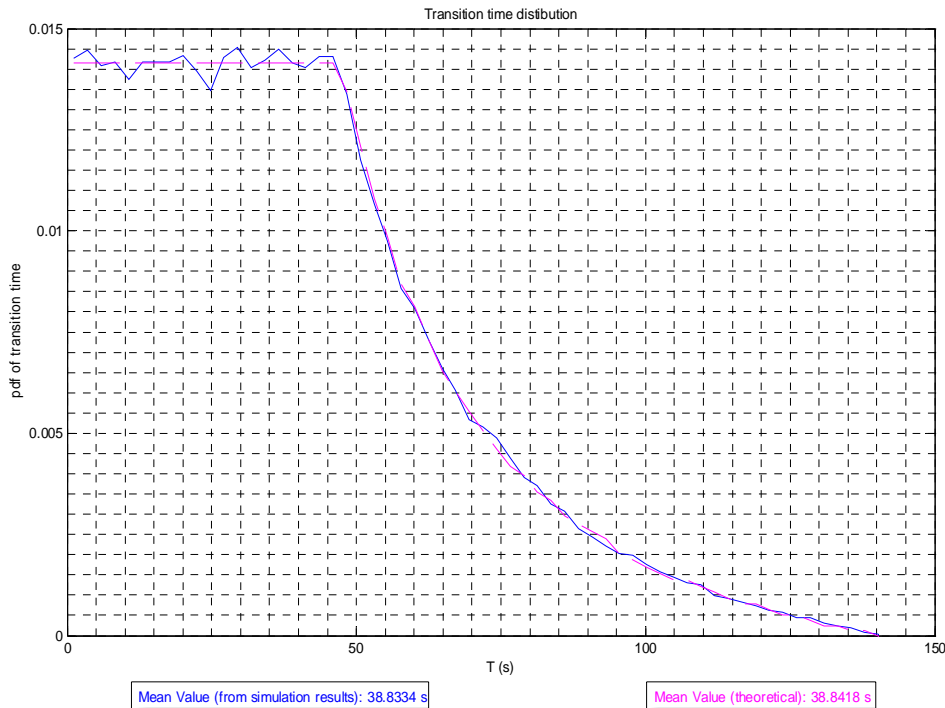
*Σχήμα 26: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)*



Σχήμα 27: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 28: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 29: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην έκτη προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε τις ίδιες τιμές για τις παραμέτρους με την πρώτη προσομοίωση αλλά εφαρμόσαμε το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης (RD). Στο Σχήμα 26, απεικονίζεται η χωρική κατανομή των κόμβων που κινούνται με βάση το μοντέλο αυτό. Παρατηρούμε πως η κατανομή αυτή είναι σχεδόν ομοιόμορφη στην περιοχή προσομοίωσης, αποτέλεσμα που συμφωνεί με τα αναμενόμενα για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης (βλέπε παράγραφο A.2.4 στο κεφάλαιο 3), με μια απόκλιση της μέγιστης τιμής (maximum value) από την ελάχιστη τιμή (minimum value) ίση με $1.0428 \times 10^{-7} \text{ m}^{-2}$. Με άλλα λόγια, οι κόμβοι του μοντέλου Τυχαίας Κατεύθυνσης έχουν περίπου ίση πιθανότητα να βρίσκονται σε οποιαδήποτε θέση της περιοχής προσομοίωσης. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου και έρχεται σε αντίθεση με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, όπου οι κόμβοι «συσσωρεύονται» στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης.

Παρατηρώντας στη συνέχεια, από το Σχήμα 27, τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων, διαπιστώνουμε πως, παρά το γεγονός ότι η επιλογή της ταχύτητας των κόμβων στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης γίνεται από μια ομοιόμορφη κατανομή, η κατανομή της ταχύτητας στη μόνιμη κατάσταση δεν είναι ομοιόμορφη αλλά είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε κάποιες αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη. Συγκεκριμένα, για μικρές τιμές της ταχύτητας οι απόλυτες αποκλίσεις των δύο

κατανομών είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αποκλίσεις για μεγάλες τιμές της ταχύτητας. Στη χειρότερη περίπτωση, η σχετική απόκλιση των δύο κατανομών είναι της τάξης του 4% ενώ η σχετική απόκλιση της μέσης τιμής της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη είναι 0.104%.

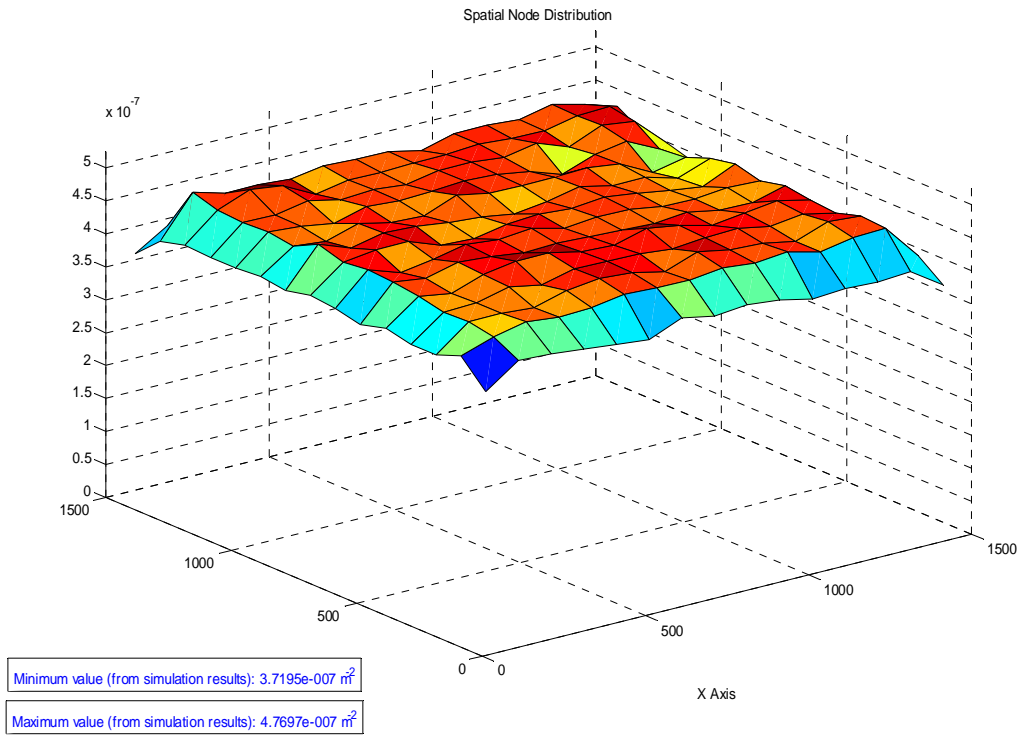
Στο Σχήμα 28, παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης. Η συνάρτηση που προκύπτει από την προσομοίωση έχει κάποιες αποκλίσεις από την αντίστοιχη θεωρητική, η οποία είναι ομοιόμορφη, αφού στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης το μήκος μετάβασης επιλέγεται από μια ομοιόμορφη κατανομή. Οι σχετικές αποκλίσεις της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της προσομοίωσης από την αντίστοιχη θεωρητική είναι στη χειρότερη περίπτωση της τάξης του 5%. Αντίστοιχα, η σχετική απόκλιση των μέσων τιμών είναι σχεδόν μηδενική (ίση με 0,004%). Αξίζει να θυμηθούμε πως στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης δεν είναι ομοιόμορφη.

Τέλος, στο Σχήμα 29, απεικονίζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης. Η καμπύλη που προκύπτει από την προσομοίωση αρχικά είναι σταθερή (ομοιόμορφη) και ακολούθως φθίνει μέχρις ότου μηδενιστεί, αποκλίνοντας ελάχιστα από τη θεωρητική κατανομή. Η μέγιστη σχετική απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική εντοπίζεται στην περιοχή όπου η συνάρτηση είναι σταθερή και είναι της τάξης του 4% ενώ η σχετική απόκλιση των μέσων τιμών ισούται με 0.022%.

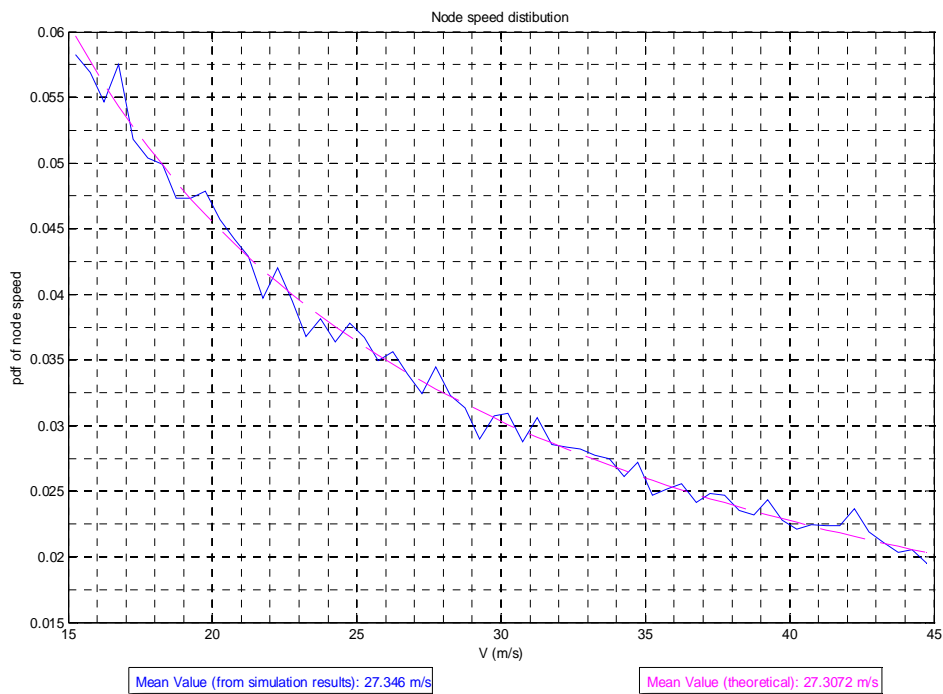
7^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple

Πίνακας 7: Παράμετροι 7^{ης} προσομοίωσης

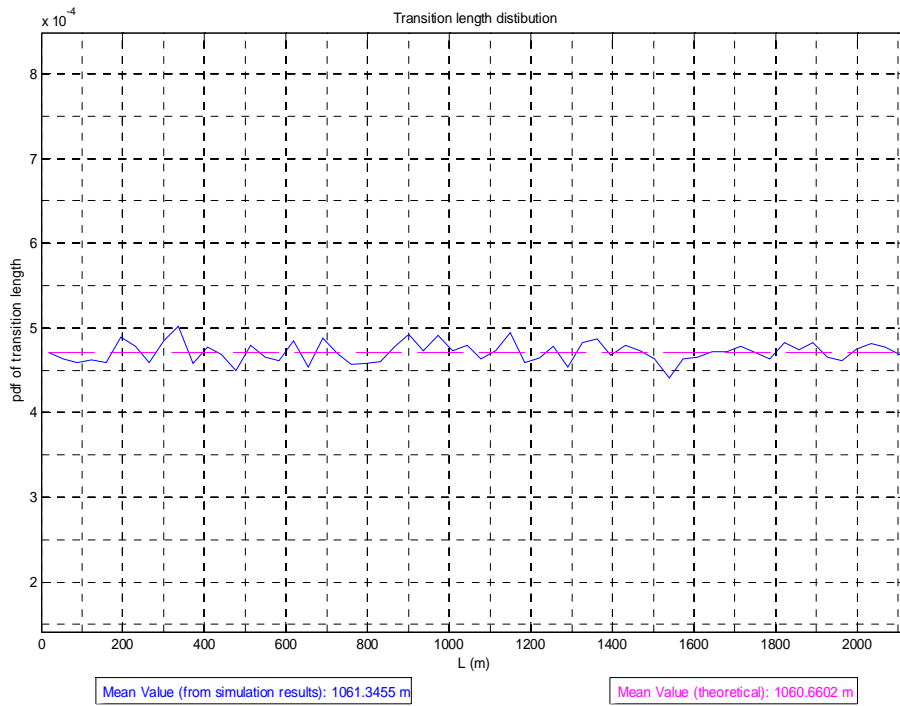
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 15] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[15, 45] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s



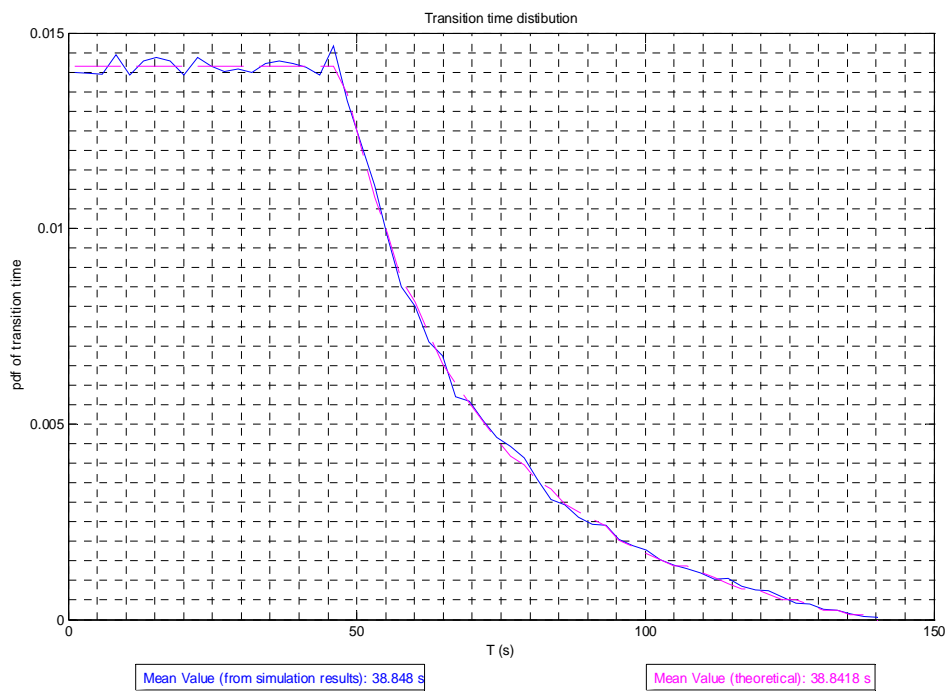
Σχήμα 30: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)



Σχήμα 31: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 32: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 33: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην έβδομη προσομοίωση, αυτό που μεταβάλλεται σε σχέση με την έκτη, είναι η προσθήκη της δυνατότητας παύσης των κόμβων στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης για ένα συγκεκριμένο χρόνο παύσης, που επιλέγεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0,15]$ s. Παρατηρώντας επομένως στο Σχήμα 30 τη χωρική κατανομή των κόμβων, όπως αυτή προκύπτει από την προσομοίωση, διαπιστώνουμε, παρόμοια με την έκτη προσομοίωση, μια κατανομή πολύ κοντά στην ομοιόμορφη, με μια ελαφρώς μεγαλύτερη όμως απόλυτη απόκλιση μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Ωστόσο, αν παρατηρήσουμε προσεκτικά τα δύο σχήματα (Σχήματα 26 και 30), διαπιστώνουμε πως στην περίπτωση της προσομοίωσης αυτής (με χρόνο παύσης), η χωρική κατανομή των κόμβων παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση από την αντίστοιχη της έκτης προσομοίωσης, αν εξαιρέσουμε τα άκρα της περιοχής προσομοίωσης. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε πως η ύπαρξη του χρόνου παύσης τείνει να μειώσει τις κυματώσεις.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων (Σχήμα 31) έχει την ίδια μορφή με την αντίστοιχη συνάρτηση στις προηγούμενες προσομοιώσεις. Η μέγιστη σχετική απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη είναι της τάξης του 6% ενώ η σχετική απόκλιση της μέσης τιμής της ταχύτητας που προκύπτει από την προσομοίωση και της θεωρητικής μέσης τιμής της ταχύτητας είναι 0.142% και είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της έκτης προσομοίωσης (0,104%). Αυτό συμβαίνει, επειδή στην προσομοίωση αυτή, λόγω του μεγάλου χρόνου παύσης, οι κόμβοι που βρίσκονται σε κίνηση και επομένως δειγματοληπτείται η ταχύτητά τους είναι λιγότεροι από την προηγούμενη προσομοίωση. Κατά συνέπεια, θα έχουμε λιγότερα δείγματα άρα και μικρότερη ακρίβεια.

Μελετώντας από το Σχήμα 32 τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης, παρατηρούμε την ίδια ομοιόμορφη συνάρτηση με την έκτη προσομοίωση, με κάποιες μικρές αποκλίσεις πάλι από την αντίστοιχη θεωρητική ομοιόμορφη συνάρτηση, που στη χειρότερη περίπτωση είναι της τάξης του 7%. Επομένως, παρατηρούμε χειροτέρευση σε σχέση με το 5% της έκτης προσομοίωσης. Η σχετική απόκλιση της μέσης τιμής του μήκους μετάβασης που προκύπτει από την προσομοίωση και της θεωρητικής μέσης τιμής είναι 0.065% και είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη απόκλιση της έκτης προσομοίωσης. Αυτό οφείλεται στο ότι το πλήθος των μεταβάσεων για τον ίδιο χρόνο προσομοίωσης είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση που δεν έχουμε χρόνο παύσης (έκτη προσομοίωση) σε σχέση με την περίπτωση όπου υπάρχει χρόνος παύσης (έβδομη προσομοίωση), διότι οι κόμβοι κινούνται συνεχώς όταν δεν έχουν τη δυνατότητα παύσης. Επομένως, αφού εκτελούν περισσότερες μεταβάσεις στο ίδιο χρονικό διάστημα, τότε στην έκτη προσομοίωση θα έχουμε περισσότερα δείγματα με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

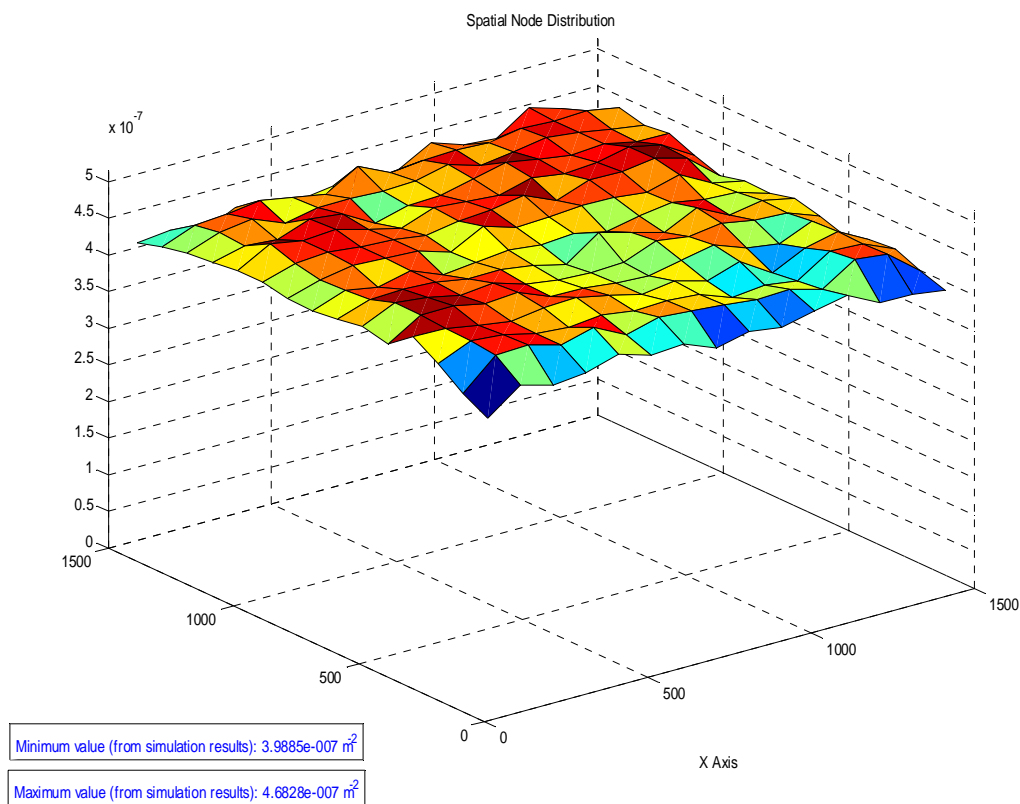
Τέλος, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης όπως προκύπτει από την προσομοίωση (Σχήμα 33) σχεδόν ταυτίζεται με τη θεωρητική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, με μια μέγιστη απόκλιση από αυτήν της τάξης του 3.5% στο σημείο που αρχίζει να φθίνει. Η σχετική απόκλιση των μέσων τιμών (προσομοίωση – θεωρητική) είναι ίση με 0.016%, γεγονός που αποδεικνύει την ορθότητα του μοντέλου προσομοίωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μέσος χρόνος μετάβασης είναι αρκετά

μεγαλύτερος σε σχέση με τον αντίστοιχο για τη δεύτερη προσομοίωση (Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων με αντίστοιχες παραμέτρους). Αυτό σημαίνει πως οι μεταβάσεις τείνουν να διαρκούν περισσότερο στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.

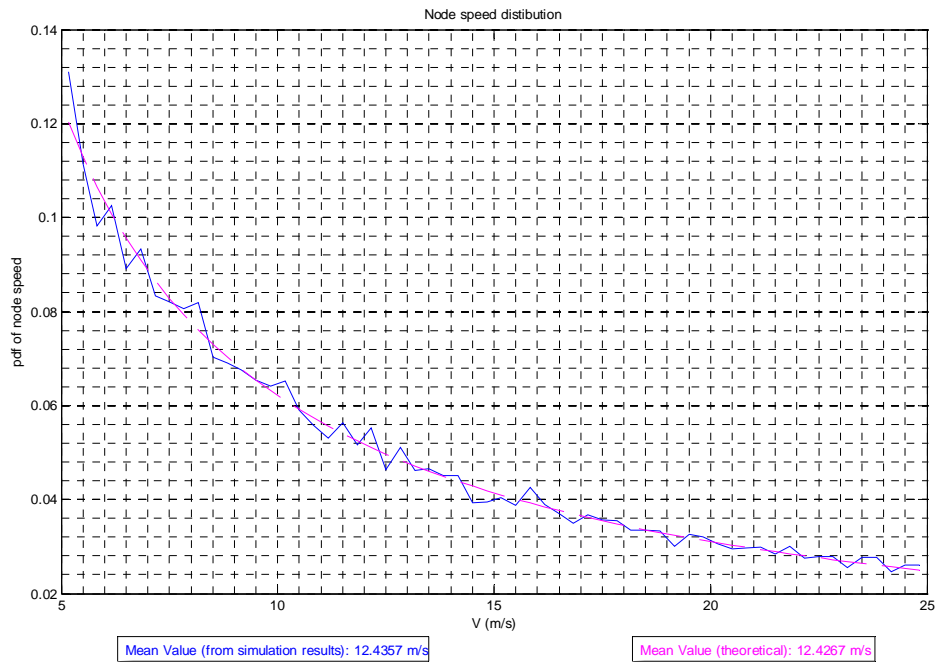
8^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple

Πίνακας 8: Παράμετροι 8^{ης} προσομοίωσης

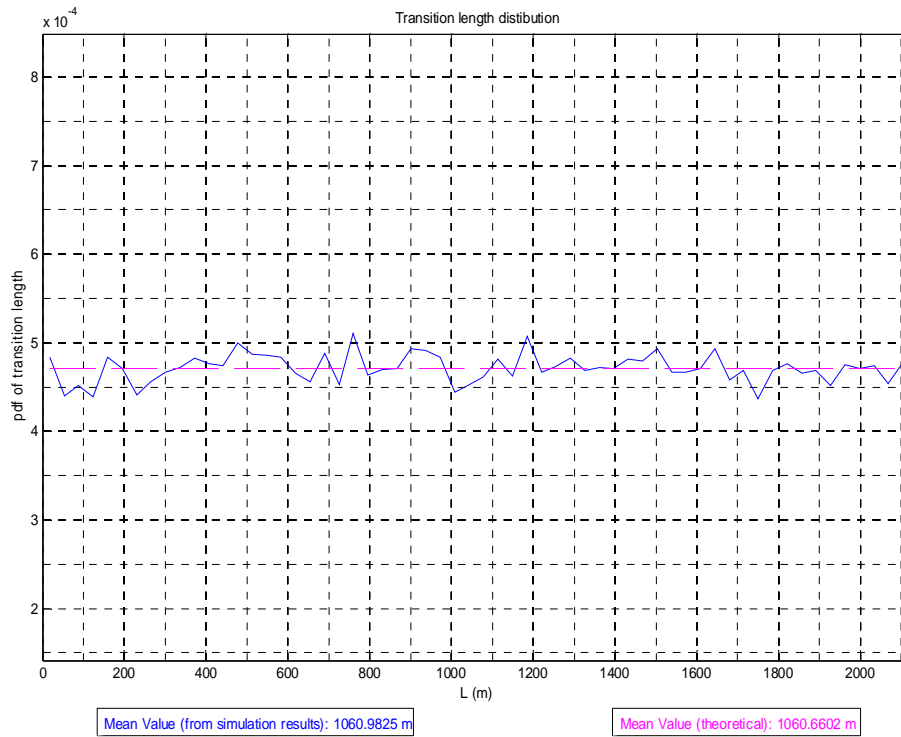
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 5] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 25] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s



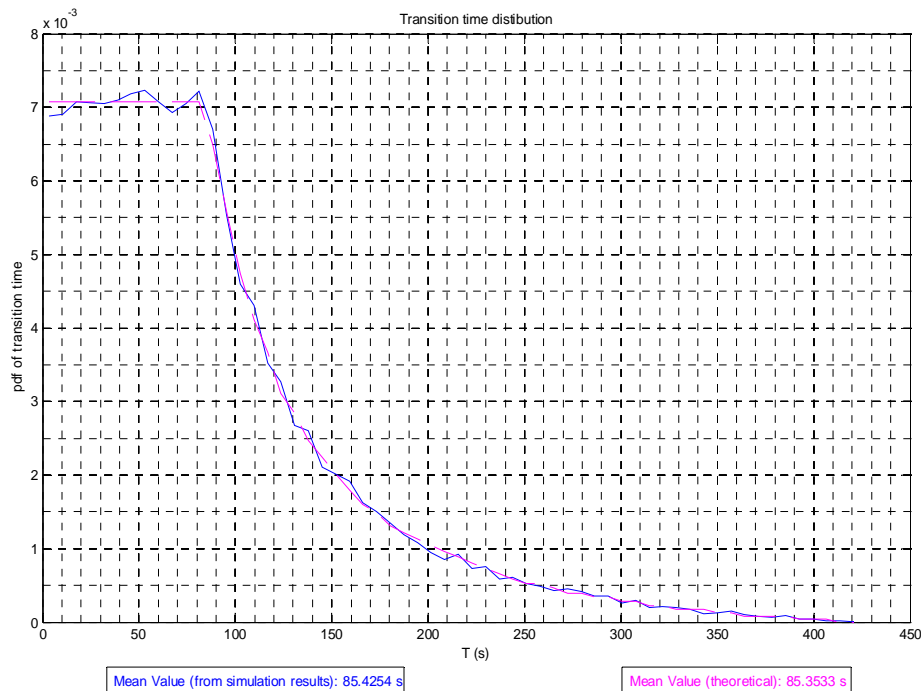
Σχήμα 34: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)



Σχήμα 35: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 36: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 37: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην όγδοη προσομοίωση μεταβάλλουμε, σε σχέση με την έβδομη προσομοίωση, το διάστημα από το οποίο λαμβάνει τιμές ο χρόνος παύσης από $[0, 15]$ s σε $[0, 5]$ s καθώς και το αντίστοιχο διάστημα για την ταχύτητα των κόμβων από $[15, 45]$ m/s σε $[5, 25]$ m/s. Παρατηρώντας επομένως στο Σχήμα 34 τη χωρική κατανομή των κόμβων, όπως αυτή προκύπτει από την προσομοίωση, διαπιστώνουμε, παρόμοια με τις προηγούμενες δύο προσομοιώσεις, μια κατανομή πολύ κοντά στην ομοιόμορφη. Ωστόσο, αν παρατηρήσουμε προσεκτικά τα Σχήματα 30 και 34, διαπιστώνουμε πως στην περίπτωση της προσομοίωσης αυτής (με μικρότερο μέσο χρόνο παύσης), η χωρική κατανομή των κόμβων παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση από την αντίστοιχη της έβδομης προσομοίωσης, αν εξαιρέσουμε τα άκρα της περιοχής προσομοίωσης.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων (Σχήμα 35) έχει την ίδια μορφή με την αντίστοιχη συνάρτηση στην έκτη προσομοίωση. Η μέγιστη σχετική απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη είναι της τάξης του 4% ενώ η σχετική απόκλιση της μέσης τιμής της ταχύτητας που προκύπτει από την προσομοίωση και της θεωρητικής μέσης τιμής της ταχύτητας είναι 0.072%. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε πως η καμπύλη έχει λιγότερες διακυμάνσεις σε σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη στην έκτη προσομοίωση. Από αυτό, συμπεραίνουμε πως η θετική επίδραση που έχει το μικρότερο εύρος ταχυτήτων στην όγδοη προσομοίωση (επομένως περισσότερα δείγματα ανά μονάδα ταχύτητας) είναι μεγαλύτερη από την αρνητική επίδραση του χρόνου παύσης που μειώνει τον αριθμό των κόμβων που κινούνται και δειγματοληπτείται η ταχύτητά τους.

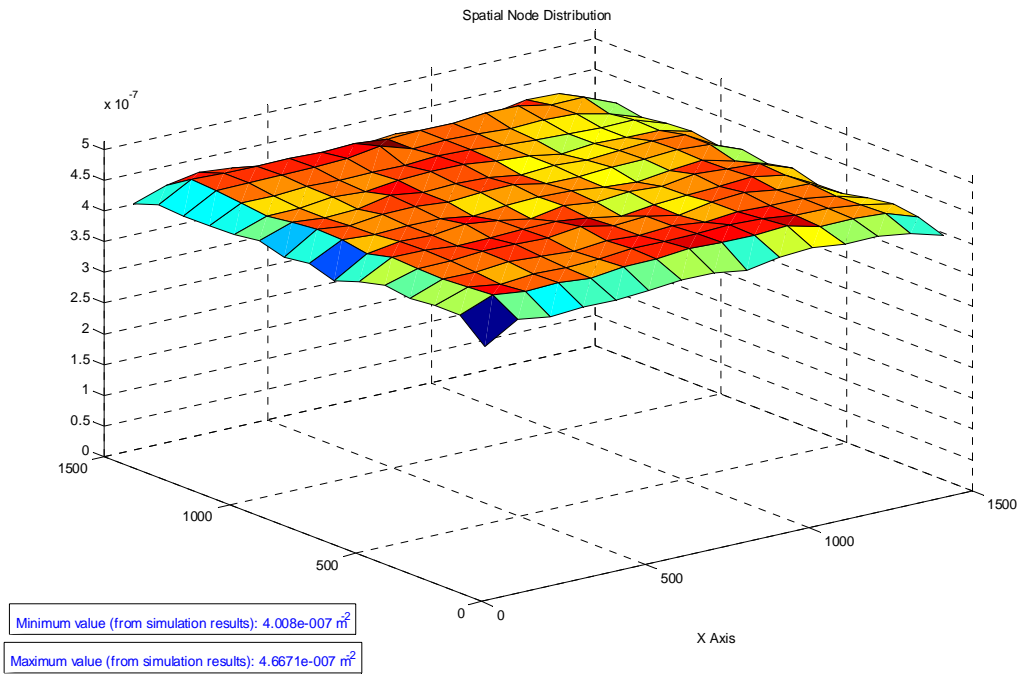
Μελετώντας από το Σχήμα 36 τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης, παρατηρούμε την ίδια ομοιόμορφη συνάρτηση με την έκτη προσομοίωση, με κάποιες μικρές αποκλίσεις από την αντίστοιχη θεωρητική, που στη χειρότερη περίπτωση είναι της τάξης του 8% . Επομένως, παρατηρούμε χειροτέρευση σε σχέση με το 5% της έκτης προσομοίωσης. Επίσης, η σχετική απόκλιση της μέσης τιμής του μήκους μετάβασης που προκύπτει από την προσομοίωση και της θεωρητικής μέσης τιμής είναι 0.030%, που είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της έκτης προσομοίωσης (0.004%). Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους: πρώτο, στην έκτη προσομοίωση δεν υπάρχει χρόνος παύσης στα σημεία στάσης και επομένως οι κόμβοι εκτελούν περισσότερες μεταβάσεις ανά μονάδα χρόνου από ότι στην όγδοη προσομοίωση και δεύτερο η μέση ταχύτητα των κόμβων στην έκτη προσομοίωση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την όγδοη προσομοίωση, με αποτέλεσμα οι κόμβοι να ολοκληρώνουν γρηγορότερα μια μετάβαση ίδιου μήκους και επομένως να επιτυγχάνουν μεγαλύτερο αριθμό μεταβάσεων.

Τέλος, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης όπως προκύπτει από την προσομοίωση (Σχήμα 37) σχεδόν ταυτίζεται με τη θεωρητική κατανομή με μια μέγιστη απόκλιση από αυτήν της τάξης του 2%. Η σχετική απόκλιση των μέσων τιμών (προσομοίωση – θεωρητική) είναι ίση με 0.084%. Συγκρίνοντας με τις δύο προηγούμενες προσομοιώσεις δεν παρατηρούμε σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

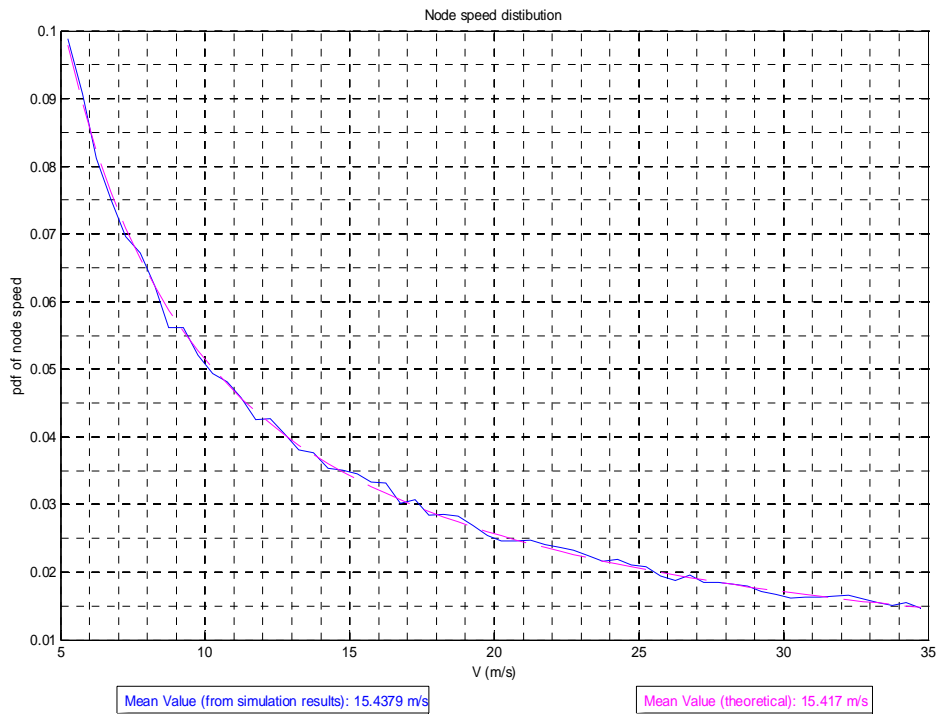
9^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple

Πίνακας 9: Παράμετροι 9^{ης} προσομοίωσης

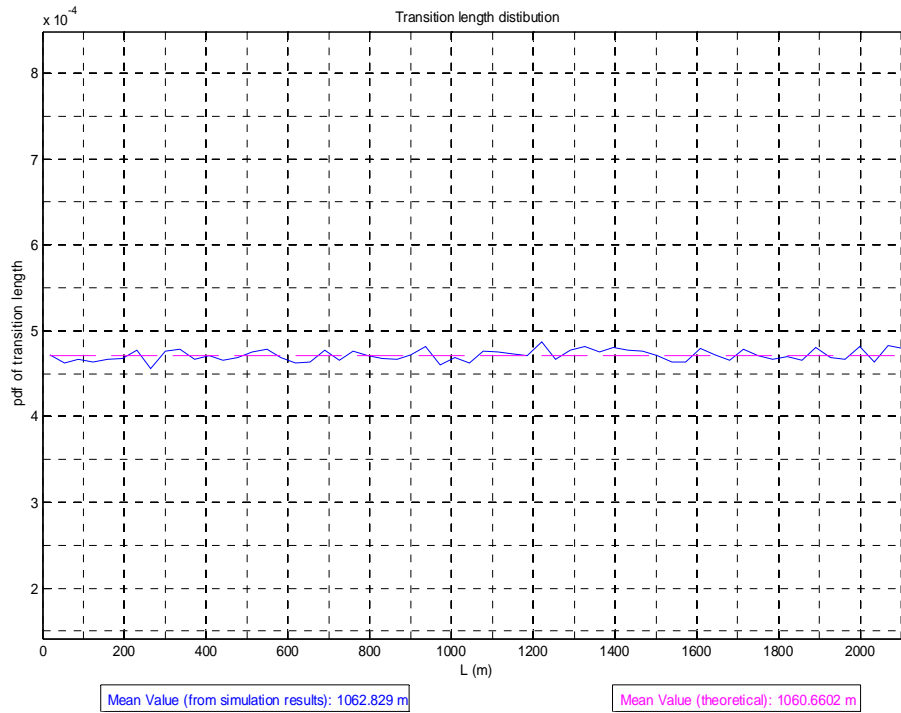
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 35] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	150
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s



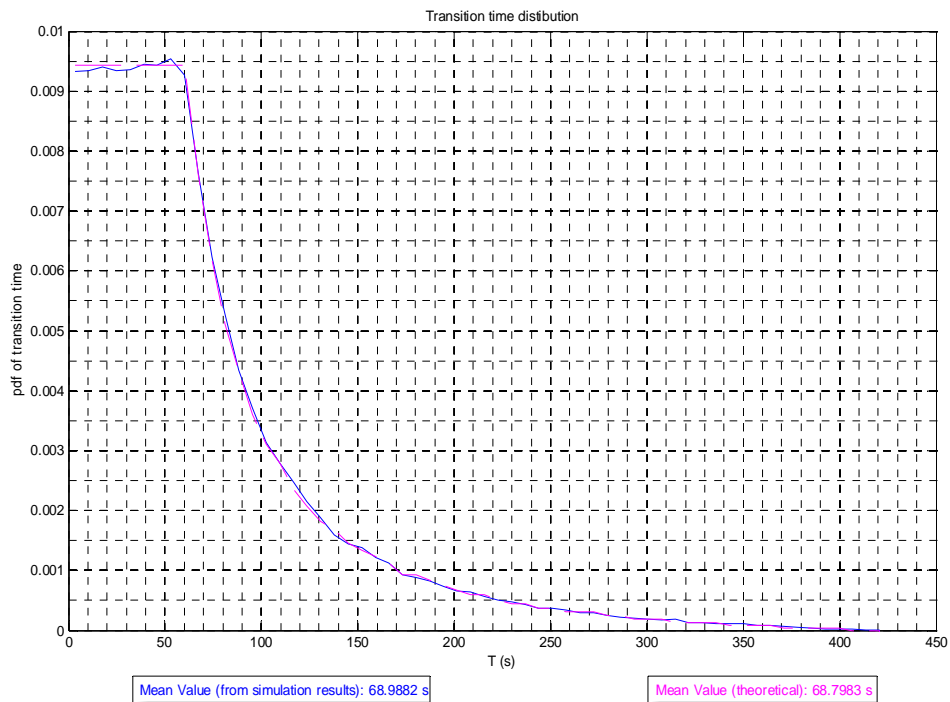
Σχήμα 38: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)



Σχήμα 39: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 40: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 41: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην 9^η προσομοίωση, μεταβάλλουμε τον αριθμό των κόμβων από 50 σε 150. Επίσης, το εύρος των τιμών της ταχύτητας, μεταβάλλεται σε [5, 35] m/s. Παρατηρώντας το Σχήμα 38, διαπιστώνουμε μια ομαλοποίηση της χωρικής κατανομής των κόμβων που προκύπτει από την προσομοίωση, σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις που αφορούν το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης. Αυτό αποδεικνύεται και από τη μικρότερη απόλυτη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής που παίρνει η κατανομή. Η εξομάλυνση της χωρικής κατανομής των κόμβων που προκύπτει από την προσομοίωση οφείλεται στον τριπλάσιο αριθμό των κόμβων σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις, που έχει ως αποτέλεσμα, τη λήψη τριπλάσιων δειγμάτων στην προσομοίωση αυτή για όλες τις καμπύλες, άρα και περίπου τριπλάσια ακρίβεια στα αποτελέσματά μας.

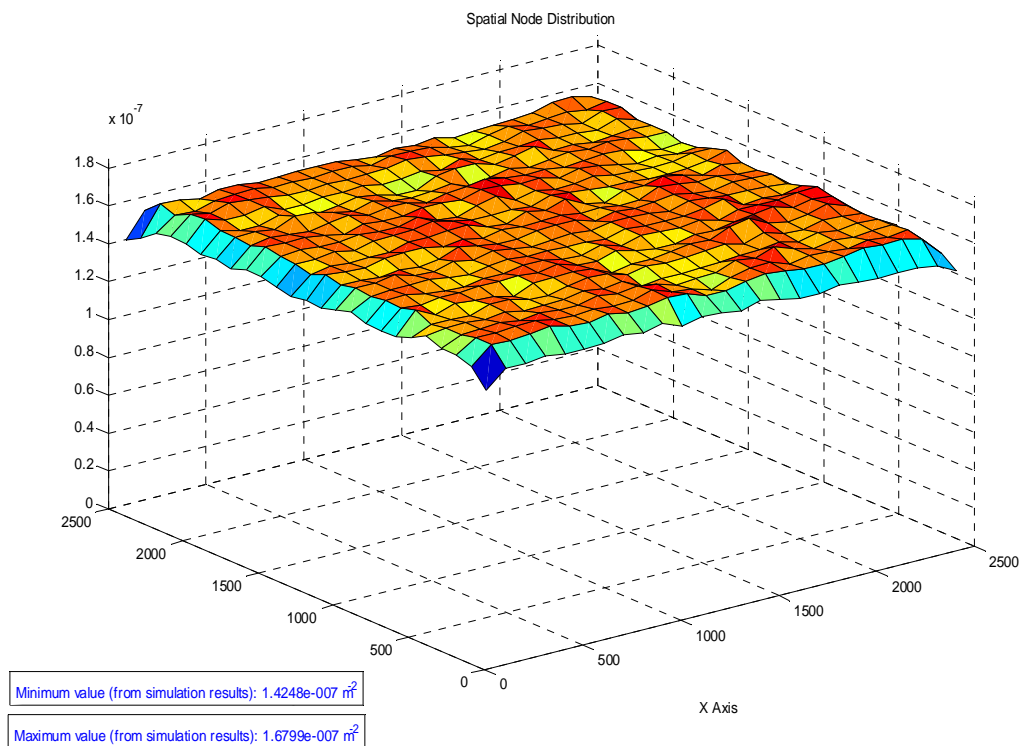
Στο Σχήμα 39, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων, παρατηρούμε μεγάλη βελτίωση στην ακρίβεια της καμπύλης προσομοίωσης σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα, συγκρινόμενη με την έκτη προσομοίωση, η οποία έχει το ίδιο εύρος τιμών ταχύτητας (30 m/s) και ίσες τιμές των παραμέτρων της προσομοίωσης με την ένατη προσομοίωση, έχουμε τριπλάσια ακρίβεια λόγω τριπλάσιου αριθμού κόμβων. Η σχετική απόκλιση της θεωρητικής μέσης τιμής της ταχύτητας και της μέσης τιμής της ταχύτητας στην προσομοίωση είναι ίση με 0.135% ενώ η μέγιστη απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη είναι της τάξης του 5%, γεγονός που επιβεβαιώνει τα πιο πάνω.

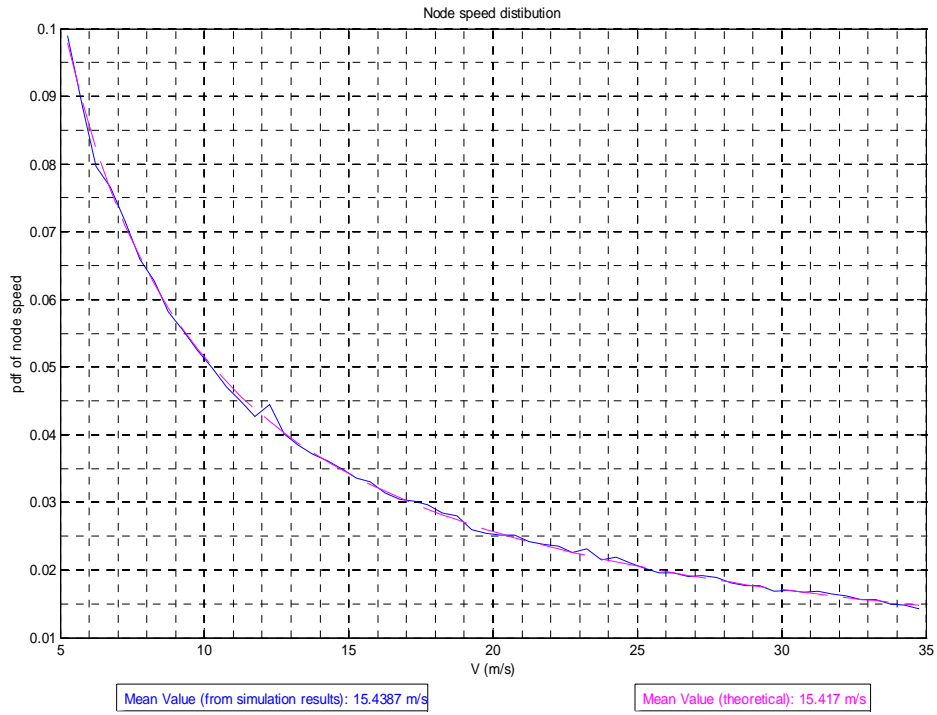
Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης που παράγεται από την ένατη προσομοίωση (Σχήμα 40) αν και παρουσιάζει κάποιες μικρές αποκλίσεις, έχει μια ομαλή μορφή από τις αντίστοιχες καμπύλες των προηγούμενων προσομοιώσεων και τείνει περισσότερο προς την ομοιόμορφη κατανομή. Η μέγιστη απόκλιση της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη είναι λίγο μεγαλύτερη από 4%, σημαντικά καλύτερη από τις μέγιστες σχετικές αποκλίσεις των προηγούμενων προσομοιώσεων.

Τέλος, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης της προσομοίωσης στο Σχήμα 41, παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις από την αντίστοιχη θεωρητική στην περιοχή όπου είναι σταθερή η συνάρτηση, ωστόσο είναι φανερή η βελτίωση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

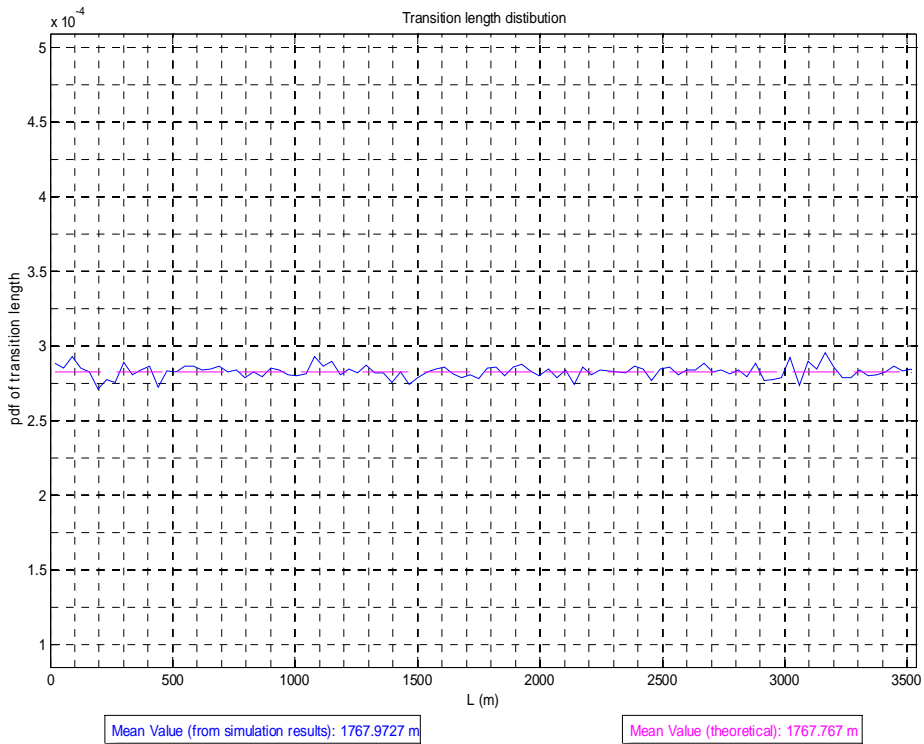
10^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_simple*Πίνακας 10: Παράμετροι 10^{ης} προσομοίωσης*

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 2500] x [0, 2500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 35] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	420
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s

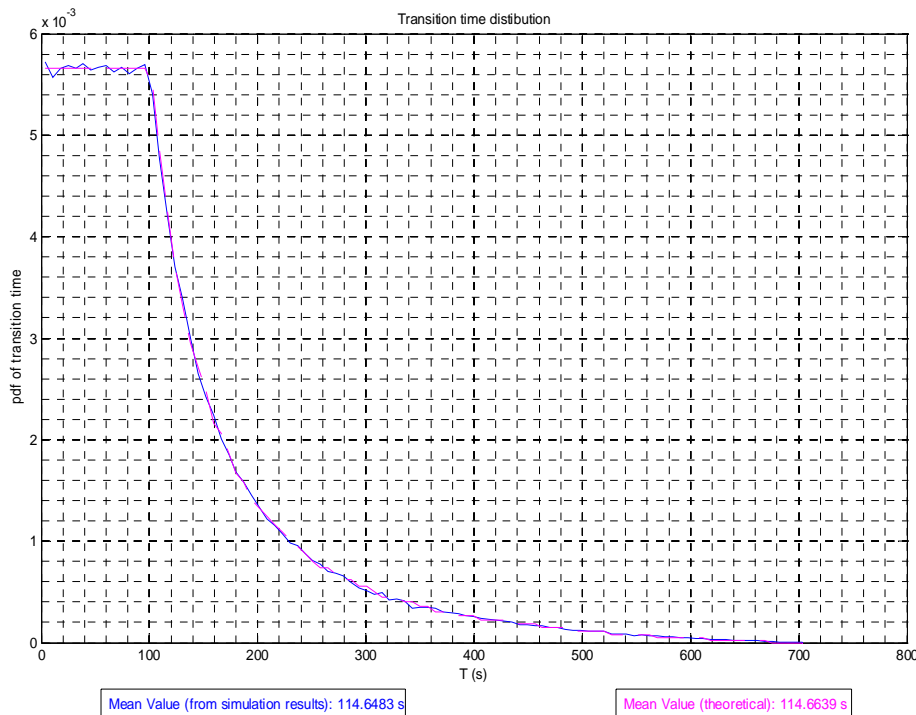
*Σχήμα 42: Χωρική κατανομή των κόμβων (προσομοίωση)*



Σχήμα 43: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων



Σχήμα 44: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης



Σχήμα 45: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στη 10^η προσομοίωση αλλάζουμε ουσιαστικά, σε σχέση με την 9^η προσομοίωση, το μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης (αυξάνοντας το σε $[0, 2500] \times [0, 2500] \text{ m}^2$). Λόγω της αύξησης του εμβαδού της περιοχής προσομοίωσης, αυξάνουμε αναλογικά με το εμβαδόν και τον αριθμό των κόμβων της προσομοίωσης από 150 σε 420, όπως και στην περίπτωση του μοντέλου Τυχαίων Στάσεων, έτσι ώστε να έχουμε τον ίδιο αριθμό κόμβων ανά μονάδα επιφάνειας και στις δύο προσομοιώσεις. Παρατηρώντας επομένως το Σχήμα 42 διαπιστώνουμε μια αρκετά ομαλή μορφή της χωρικής κατανομής, που συγκλίνει κατά ένα μεγάλο βαθμό προς την ομοιόμορφη. Η ακρίβεια της προσομοίωσης είναι και πάλι περίπου τριπλάσια από τις πρώτες τρεις προσομοιώσεις για το μοντέλο Τυχαίας Κατεύθυνσης, αφού τα δείγματα που λάβαμε είναι και πάλι, λόγω αναλογίας του εμβαδού της περιοχής και του αριθμού των κόμβων, τριπλάσια από αυτά που είχαμε σε αυτές. Αυτό επιβεβαιώνεται παρατηρώντας και τη διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της καμπύλης, η οποία προκύπτει σημαντικά μικρότερη από τις υπόλοιπες προσομοιώσεις.

Στο Σχήμα 43, παρατηρούμε πως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων, παρά τις κάποιες μικρές αποκλίσεις, συγκλίνει ως προς τη θεωρητική συνάρτηση. Η εξομάλυνση αυτή σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις οφείλεται στο μεγαλύτερο αριθμό κόμβων και κατά συνέπεια στη λήψη περισσότερων δειγμάτων της ταχύτητας των κόμβων, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στο Σχήμα 44, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης, παρατηρούμε όπως άλλωστε αναμενόταν, μια διαπλάτυνση της καμπύλης

και μια αύξηση στη μέση τιμή του μήκους μετάβασης, αφού λόγω της αύξησης του μεγέθους της περιοχής προσομοίωσης το μήκος μετάβασης μπορεί να πάρει μεγαλύτερες τιμές. Επιπρόσθετα, λόγω ακριβώς αυτής της αύξησης του εύρους τιμών για το μήκος μετάβασης, διαπιστώνουμε μια μείωση του μέγιστου της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

Τέλος, μελετώντας στο Σχήμα 45 τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης, παρατηρούμε πως οι δύο καμπύλες (προσομοίωση και θεωρητική) σχεδόν ταυτίζονται, με κάποιες μικρές αποκλίσεις στην περιοχή όπου η συνάρτηση είναι σταθερή. Επίσης, παρατηρούμε και πάλι μια διαπλάτυνση της καμπύλης και μια αύξηση της μέσης τιμής του χρόνου μετάβασης σε σχέση με την ένατη προσομοίωση, λόγω της αύξησης του μήκους μετάβασης. Παρόμοια με το μήκος μετάβασης, το μέγιστο της συνάρτησης μειώνεται σημαντικά συγκρινόμενο με αυτό στην ένατη προσομοίωση, επειδή ακριβώς ο χρόνος μετάβασης κυμαίνεται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών από προηγουμένως.

4.3. Προσομοιώσεις μοντέλων κινητικότητας σε κυψελωτά συστήματα

Η δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων (Προσομοιώσεις 10 ως 16) αφορούν στην υλοποίηση των Μοντέλων Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και Τυχαίας Κατεύθυνσης σε κυψελωτά συστήματα 9 και 25 κυψελών. Οι πρώτες τρεις προσομοιώσεις αφορούν στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και οι επόμενες τρεις στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.

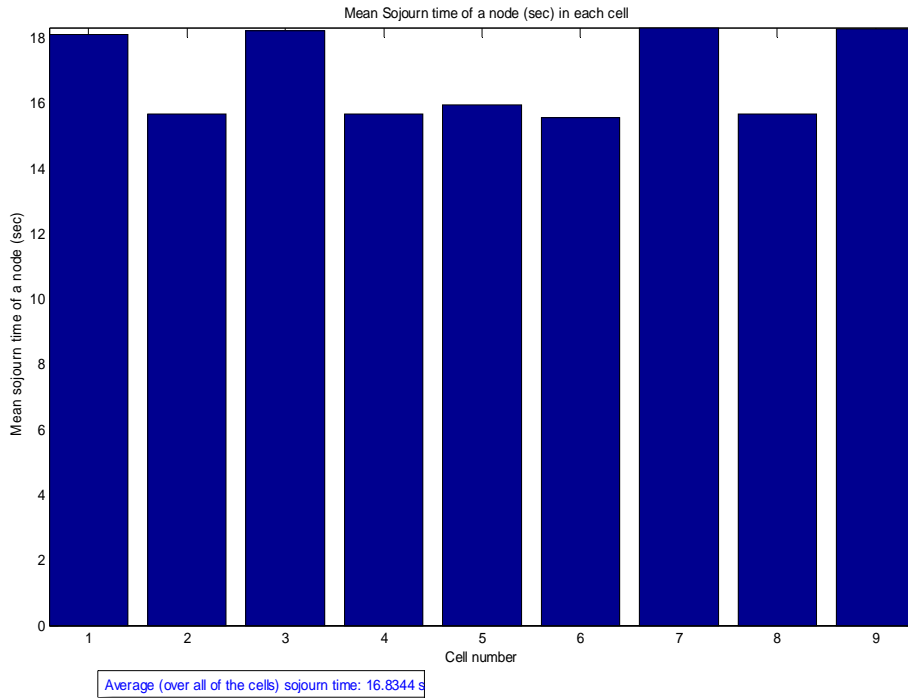
Για κάθε ένα από τα δύο μοντέλα κινητικότητας, εξετάσαμε τα εξής σενάρια:

- (i) Μηδενικός χρόνος παύσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητες από 15 ως 45 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 1500m δομημένη σε πλέγμα 9 κυψελών (3 x 3).
- (ii) Μηδενικός χρόνος παύσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητες 5 - 35 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 1500m δομημένη σε πλέγμα 9 κυψελών (3 x 3) με αυξημένο πλήθος κόμβων.
- (iii) Μηδενικός χρόνος παύσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητες 5 - 35 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 2500m δομημένη σε πλέγμα 25 κυψελών (5 x 5) με αυξημένο πλήθος κόμβων.

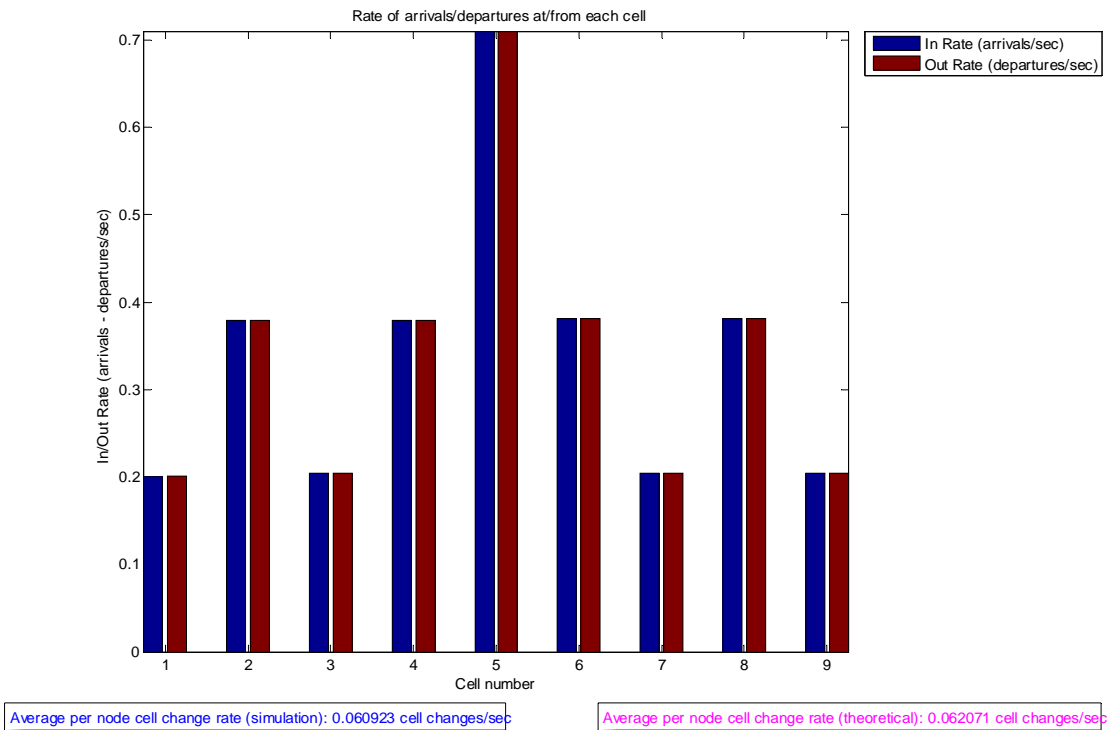
11^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_cellular

Πίνακας 11: Παράμετροι 11^{ης} προσομοίωσης

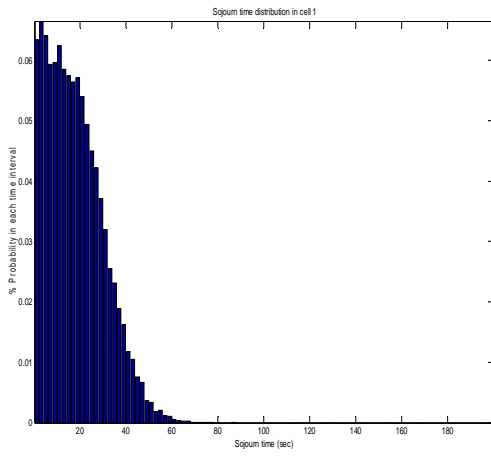
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[15, 45] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s
Πλήθος Κυψελών (numOfCellsX x numOfCellsY)	3 x 3 = 9 κυψέλες



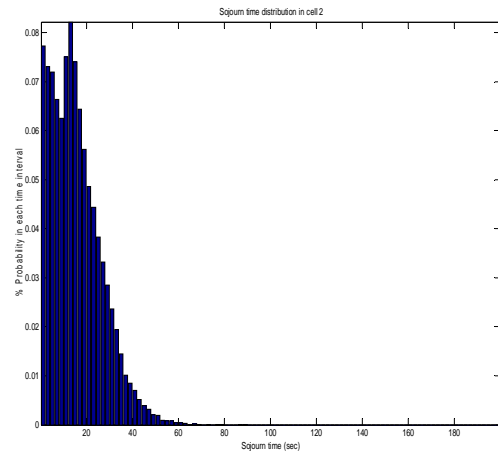
Σχήμα 46: Μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη



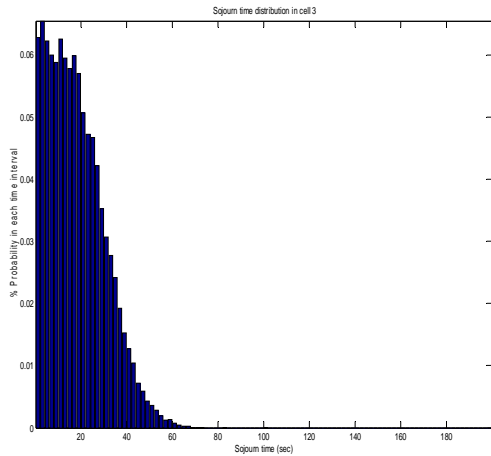
Σχήμα 47: Ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων σε/από κάθε κυψέλη



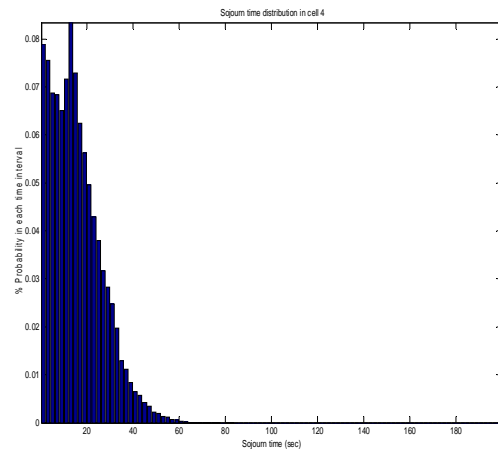
(i)



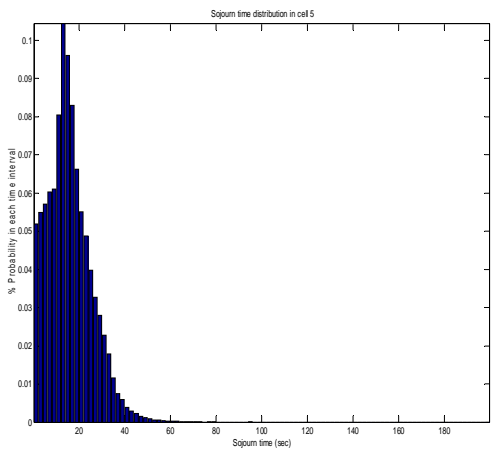
(ii)



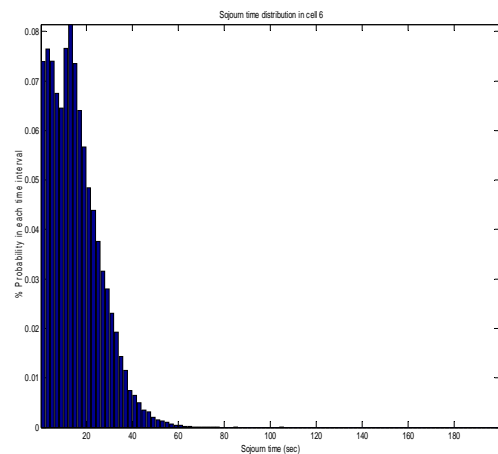
(iii)



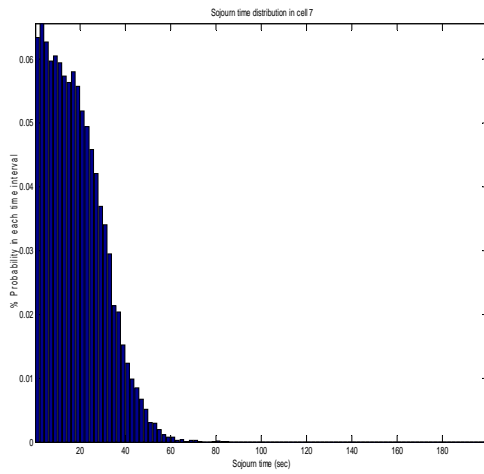
(iv)



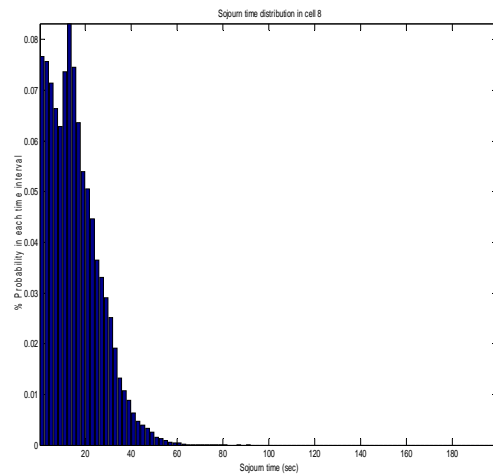
(v)



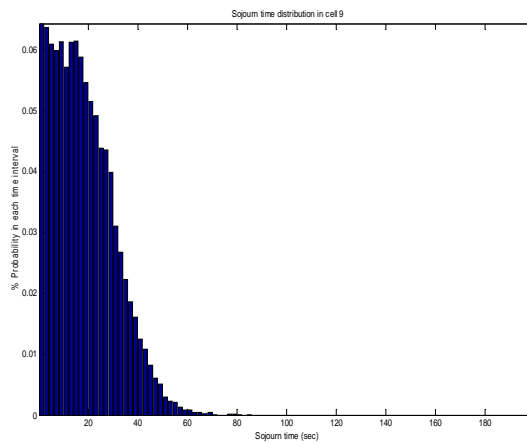
(vi)



(vii)



(viii)



(ix)

Σχήμα 48: Κατανομή χρόνου παραμονής σε κάθε κυψέλη

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην προσομοίωση αυτή μελετάμε τη συμπεριφορά της κίνησης των κόμβων σε ένα τετράγωνο κυψελωτό σύστημα 3 x 3 κυψελών. Το μοντέλο κινητικότητας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και οι τιμές των παραμέτρων της προσομοίωσης ήταν οι ίδιες με τις αντίστοιχες της πρώτης προσομοίωσης για το απλό μοντέλο.

Στο Σχήμα 46 απεικονίζεται ο μέσος χρόνος παραμονής (mean sojourn time) σε δευτερόλεπτα ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη, δηλαδή το μέσο χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ένας κινητός κόμβος εισέρχεται σε μια κυψέλη μέχρι τη χρονική στιγμή που εξέρχεται από αυτήν. Παρατηρούμε πως ο μέγιστος μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου (18 sec) συναντάται στις κυψέλες 7 και 9 ενώ με αρκετά μικρή διαφορά ακολουθούν οι κυψέλες 1 και 3. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι κυψέλες αυτές

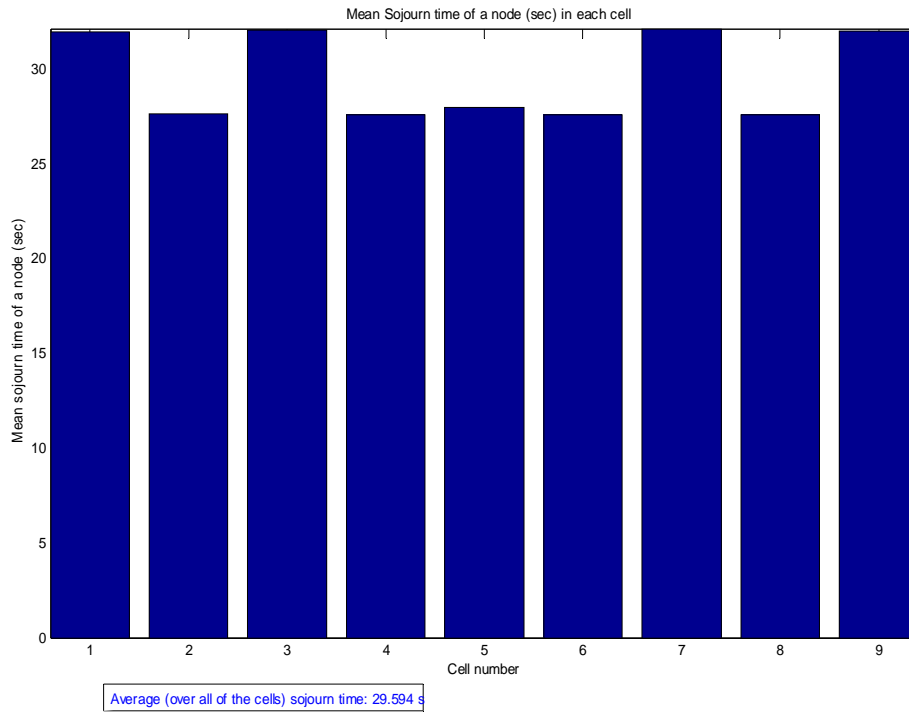
είναι οι τέσσερις «γωνιακές» κυψέλες της περιοχής του συστήματος. Κατά συνέπεια, όταν ένας κόμβος φτάνει σε μια από αυτές τις κυψέλες και μάλιστα το σημείο στάσης του είναι κοντά ή πάνω στο σύνορο της περιοχής, όποια κατεύθυνση κίνησης και αν ακολουθήσει μετά, είναι αναγκασμένος να διασχίσει και πάλι μεγάλο μέρος της κυψέλης, αν όχι ολόκληρη την κυψέλη, για να προχωρήσει στο επόμενο σημείο στάσης, με αποτέλεσμα μεγάλο χρόνο παραμονής στη συγκεκριμένη κυψέλη. Αντίθετα, στις συμμετρικές κυψέλες 2, 4, 6 και 8, οι οποίες είναι και αυτές οριακές κυψέλες σε ένα 3 x 3 σύστημα, το φαινόμενο αυτό δεν είναι τόσο έντονο, αφού ο κόμβος μπορεί να «διαφύγει» από τις κυψέλες αυτές πιο εύκολα σε σχέση με τις προηγούμενες τέσσερις (π.χ με μια κάθετη κίνηση για τις κυψέλες 4 και 6). Επίσης, παρατηρείται μεγαλύτερος μέσος χρόνος παραμονής στην κεντρική κυψέλη (κυψέλη 5), επειδή η κυψέλη αυτή αποτελεί συχνή διαδρομή για πολλούς προορισμούς, αφού πολλοί κόμβοι τη διασχίζουν κατά ένα μεγάλο μέρος της για να φτάσουν στο σημείο στάσης που έχουν επιλέξει και επομένως παραμένουν σε αυτή για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Το φαινόμενο της συχνής διέλευσης πολλών κόμβων από την κεντρική κυψέλη 5 εξηγεί κατά ένα μέρος και τη μορφή του Σχήματος 47, στο οποίο παρουσιάζεται ο ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων για κάθε κυψέλη. Μελετώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, παρατηρούμε ότι ο μέγιστος ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων λαμβάνει χώρα στην κυψέλη 5 ενώ για τις συμμετρικές κυψέλες 2, 4, 6, 8 παρατηρείται ένας μικρότερος ρυθμός. Τέλος, για τις ακρινές κυψέλες 1, 3, 7, 9 παρατηρείται ο μικρότερος ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων, γεγονός που δείχνει πως στις κυψέλες αυτές κυκλοφορούν οι λιγότεροι κόμβοι. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τη χωρική κατανομή των κόμβων του Σχήματος 1, όπου παρατηρείται μια μέγιστη τιμή της πυκνότητας των κόμβων στο κεντρικό τμήμα της περιοχής προσομοίωσης (κυψέλη 5), η οποία μειώνεται καθώς προχωρούμε προς τα όρια της περιοχής. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε πως για κάθε κυψέλη ο μέσος ρυθμός αφίξεων είναι ίσος με τον μέσο ρυθμό αναχωρήσεων για μεγάλο χρόνο προσομοίωσης (μόνιμη κατάσταση), αφού ο αριθμός των κόμβων που εισέρχονται σε μια συγκεκριμένη κυψέλη ισούται με τον αριθμό των κόμβων που εξέρχονται από αυτήν (έτσι ώστε το μέσο πλήθος των κόμβων που αντιστοιχούν σε μια κυψέλη στη μόνιμη κατάσταση να διατηρείται σταθερό). Η σχετική απόκλιση του μέσου ρυθμού αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο που προκύπτει από την προσομοίωση από το θεωρητικό μέσο ρυθμό είναι ίση με 1.850%.

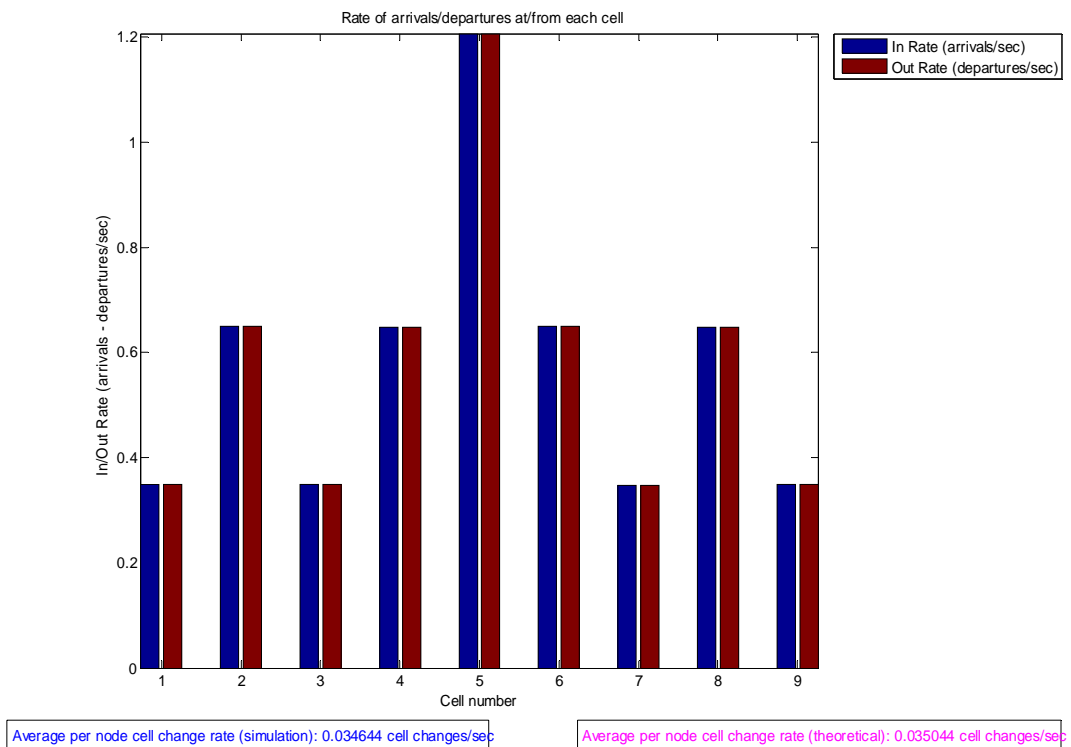
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 48, παρουσιάζεται η κατανομή του χρόνου παραμονής σε κάθε κυψέλη. Όπως αναμενόταν, οι κατανομές των συμμετρικών κυψελών 1, 3, 7, 9 και 2, 4, 6, 8 αντίστοιχα παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες ενώ η κεντρική κυψέλη 5 έχει ξεχωριστή κατανομή. Παρατηρούμε πως για τις κυψέλες 1, 3, 7, 9 η κατανομή του χρόνου παραμονής παρουσιάζει μέγιστο μεταξύ 3 – 6 sec και ακολούθως ακολουθεί μια φθίνουσα μορφή μέχρις ότου μηδενιστεί. Αντίθετα, η κατανομή του χρόνου παραμονής για τις κυψέλες 2, 4, 6, 8 παρουσιάζει μέγιστο στο διάστημα 18 – 21 sec ακολούθως μειώνεται ενώ το ίδιο μέγιστο παρατηρείται και στην κυψέλη 5, με μεγάλη μάλιστα διαφορά στην πιθανότητα ο χρόνος παραμονής να βρίσκεται στο διάστημα αυτό σε σχέση με κάποιο άλλο διάστημα.

12^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_cellular*Πίνακας 12: Παράμετροι 12^{ης} προσομοίωσης*

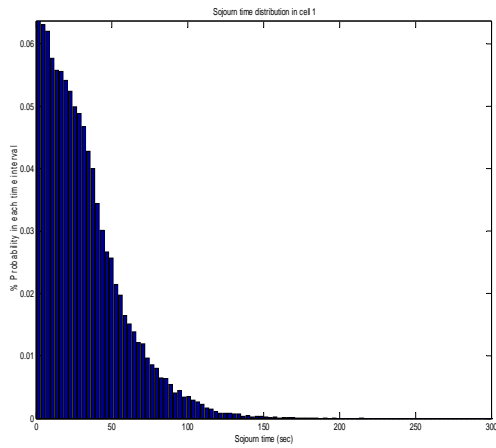
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 35] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	150
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s
Ακρίβεια χωρικού πλέγματος [numOfPixelsX, numOfPixelsY]	[15, 15] pixels
Πλήθος Κυψελών (numOfCellsX x numOfCellsY)	3x3 = 9 κυψέλες



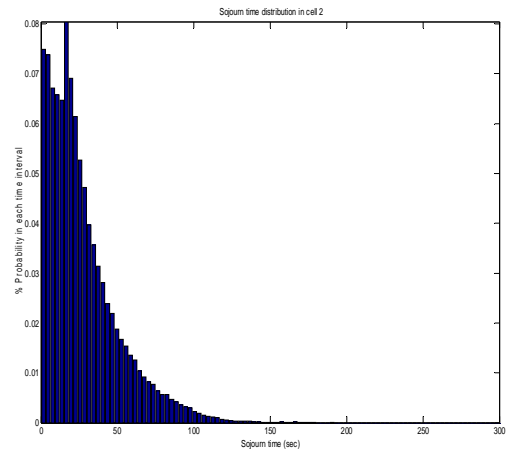
Σχήμα 49: Μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη



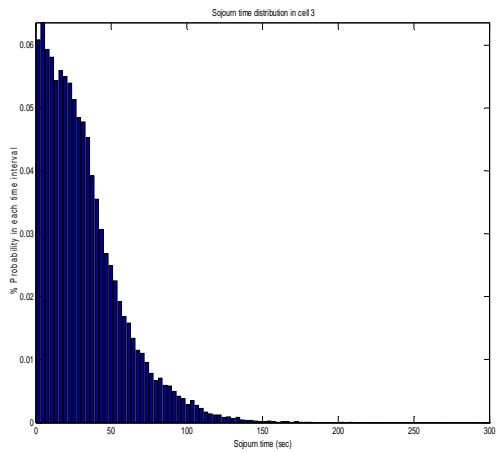
Σχήμα 50: Ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων σε/από κάθε κυψέλη



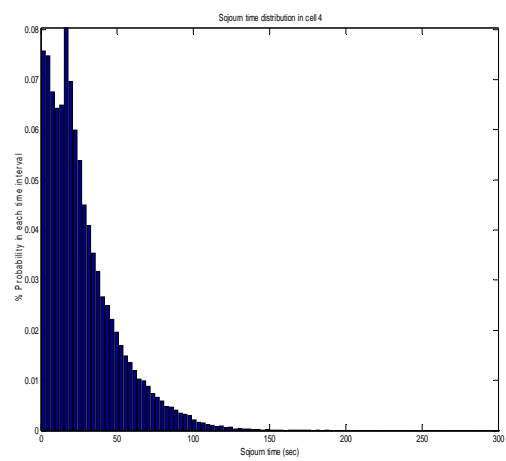
(i)



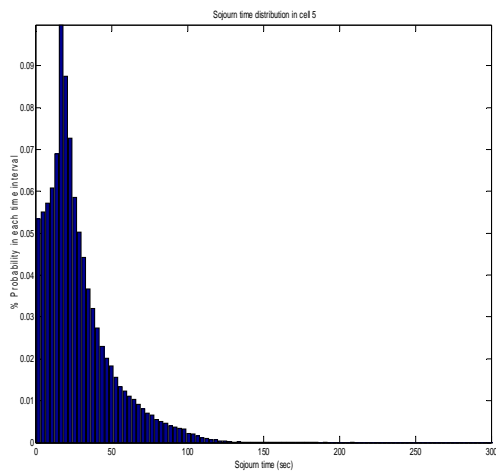
(ii)



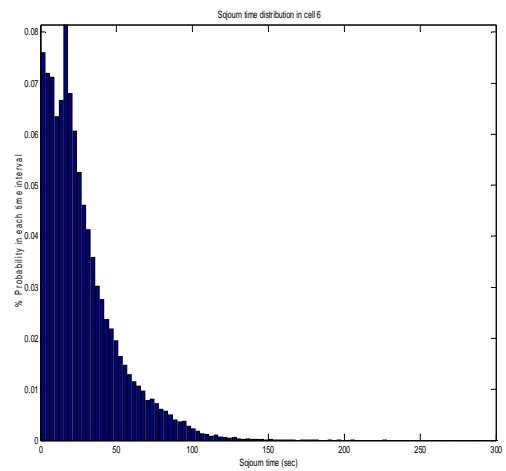
(iii)



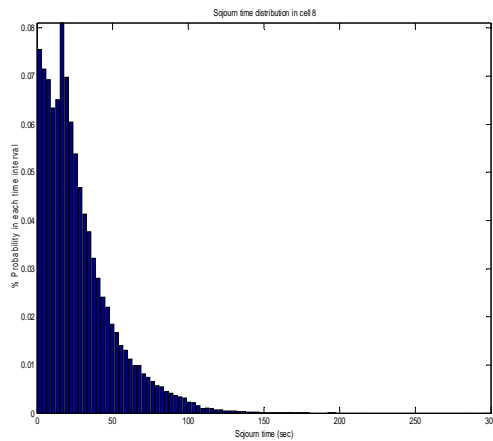
(iv)



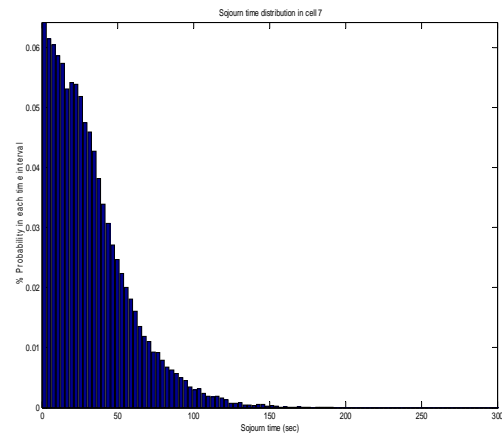
(v)



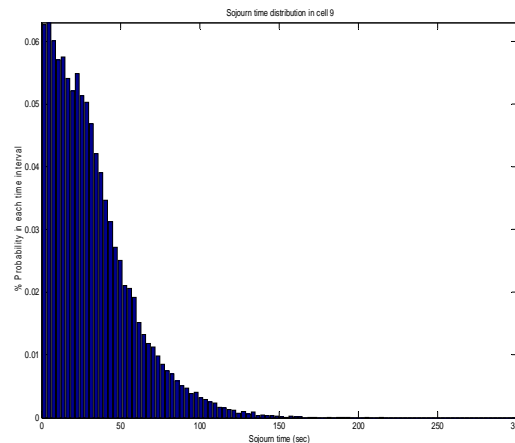
(vi)



(vii)



(viii)



(ix)

Σχήμα 51: Κατανομή χρόνου παραμονής για τις 16 περιμετρικές κυψέλες

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στη 12^η προσομοίωση μεταβάλλουμε, σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση, τον αριθμό των κόμβων από 50 σε 150 καθώς και το διάστημα τιμών της ταχύτητας των κόμβων από [15, 45]m/s σε ένα πιο ρεαλιστικό διάστημα τιμών [5,35]m/s.

Στο Σχήμα 49, όπου απεικονίζεται ο μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη, παρατηρούμε πως σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση, έχουμε μια αύξηση των μέσων χρόνων παραμονής σε κάθε κυψέλη, όπως άλλωστε φαίνεται και από το μέσο όρο του μέσου χρόνου παραμονής για όλες τις κυψέλες που είναι κατά 12.7596s μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της προηγούμενης προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει λόγω των μικρότερων τιμών ταχύτητας που μπορεί να λάβει ένας κόμβος της προσομοίωσης αυτής σε σχέση με την 11^η προσομοίωση. Επομένως, θα χρειάζεται μεγαλύτερο χρόνο για να διασχίσει μια κυψέλη, από ότι θα χρειαζόταν προηγουμένως. Ωστόσο, παρατηρείται και στην προσομοίωση αυτή μεγαλύτερος χρόνος παραμονής στις

τέσσερις ακρινές κυψέλες 1, 3, 7 και 9 (με μέγιστο χρόνο γύρω στα 33 sec στις κυψέλες 3 και 7), καθώς και λίγο μεγαλύτερος χρόνος παραμονής στην κεντρική κυψέλη 5 από τις κυψέλες 2, 4, 6 και 8, που χαρακτηρίζονται από το μικρότερο χρόνο παραμονής, για τους ίδιους λόγους που εξηγήθηκαν στην 11^η προσομοίωση.

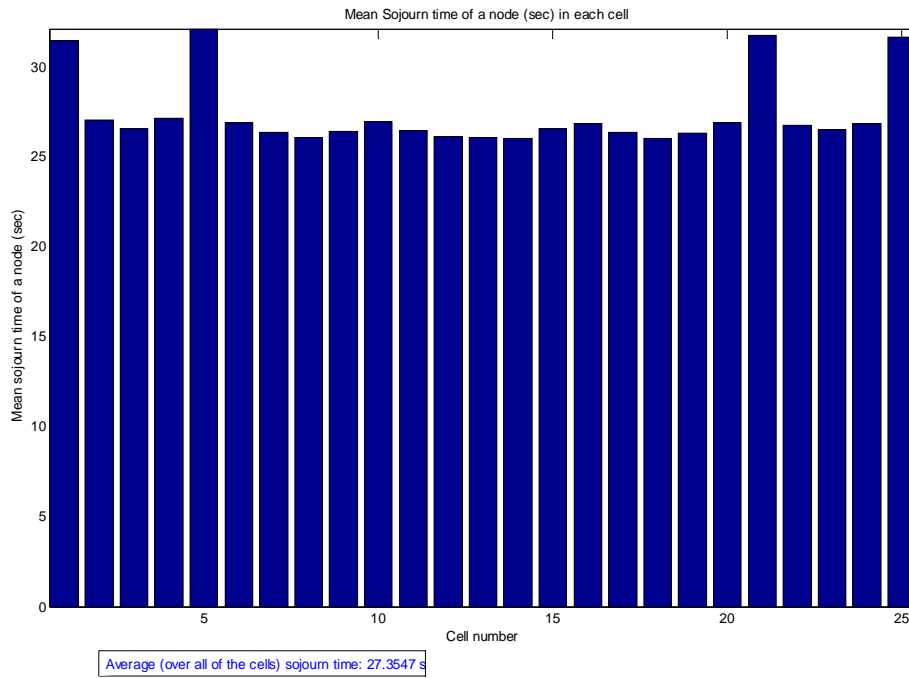
Στο Σχήμα 50, όπου παρουσιάζεται ο ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων για κάθε κυψέλη, διαπιστώνουμε μια αύξηση των ρυθμών αφίξεων/αναχωρήσεων για κάθε κυψέλη σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση (π.χ. για την κυψέλη 5 ο μέγιστος ρυθμός αφίξεων είναι περίπου 1.2 αφίξεις/sec έναντι περίπου 0.7 αφίξεις/sec της προηγούμενης προσομοίωσης). Αυτό οφείλεται στην αύξηση του πλήθους των κόμβων. Ωστόσο, ο μέσος ρυθμός αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο της 11^{ης} προσομοίωσης, επειδή η αντίστοιχη μέση ταχύτητα των κόμβων έχει μειωθεί (από 30 m/s προηγουμένως μειώθηκε στα 20 m/s στην προσομοίωση αυτή). Κατά συνέπεια, οι κόμβοι θα αλλάζουν κυψέλη πιο σπάνια από ότι πριν, διότι απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος για να διασχίσουν μια κυψέλη. Η σχετική απόκλιση του μέσου ρυθμού αλλαγών κυψέλης που προκύπτει από την προσομοίωση συγκριτικά με το θεωρητικό μέσο ρυθμό είναι ίση με 1.141% και είναι μικρότερη από την αντίστοιχη απόκλιση της 11^{ης} προσομοίωσης.

Τέλος, παρατηρούμε την κατανομή του χρόνου παραμονής σε κάθε κυψέλη στο Σχήμα 51. Όπως αναμενόταν, οι κατανομές των συμμετρικών κυψελών 1, 3, 7, 9 και 2, 4, 6, 8 αντίστοιχα παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες ενώ η κεντρική κυψέλη 5 έχει ξεχωριστή κατανομή.

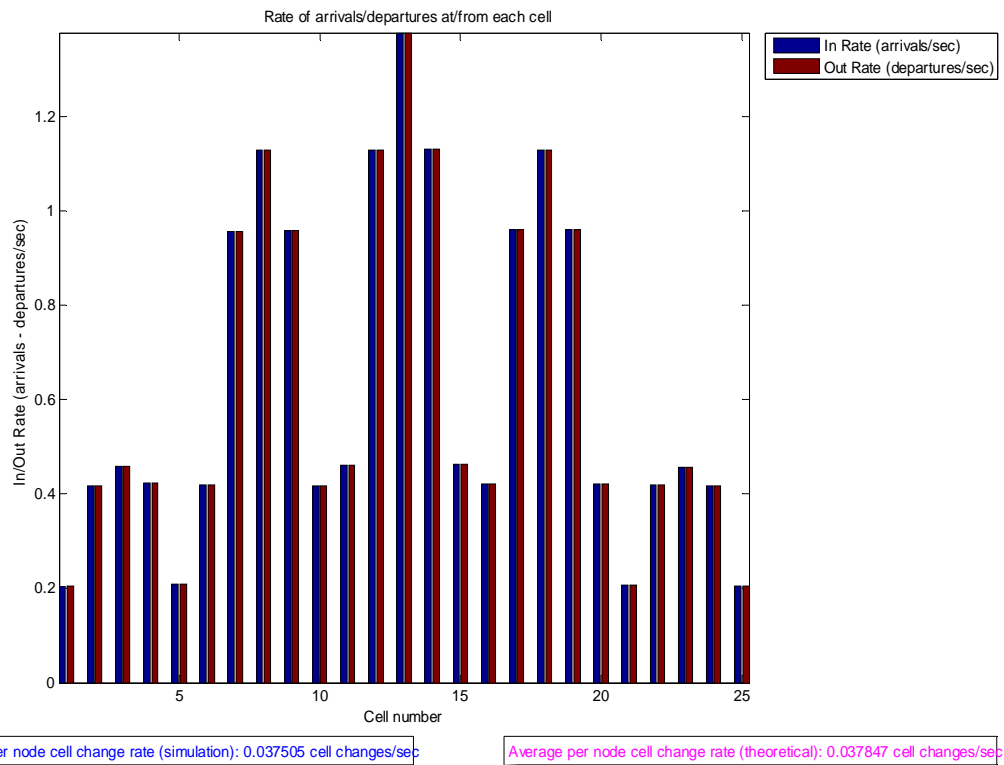
13^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_cellular

Πίνακας 13: Παράμετροι 13^{ης} προσομοίωσης

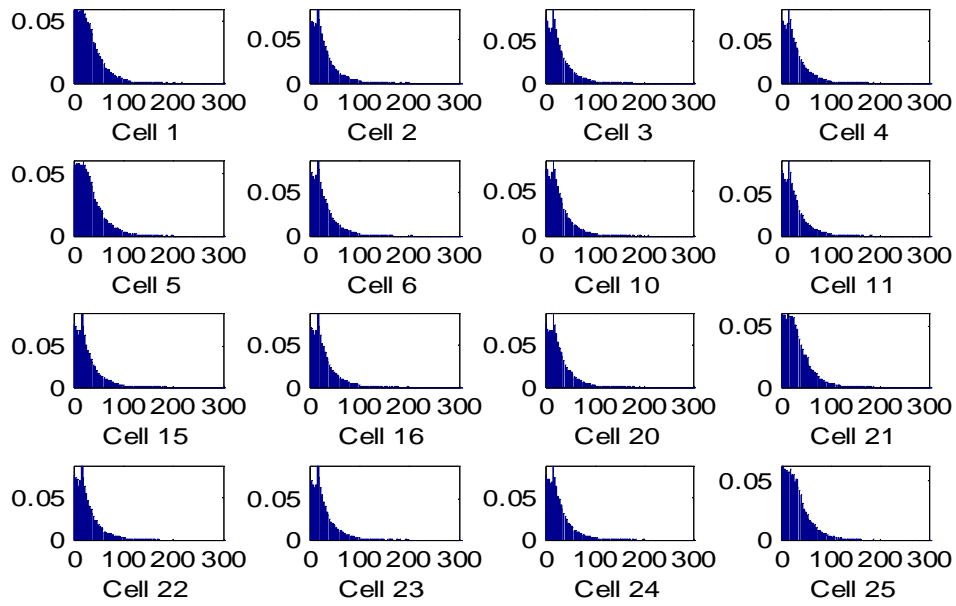
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 2500] x [0, 2500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 35] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	420
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s
Πλήθος Κυψελών (numOfCellsX x numOfCellsY)	5x5 = 25 κυψέλες



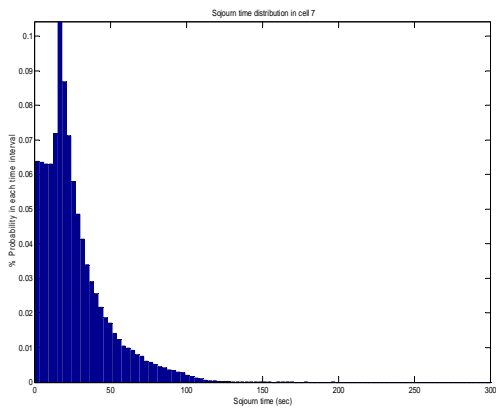
Σχήμα 52: Μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη



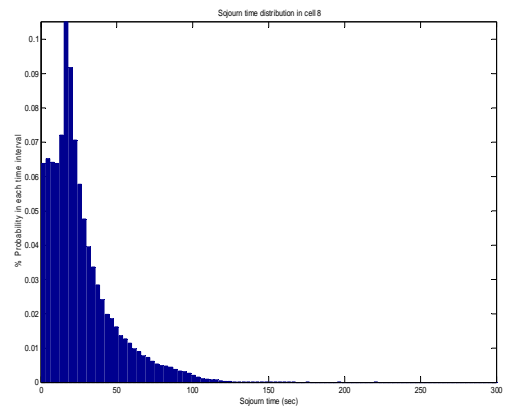
Σχήμα 53: Ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων σε/από κάθε κυψέλη



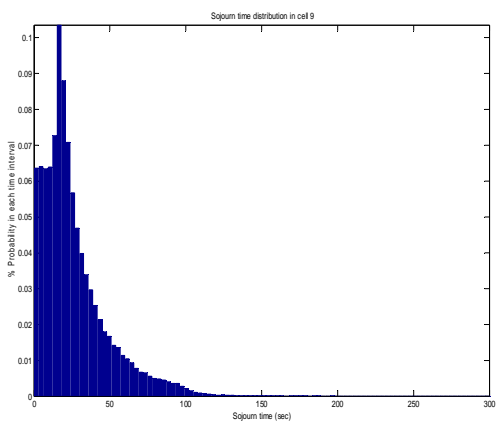
Σχήμα 54: Κατανομή χρόνου παραμονής για τις 16 περιμετρικές κυψέλες



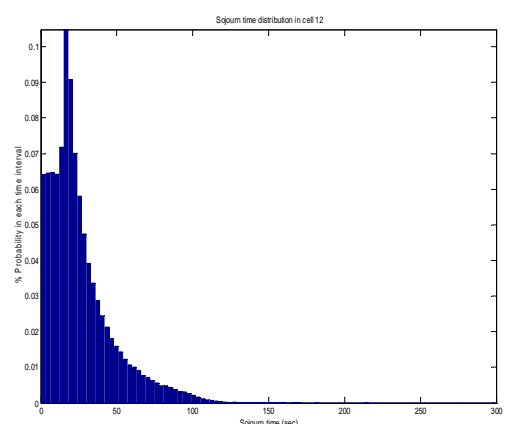
(i)



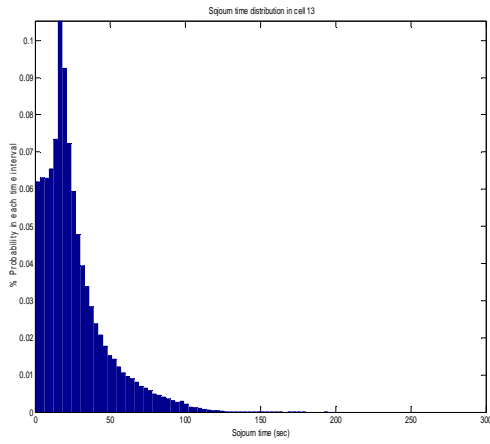
(ii)



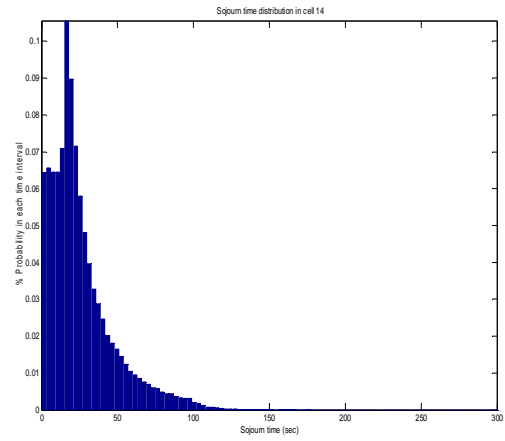
(iii)



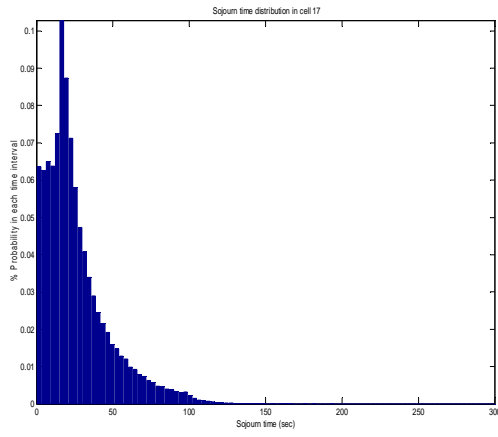
(iv)



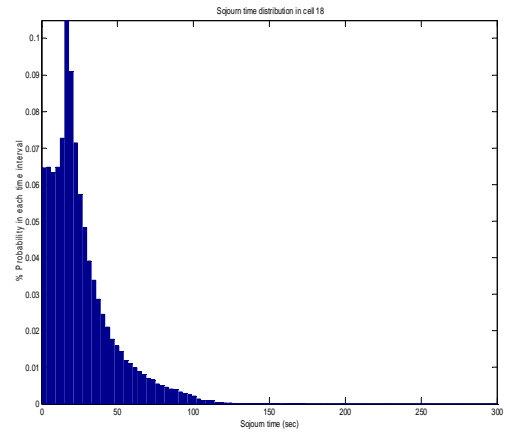
(v)



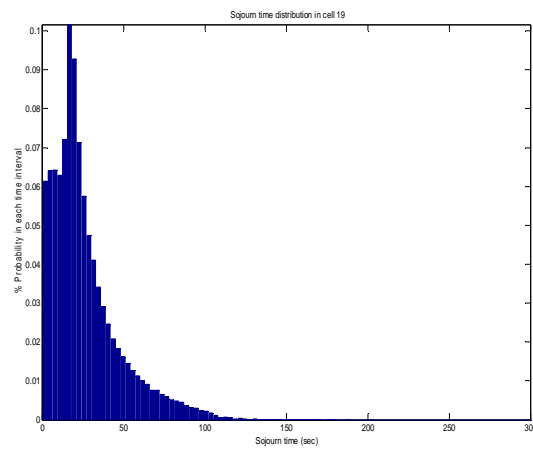
(vi)



(vii)



(viii)



(ix)

Σχήμα 55: Κατανομή χρόνου παραμονής στις 9 εσωτερικές κυψέλες

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στη 13^η προσομοίωση, αυξάνουμε το μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης σε $[0, 2500] \times [0, 2500] \text{ m}^2$ και τον αριθμό των κόμβων από 150 σε 420, ώστε να έχουμε τον ίδιο αριθμό κόμβων ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση. Επίσης, αυξάνουμε τον αριθμό των κυψελών και πάλι ανάλογα με την αύξηση του μεγέθους της περιοχής προσομοίωσης, ώστε το μέγεθος των κυψελών να παραμείνει σταθερό (από 9 κυψέλες σε 25 κυψέλες). Ενδιαφερόμαστε κυρίως για τα μεγέθη που αφορούν τις 9 κεντρικές κυψέλες, έτσι ώστε να μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με την προηγούμενη προσομοίωση, με το πλεονέκτημα της μικρότερης επίδρασης των φαινομένων συνόρου.

Στο Σχήμα 52, απεικονίζεται ο μέσος χρόνος παραμονής σε κάθε κυψέλη. Παρατηρούμε πως και πάλι οι μεγαλύτεροι μέσοι χρόνοι παραμονής συναντώνται στις ακρινές κυψέλες 1, 5, 21 και 25 του κυψελωτού συστήματος 5×5 , με τον μέγιστο μέσο χρόνο παραμονής (περίπου 33 sec όπως στην προηγούμενη προσομοίωση) να παρατηρείται στην κυψέλη 5. Ο μικρότερος μέσος χρόνος παραμονής συναντάται στις κεντρικές κυψέλες του συστήματος 12, 13 και 14, καθώς και στις κυψέλες 8 και 18. Στις συμμετρικές κυψέλες 2, 4, 6, 10, 16, 20, 22 και 24 ο μέσος χρόνος παραμονής είναι ο ίδιος, ενώ ίσο αλλά μικρότερο μέσο χρόνο παραμονής έχουν επίσης και οι συμμετρικές κυψέλες 3, 11, 15 και 23. Τέλος, λίγο πιο μικρό μέσο χρόνο παραμονής από τις προηγούμενες κυψέλες έχουν οι κυψέλες 7, 9, 17 και 19 που είναι οι εσωτερικές κυψέλες του συστήματος προσομοίωσης. Η κατανομή αυτή των μέσων χρόνων παραμονής εξηγείται με τον ίδιο τρόπο που εξηγείται η κατανομή για ένα σύστημα 3×3 κυψελών. Ο μέσος όρος του μέσου χρόνου παραμονής για όλες τις κυψέλες είναι κατά 2.2393 sec μικρότερος από την προηγούμενη προσομοίωση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι λόγω της προσομοίωσης του συστήματος 5×5 κυψελών, οι κυψέλες που δεν επηρεάζονται πλέον από την ανάκλαση των κόμβων στα όρια της περιοχής είναι περισσότερες (συγκεκριμένα οι 9 εσωτερικές κυψέλες) σε αντίθεση με την περίπτωση του συστήματος 3×3 όπου μόνο η κεντρική κυψέλη μένει ανεπηρέαστη. Κατά συνέπεια, αφού ποσοστιαία η επίδραση του συνόρου είναι μικρότερη στο σύστημα 5×5 από ότι στο σύστημα 3×3 , σημαίνει πως και ο μέσος χρόνος παραμονής για όλες τις κυψέλες θα είναι μικρότερος στην προσομοίωση αυτή σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση.

Στο Σχήμα 53, μπορούμε να δούμε το ρυθμό αφίξεων/αναχωρήσεων για κάθε κυψέλη. Οι κυψέλες χωρίζονται με βάση το ρυθμό αυτό σε 6 ομάδες ξεκινώντας από τον υψηλότερο (περίπου 1.3 αφίξεις-αναχωρήσεις/sec) και καταλήγοντας στο χαμηλότερο (0.2 αφίξεις-αναχωρήσεις/sec): (α) η κεντρική κυψέλη 13, (β) οι κυψέλες 8, 12, 14, 18, (γ) οι κυψέλες 7, 9, 17 και 19, (δ) οι κυψέλες 3, 11, 15, 23, (ε) οι κυψέλες 2, 4, 6, 10, 16, 20, 22 και 24 και (στ) οι κυψέλες 1, 5, 21, 25. Η κατανομή αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με τη χωρική κατανομή των κόμβων στο μοντέλο Τυχαίων Στάσεων, όπου η πιθανότητα ένας κόμβος να βρίσκεται σε κάποιο σημείο της περιοχής προσομοίωσης μειώνεται καθώς προχωρούμε από το κέντρο της περιοχής προς το σύνορο της περιοχής.

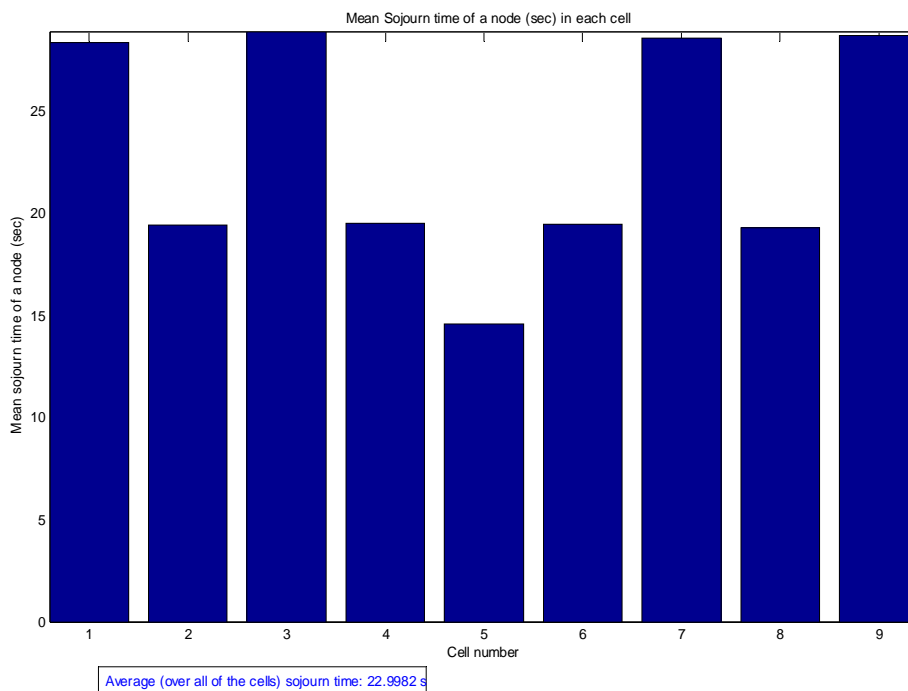
Εξετάζοντας στη συνέχεια το Σχήμα 54, στο οποίο παρουσιάζονται οι κατανομές του χρόνου παραμονής για τις 16 περιμετρικές κυψέλες, παρατηρούμε όμοιες κατανομές για τις ομάδες (δ), (ε) και (στ) αντίστοιχα.

Τέλος, στο Σχήμα 55, όπου απεικονίζονται οι κατανομές των υπόλοιπων 9 εσωτερικών κατανομών, για σκοπούς σύγκρισης με την δωδέκατη προσομοίωση, παρατηρούμε παρόμοιες κατανομές για τις ομάδες (α), (β) και (γ).

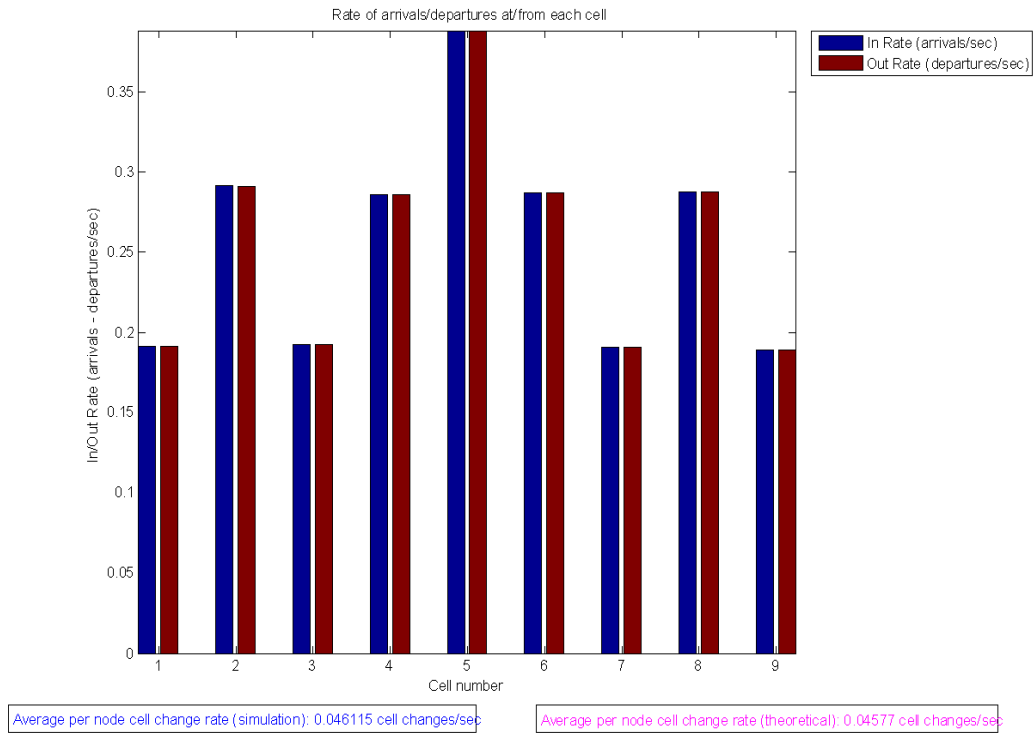
14^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_cellular

Πίνακας 14: Παράμετροι 14^{ης} προσομοίωσης

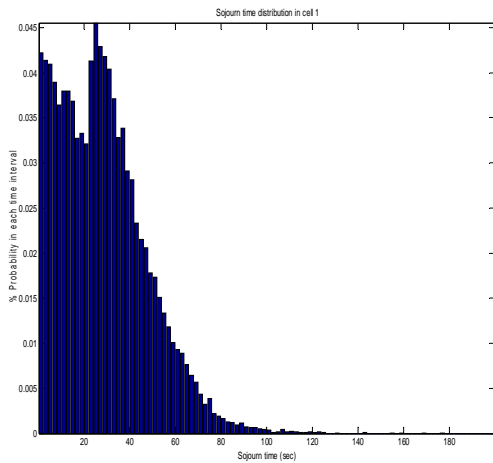
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[15, 45] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	50
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s
Πλήθος Κυψελών (numOfCellsX x numOfCellsY)	3x3 = 9 κυψέλες



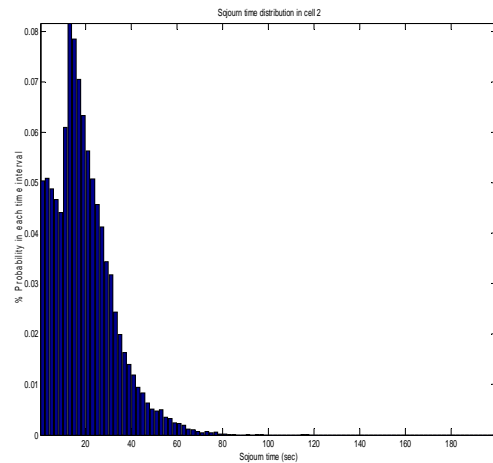
Σχήμα 56: Μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη



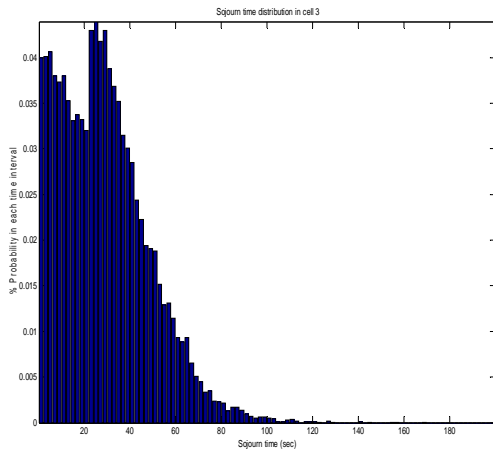
Σχήμα 57: Ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων σε/από κάθε κυψέλη



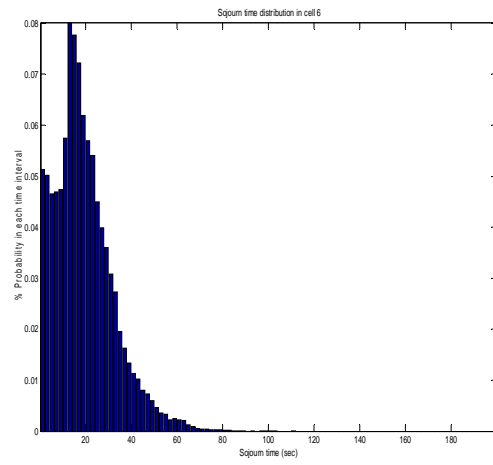
(i)



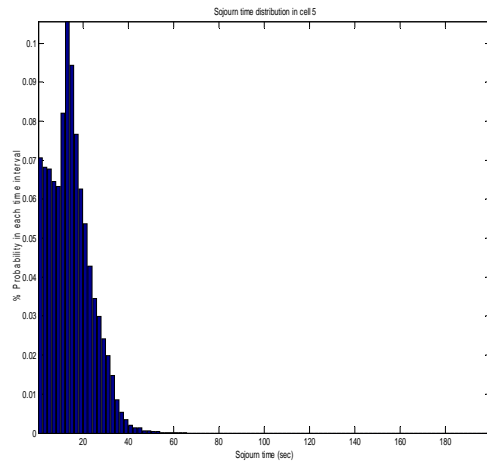
(ii)



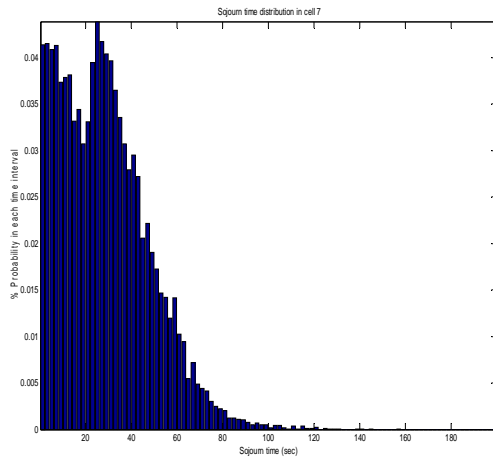
(iii)



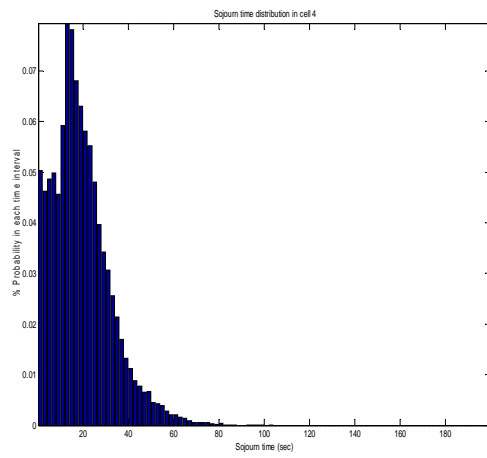
(vi)



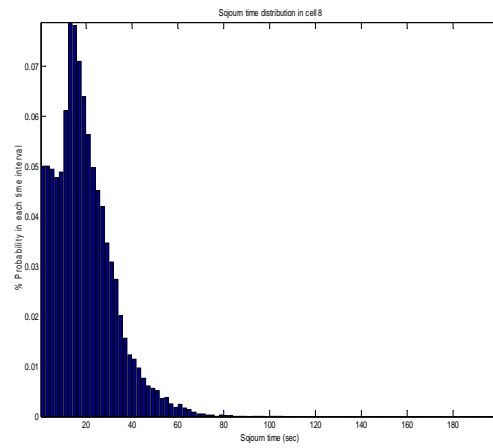
(v)



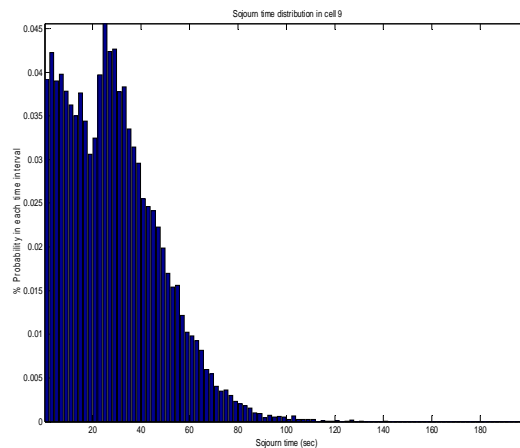
(vii)



(iv)



(viii)



(ix)

Σχήμα 58: Κατανομή χρόνου παραμονής σε κάθε κυψέλη

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στη 14^η προσομοίωση, εξετάζουμε και πάλι τη συμπεριφορά της κίνησης των κόμβων σε ένα τετράγωνο κυψελωτό σύστημα 3 x 3 κυψελών, με τη διαφορά ότι οι κόμβοι εδώ κινούνται σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης. Οι τιμές των παραμέτρων της προσομοίωσης ήταν οι ίδιες με τις αντίστοιχες της 11^{ης} προσομοίωσης για το μοντέλο RWP.

Στο Σχήμα 56, παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος παραμονής σε δευτερόλεπτα ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη. Όπως και στην 11^η προσομοίωση, ο μέγιστος χρόνος παραμονής συναντάται στην κυψέλη 3 ενώ με μικρή διαφορά ακολουθούν οι κυψέλες 1, 7 και 9. Επίσης, οι κυψέλες 2, 4, 6 και 8 έχουν ίδιο μέσο χρόνο παραμονής λόγω συμμετρίας αλλά μικρότερο σε σχέση με τις προηγούμενες κυψέλες, για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε και στην 11^η προσομοίωση. Ωστόσο, στην προσομοίωση αυτή ο μέσος χρόνος παραμονής σε μια κυψέλη για όλους τους κόμβους, είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της 11^{ης} προσομοίωσης κατά 6.1638 δευτερόλεπτα. Επιπρόσθετα, οι μέσοι χρόνοι παραμονής για κάθε κυψέλη είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Η εξήγηση για τα πιο πάνω είναι πως στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, λόγω του ότι αρκετά συχνά οι κόμβοι επιλέγουν ένα τέτοιο μήκος μετάβασης που υπερβαίνει τα όρια της περιοχής προσομοίωσης, αναγκάζονται να ανακλαστούν στο σύνορο της περιοχής, με αποτέλεσμα να διανύουν αρκετά μεγαλύτερη απόσταση στις ακρινές αυτές κυψέλες σε σχέση με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στις κυψέλες. Στην κεντρική τώρα κυψέλη 5, ο μέσος χρόνος παραμονής είναι μικρότερος τόσο από τις άλλες κυψέλες για την προσομοίωση αυτή όσο και από τον αντίστοιχο μέσο χρόνο παραμονής για την 11^η προσομοίωση. Διαισθητικά, το αποτέλεσμα αυτό είναι σωστό αφού καταρχάς η κεντρική κυψέλη δεν περιβάλλεται από κάποιο σύνορο στο οποίο ανακλούνται οι κόμβοι και επομένως οι κόμβοι απλά τη διασχίζουν καθώς προχωρούν προς τον προορισμό τους, με αποτέλεσμα να μην παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε αυτήν. Κατά δεύτερο λόγο, επειδή η

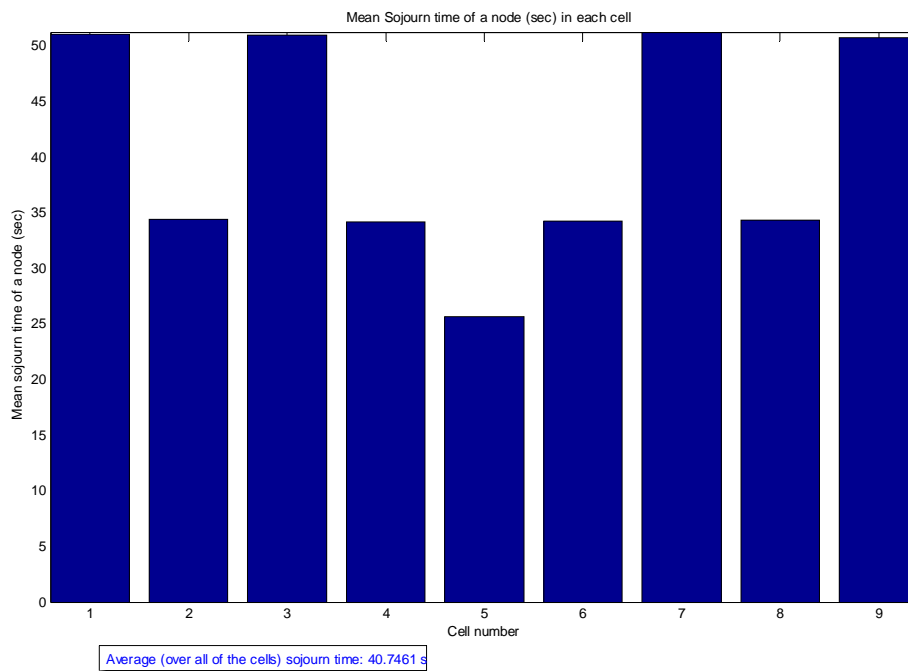
χωρική κατανομή των κόμβων στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης είναι σχεδόν ομοιόμορφη, σε αντίθεση με τη χωρική κατανομή των κόμβων στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, η πιθανότητα να βρεθεί ένας κόμβος στο κεντρικό τμήμα της περιοχής προσομοίωσης θα είναι περίπου ίση με την πιθανότητα ο κόμβος να βρίσκεται σε οποιαδήποτε άλλη θέση στην περιοχή. Κατά συνέπεια, η κεντρική κυψέλη θα χαρακτηρίζεται από μικρότερο μέσο χρόνο παραμονής από την αντίστοιχη κεντρική κυψέλη της 11^{ης} προσομοίωσης.

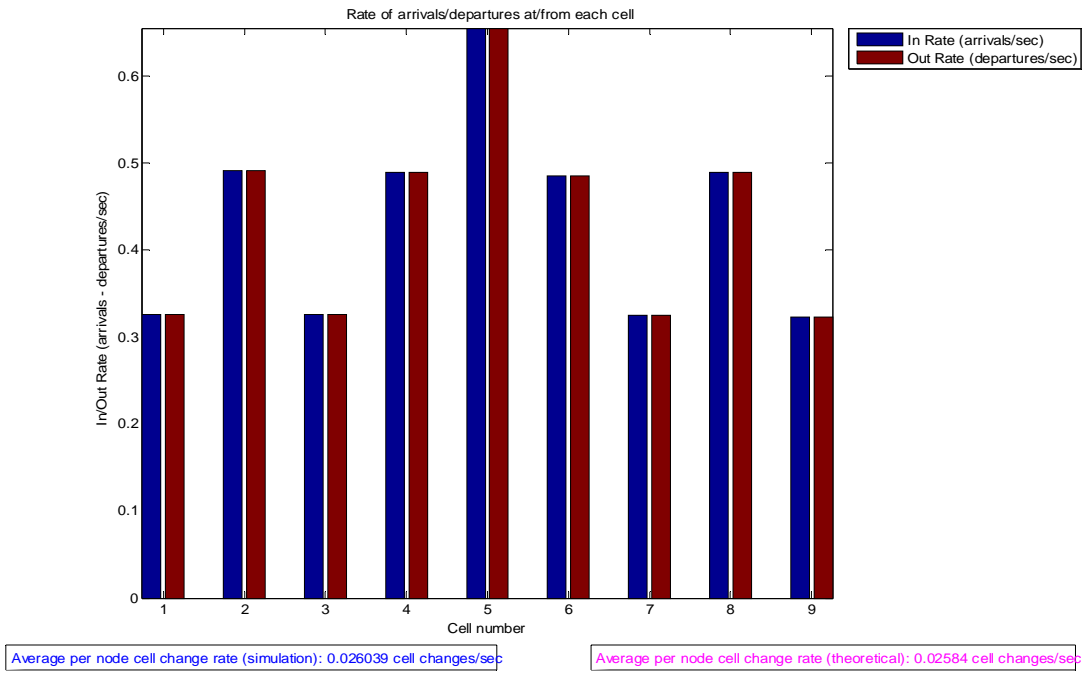
Μελετώντας στη συνέχεια στο Σχήμα 57 το ρυθμό αφίξεων και αναχωρήσεων σε/από κάθε κυψέλη, παρατηρούμε πως και στην περίπτωση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης η κεντρική κυψέλη 5 είναι η κυψέλη στην οποία κυκλοφορούν οι περισσότεροι κόμβοι. Ο ρυθμός εισόδου/εξόδου προς/από μια κυψέλη, εξαρτάται από το πλήθος των πλευρών της κυψέλης από τις οποίες μπορούν να εισέλθουν και να εξέλθουν οι κόμβοι. Για το λόγο αυτό ο μικρότερος ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων συναντάται στις ακρινές κυψέλες 1, 3, 7 και 9 (2 πλευρές) ενώ στις κυψέλες 2, 4, 6 και 8 είναι λίγο μεγαλύτερος (3 πλευρές). Η κεντρική κυψέλη έχει 4 πλευρές από τις οποίες μπορούν να διέρχονται κόμβοι και συνεπώς έχει το μεγαλύτερο ρυθμό εισόδου/εξόδου. Αξιοπρόσεκτο όμως είναι το γεγονός πως οι μέσοι ρυθμοί αφίξεων/αναχωρήσεων, όσο προχωρούμε προς την κεντρική περιοχή, τόσο μικρότεροι είναι σε σχέση με τους αντίστοιχους της έβδομης προσομοίωσης. Για παράδειγμα, ο μέγιστος ρυθμός αφίξεων στην κεντρική κυψέλη της όγδοης προσομοίωσης είναι 0.38 αφίξεις/sec σε αντίθεση με το 0.71 αφίξεις/sec για την προσομοίωση με το Μοντέλο Τυχαίων Στάσεων. Αυτό οφείλεται στη σχεδόν ομοιόμορφη χωρική κατανομή των κόμβων του Μοντέλου Τυχαίας Κατεύθυνσης, η οποία κατανέμει πιο δίκαια τους κόμβους ανάμεσα στις κυψέλες σε σχέση με το Μοντέλο Τυχαίων Στάσεων. Η σχετική απόκλιση του μέσου ρυθμού αλλαγών κυψέλης που προκύπτει από την προσομοίωση από το θεωρητικό μέσο ρυθμό είναι ίση με 0.754%.

Τέλος, εξετάζοντας το Σχήμα 58, όπου απεικονίζεται η κατανομή του χρόνου παραμονής σε κάθε κυψέλη, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως οι κατανομές για τις συμμετρικές ακρινές κυψέλες 1, 3, 7 και 9 έχουν πολύ μεγάλες ομοιότητες ενώ το ίδιο συμβαίνει και για τις συμμετρικές κυψέλες 2, 4, 6 και 8. Οι μεν πρώτες έχουν ως πιθανότερο διάστημα χρόνου παραμονής το διάστημα 26 - 28 sec οι δε δεύτερες, καθώς και η κεντρική κυψέλη 5, το διάστημα 12 - 14 sec.

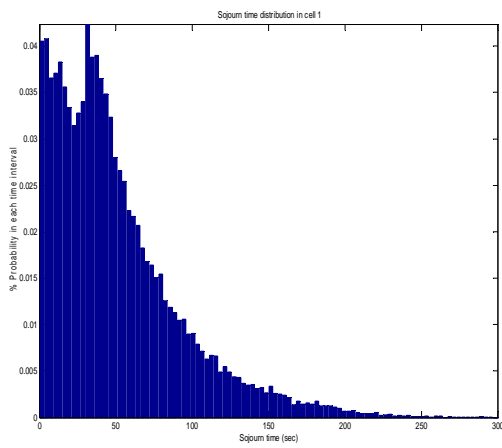
15^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_cellular*Πίνακας 15: Παράμετροι 15^{ης} προσομοίωσης*

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 35] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	150
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s
Πλήθος Κυψελών (numOfCellsX x numOfCellsY)	3x3 = 9 κυψέλες

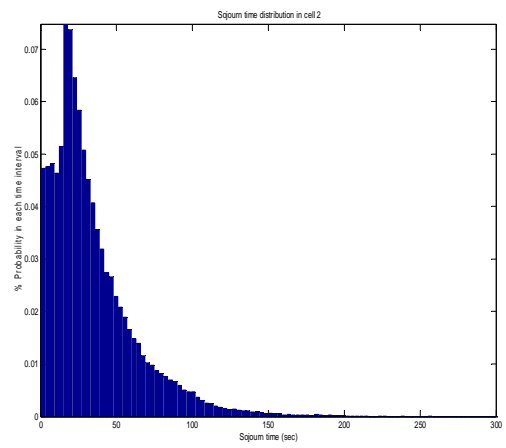
*Σχήμα 59: Μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη*



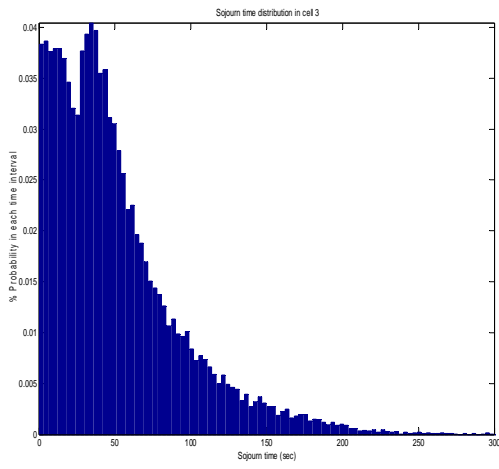
Σχήμα 60: Ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων σε/από κάθε κυψέλη



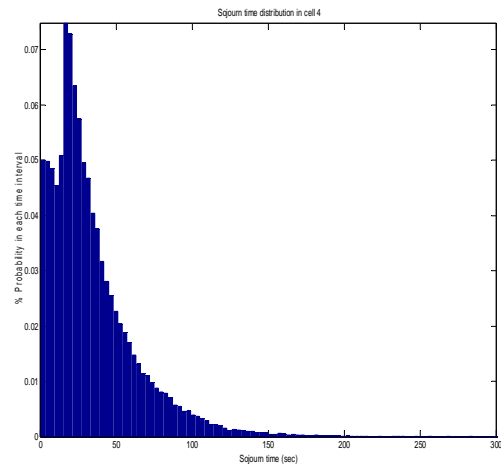
(i)



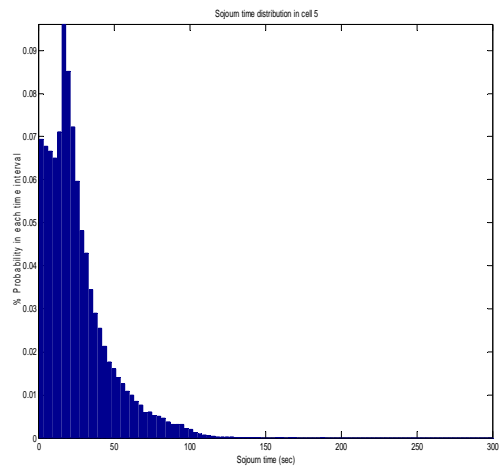
(ii)



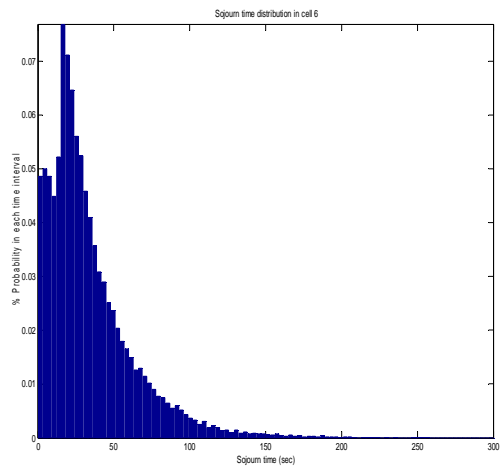
(iii)



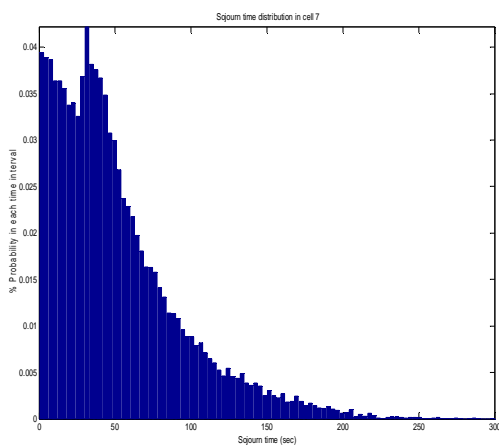
(iv)



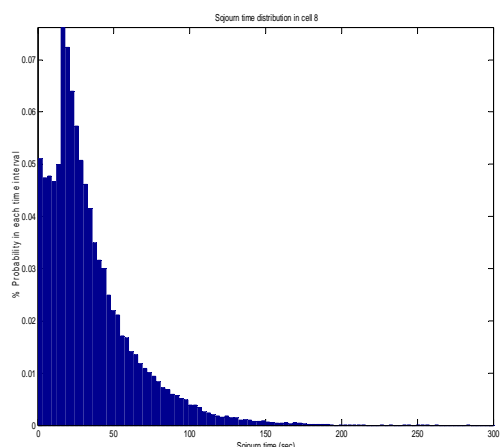
(v)



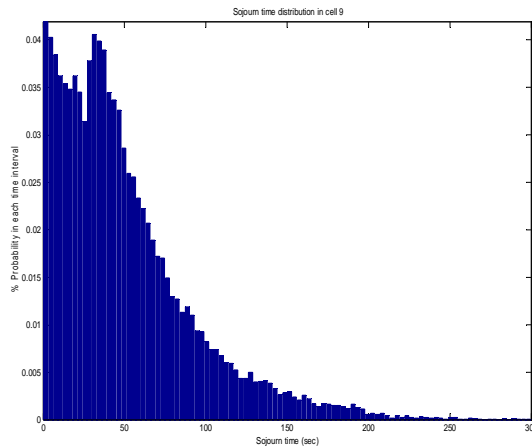
(vi)



(vii)



(viii)



(ix)

Σχήμα 61: Κατανομή χρόνου παραμονής σε κάθε κυψέλη

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στη 15^η προσομοίωση μεταβάλλουμε, σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση, τον αριθμό των κόμβων από 50 σε 150 καθώς και το διάστημα τιμών της ταχύτητας των κόμβων από [15, 45] m/s σε [5,35] m/s.

Στο Σχήμα 59, όπου παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη, παρατηρούμε πως σε σύγκριση με την προηγούμενη προσομοίωση, έχουμε μια αύξηση των μέσων χρόνων παραμονής σε κάθε κυψέλη, όπως άλλωστε φαίνεται και από το μέσο όρο του μέσου χρόνου παραμονής για όλες τις κυψέλες που είναι κατά 11.1521 sec μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της προηγούμενης προσομοίωσης. Αυτό οφείλεται, όπως και στην περίπτωση του μοντέλου Τυχαίων Στάσεων, στη μείωση της μέσης ταχύτητας των κόμβων σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση λόγω της μεταβολής του διαστήματος τιμών της ταχύτητας σε [5,35] m/s. Επομένως, οι κόμβοι θα χρειάζονται μεγαλύτερο μέσο χρόνο για να διασχίσουν μια κυψέλη, από αυτόν που θα χρειάζονταν στη 14^η προσομοίωση. Εντούτοις, παρατηρείται και στην προσομοίωση αυτή μεγαλύτερος χρόνος παραμονής στις τέσσερις ακρινές κυψέλες 1, 3, 7 και 9 (με μέγιστο χρόνο γύρω στα 50 sec στην κυψέλη 7), ενώ και στην κεντρική κυψέλη 5 ο μέσος χρόνος παραμονής είναι μεγαλύτερος από τις κυψέλες 2, 4, 6 και 8, που χαρακτηρίζονται από το μικρότερο χρόνο παραμονής, για τους ίδιους λόγους που εξηγήθηκαν στην 14^η προσομοίωση.

Στο Σχήμα 60, όπου απεικονίζεται ο ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων για κάθε κυψέλη, διαπιστώνουμε μια αύξηση των ρυθμών αφίξεων/αναχωρήσεων για κάθε κυψέλη σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση (π.χ για την κυψέλη 5 ο μέγιστος ρυθμός αφίξεων είναι περίπου 0.65 αφίξεις/sec έναντι περίπου 0.40 αφίξεις/sec της προηγούμενης προσομοίωσης). Αυτό οφείλεται στην αύξηση του πλήθους των κόμβων. Ωστόσο, ο μέσος ρυθμός αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο ρυθμό της 14^{ης} προσομοίωσης, επειδή οι αντίστοιχη μέση ταχύτητα των κόμβων έχει μειωθεί (από 30 m/s προηγουμένως μειώθηκε στα 20 m/s στην προσομοίωση αυτή). Επειδή λοιπόν οι κόμβοι θα κινούνται πιο αργά από ότι στην

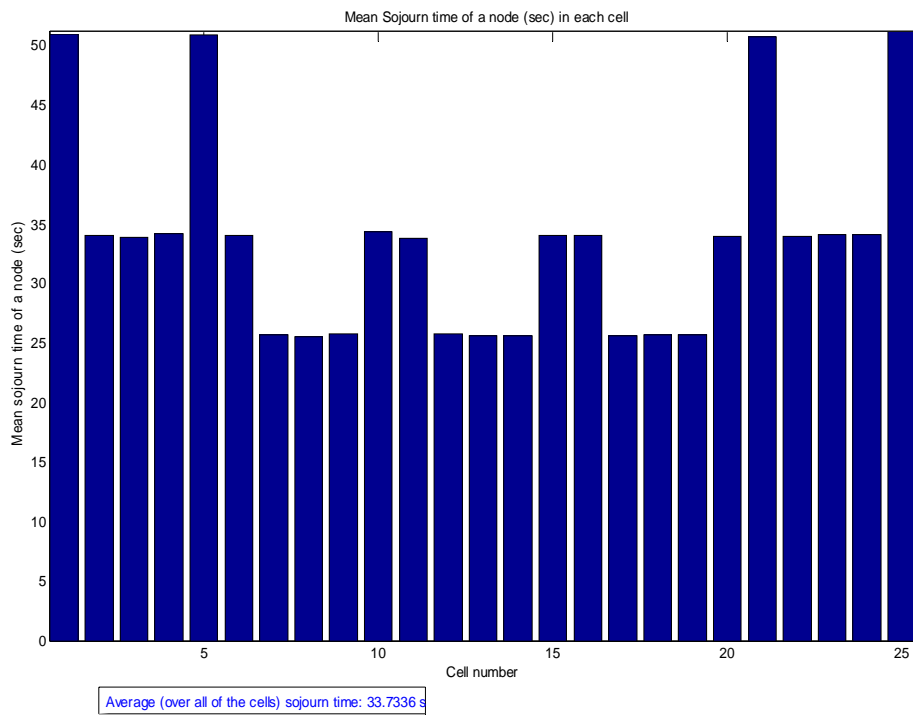
προηγούμενη προσομοίωση, αλλάζουν κυψέλη με χαμηλότερο ρυθμό, διότι ταξιδεύουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέχρις ότου αλλάξουν κυψέλη. Η σχετική απόκλιση του μέσου ρυθμού αλλαγών κυψέλης που προκύπτει από την προσομοίωση συγκριτικά με το θεωρητικό μέσο ρυθμό είναι ίση με 0.770%.

Τέλος, εξετάζουμε την κατανομή του χρόνου παραμονής σε κάθε κυψέλη στο Σχήμα 61. Παρατηρούμε πως οι κατανομές των συμμετρικών κυψελών 1, 3, 7, 9 και 2, 4, 6, 8 αντίστοιχα παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες ενώ η κεντρική κυψέλη 5 έχει ξεχωριστή κατανομή.

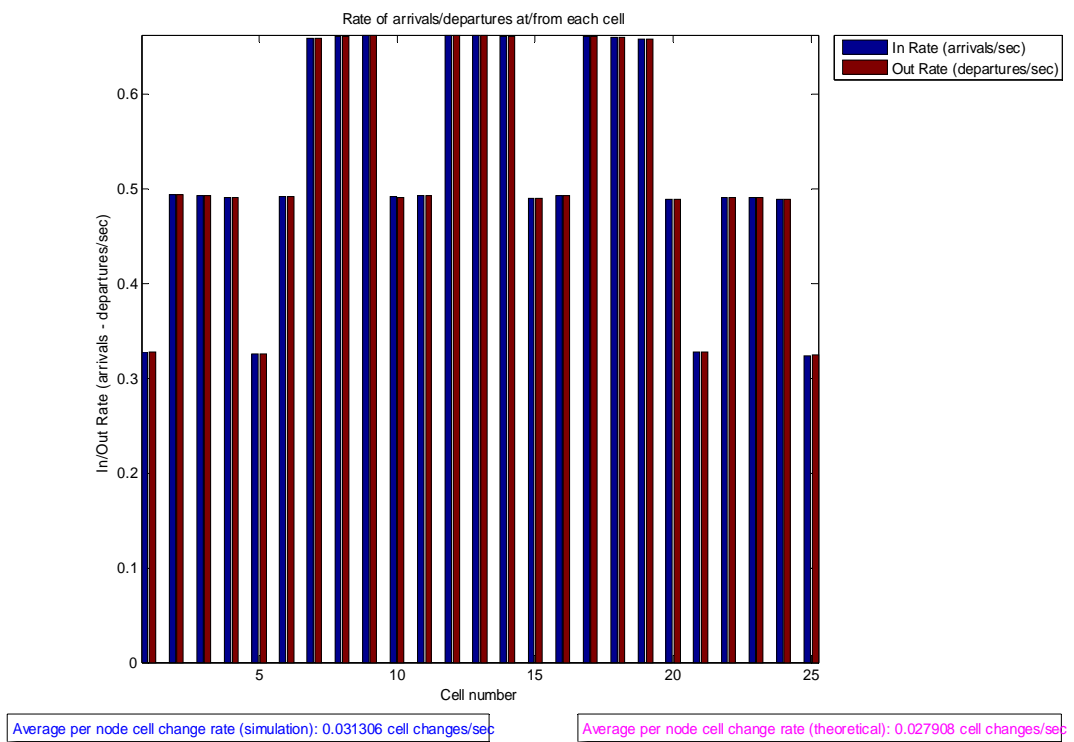
16^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_cellular

Πίνακας 16: Παράμετροι 16^{ης} προσομοίωσης

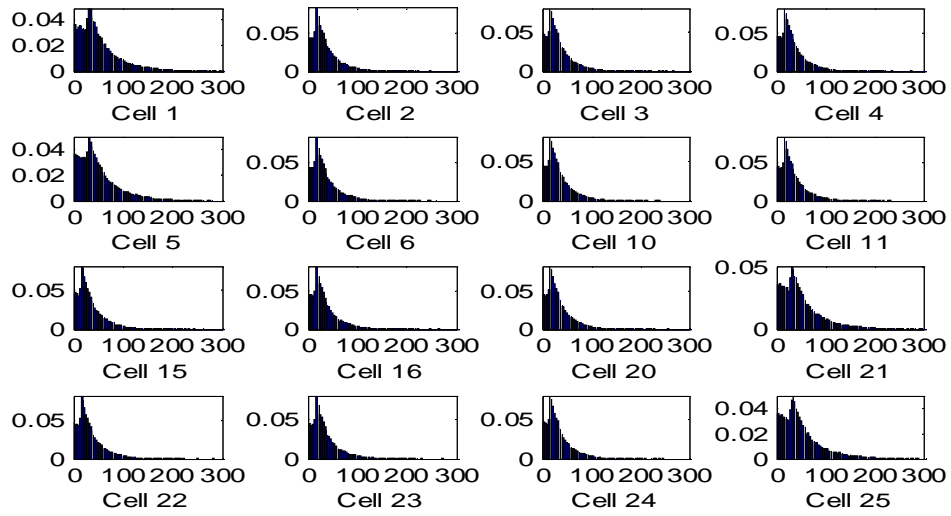
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 2500] x [0, 2500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[5, 35] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	420
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	100 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	0.5 s
Πλήθος Κυψελών (numOfCellsX x numOfCellsY)	5x5 = 25 κυψέλες



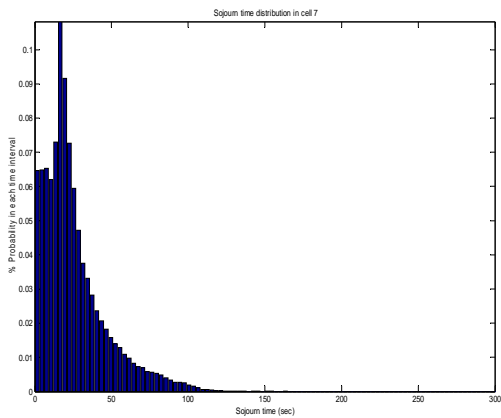
Σχήμα 62: Μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε κάθε κυψέλη



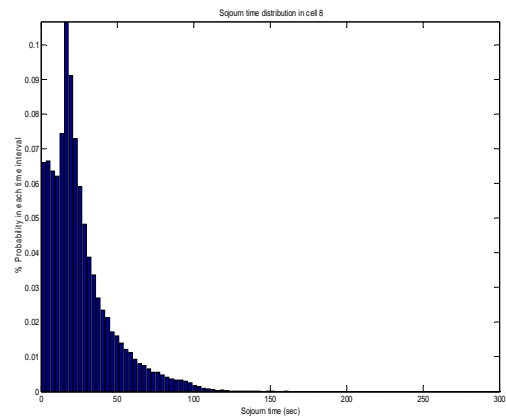
Σχήμα 63: Ρυθμός αφίξεων και αναχωρήσεων σε/από κάθε κυψέλη



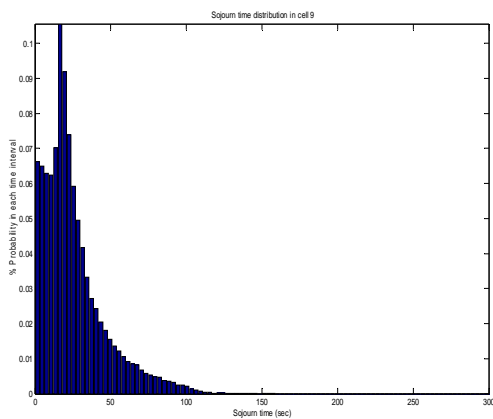
Σχήμα 64: Κατανομή χρόνου παραμονής για τις 16 περιμετρικές κυψέλες



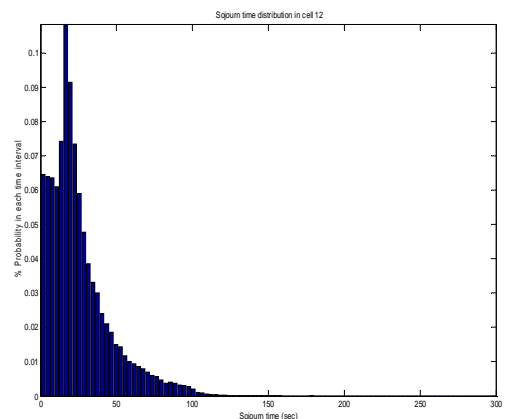
(i)



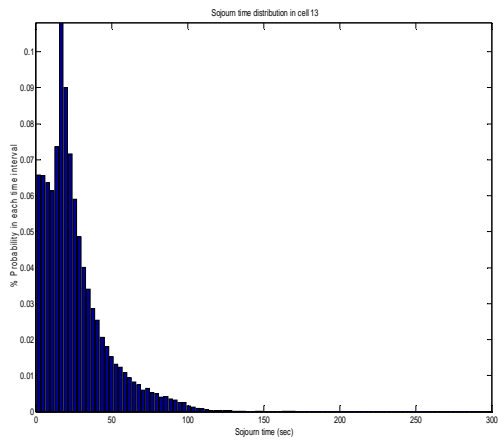
(ii)



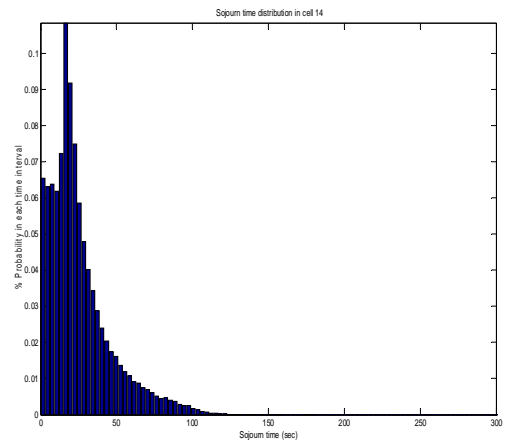
(iii)



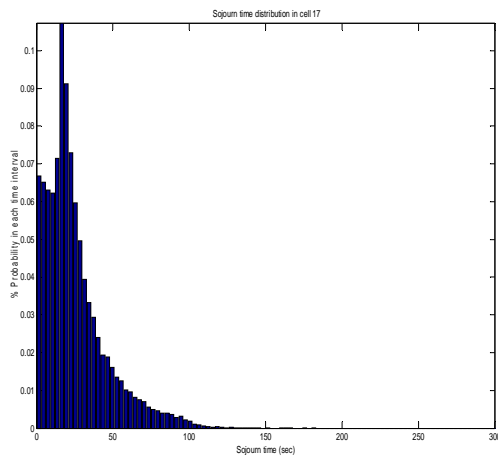
(iv)



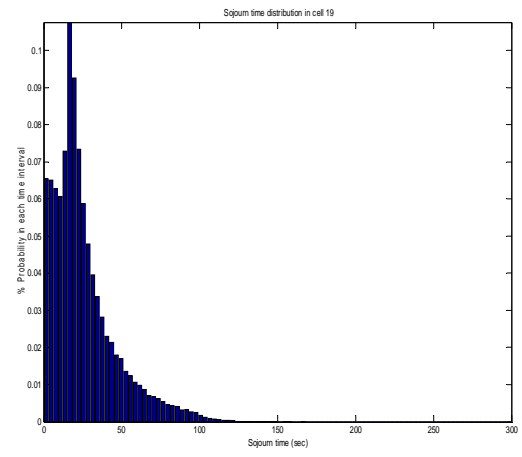
(v)



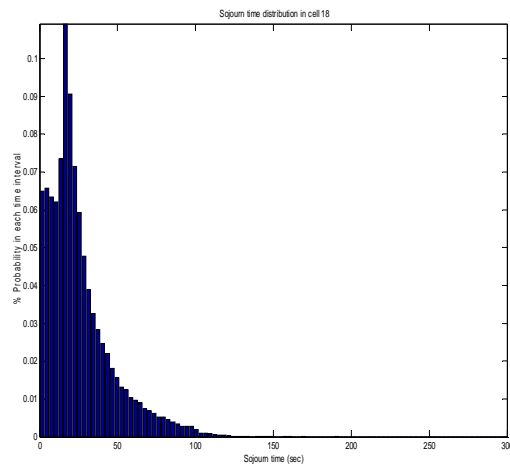
(vi)



(vii)



(ix)



(viii)

Σχήμα 65: Κατανομή χρόνου παραμονής για τις 9 εσωτερικές κυψέλες

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στη 16^η προσομοίωση, αυξάνουμε το μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης σε $[0, 2500] \times [0, 2500] \text{ m}^2$ και τον αριθμό των κόμβων, από 150 σε 420, αναλογικά με το εμβαδόν της περιοχής, ώστε να έχουμε τον ίδιο αριθμό κόμβων ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση. Επίσης, αυξάνουμε τον αριθμό των κυψελών και πάλι ανάλογα με την αύξηση του μεγέθους της περιοχής προσομοίωσης, ώστε το μέγεθος των κυψελών να παραμείνει σταθερό (από 9 κυψέλες σε 25 κυψέλες).

Στο Σχήμα 62, απεικονίζεται ο μέσος χρόνος παραμονής σε κάθε κυψέλη. Παρατηρούμε πως και πάλι οι μεγαλύτεροι μέσοι χρόνοι παραμονής συναντώνται στις ακρινές κυψέλες 1, 5, 21 και 25 του κυψελωτού συστήματος 5×5 , με τον μέγιστο μέσο χρόνο παραμονής (περίπου 50 sec όπως στην προηγούμενη προσομοίωση) να παρατηρείται στην κυψέλη 25. Ο μικρότερος μέσος χρόνος παραμονής συναντάται στις εσωτερικές κυψέλες του συστήματος 7, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18 και 19. Στις υπόλοιπες περιμετρικές συμμετρικές παρατηρείται ένας μεγαλύτερος μέσος χρόνος παραμονής από τις προαναφερθείσες. Η κατανομή αυτή των μέσων χρόνων παραμονής εξηγείται από το ότι οι 9 εσωτερικές κυψέλες δεν επηρεάζονται πλέον από την ανάκλαση των κόμβων στα όρια της περιοχής και επομένως οι κόμβοι απλά τις διασχίζουν καθώς προχωρούν προς τον προορισμό τους. Αντίθετα, στην περίπτωση των περιμετρικών κυψελών του συστήματος, όπου οι κόμβοι ανακλώνται στο σύνορο και επιστρέφουν στην κυψέλη, ο μέσος χρόνος παραμονής είναι μεγαλύτερος. Μάλιστα, όπως έχει εξηγηθεί σε προηγούμενη προσομοίωση, το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στις ακρινές κυψέλες (1, 5, 21 και 25) από ότι στις υπόλοιπες περιμετρικές. Επιπρόσθετα, ο μέσος όρος του μέσου χρόνου παραμονής για όλες τις κυψέλες είναι κατά 7.0125 sec μικρότερος από την προηγούμενη προσομοίωση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο λόγο που αναφέρθηκε πιο πάνω: στην προσομοίωση του συστήματος 5×5 κυψελών η επίδραση που έχει η ανάκλαση των κόμβων στα όρια της περιοχής πάνω στο χρόνο παραμονής είναι ποσοστιαία μικρότερη συγκρινόμενη με το σύστημα 3×3 (αφού οι 9 εσωτερικές κυψέλες δεν επηρεάζονται) και επομένως ο μέσος χρόνος παραμονής για όλες τις κυψέλες θα είναι μικρότερος στην προσομοίωση αυτή σε σχέση με την προηγούμενη.

Στο Σχήμα 63, μπορούμε να δούμε το ρυθμό αφίξεων/αναχωρήσεων για κάθε κυψέλη. Οι κυψέλες χωρίζονται με βάση το ρυθμό αυτό σε 3 βασικά ομάδες ξεκινώντας από τον υψηλότερο (περίπου 0.65 αφίξεις-αναχωρήσεις/sec) και καταλήγοντας στο χαμηλότερο (0.32 αφίξεις-αναχωρήσεις/sec): (α) οι κυψέλες 7, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18 και 19 (που είναι οι εννιά εσωτερικές κυψέλες που κυρίως μας ενδιαφέρουν γιατί δεν επηρεάζονται από τα φαινόμενα συνόρου), (β) οι κυψέλες 2, 3, 4, 6, 10, 11, 15, 16, 20, 22, 23 και 24 και (γ) οι κυψέλες 1, 5, 21, 25. Με δεδομένο ότι οι κεντρικές εσωτερικές κυψέλες αποτελούν συχνά μέρος της διαδρομής που ακολουθούν οι κόμβοι μέχρι να φτάσουν στον προορισμό τους, ο ρυθμός αλλαγών στις κυψέλες της ομάδας (α) είναι μεγαλύτερος. Επίσης, και οι εννιά εσωτερικές κυψέλες παρουσιάζουν περίπου τον ίδιο ρυθμό εισόδου/εξόδου, κάτι που αποτελεί ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό που προκύπτει σε αυτή την προσομοίωση.

Εξετάζοντας στη συνέχεια το Σχήμα 64, στο οποίο απεικονίζονται οι κατανομές του χρόνου παραμονής για τις 16 περιμετρικές κυψέλες, παρατηρούμε όμοιες κατανομές για τις ομάδες (β) και (γ) αντίστοιχα.

Τέλος, στο Σχήμα 65, όπου παρουσιάζονται οι κατανομές των υπόλοιπων 9 εσωτερικών κατανομών (ομάδα (α)), για σκοπούς σύγκρισης με τη 15^η προσομοίωση, παρατηρούμε παρόμοιες κατανομές για όλες τις κυψέλες, γεγονός που επιβεβαιώνει τα προηγούμενα σχόλια.

4.4. Προσομοιώσεις μοντέλων κινητικότητας σε δίκτυα ad hoc

Η τρίτη ομάδα προσομοιώσεων (Προσομοιώσεις 17 ως 24) αφορούν στην υλοποίηση των Μοντέλων Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και Τυχαίας Κατεύθυνσης σε δίκτυα ad hoc. Οι πρώτες τέσσερις προσομοιώσεις αφορούν στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και οι επόμενες τέσσερις στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.

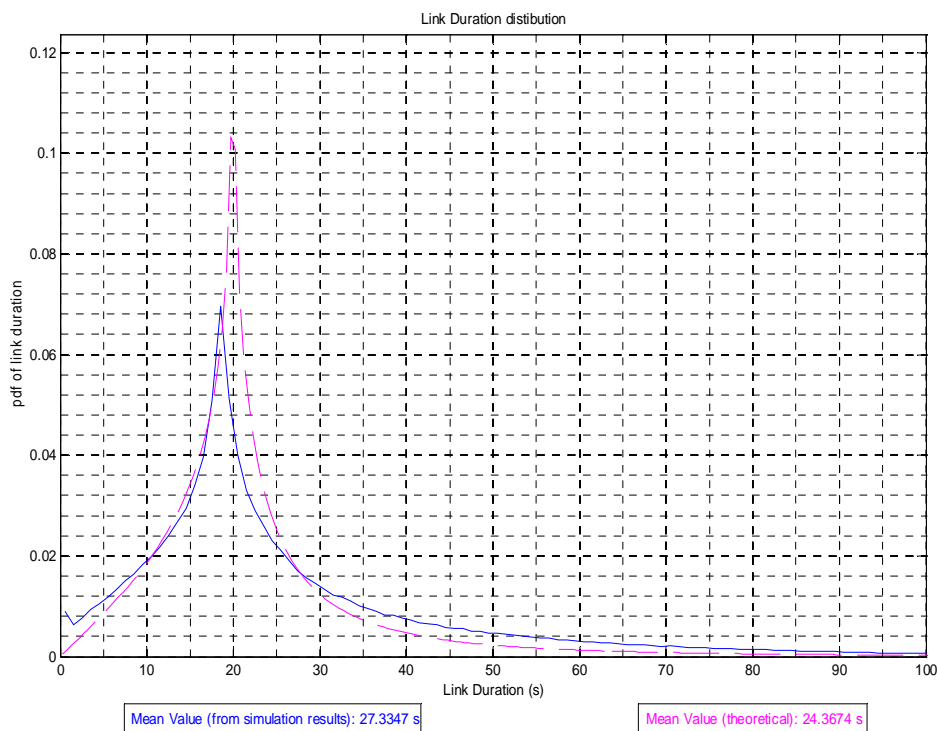
Για κάθε ένα από τα δύο μοντέλα κινητικότητας, εξετάσαμε τα εξής σενάρια:

- (i) Μηδενικός χρόνος παύσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και σταθερές ταχύτητες 20 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 1500m, με ακτίνα μετάδοσης (εμβέλεια) κάθε κόμβου ίση με 400m και μελέτη διάρκειας και διαθεσιμότητας ζεύξης καθώς και διάρκειας και διαθεσιμότητας μονοπατιού δύο αλμάτων.
- (ii) Ίδιες παράμετροι με την (i) με μελέτη διάρκειας και διαθεσιμότητας μονοπατιού τριών αλμάτων.
- (iii) Επίδραση ταχύτητας κόμβων: Μηδενικός χρόνος παύσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και σταθερές ταχύτητες 10 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 1500m, με ακτίνα μετάδοσης (εμβέλεια) κάθε κόμβου ίση με 400m και μελέτη διάρκειας και διαθεσιμότητας ζεύξης καθώς και διάρκειας και διαθεσιμότητας μονοπατιού τριών αλμάτων.
- (iv) Επίδραση ακτίνας μετάδοσης κόμβων: Μηδενικός χρόνος παύσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης και σταθερές ταχύτητες 20 m/s σε τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης πλευράς 1500m, με ακτίνα μετάδοσης (εμβέλεια) κάθε κόμβου ίση με 500m και μελέτη διάρκειας και διαθεσιμότητας ζεύξης καθώς και διάρκειας και διαθεσιμότητας μονοπατιού τριών αλμάτων.

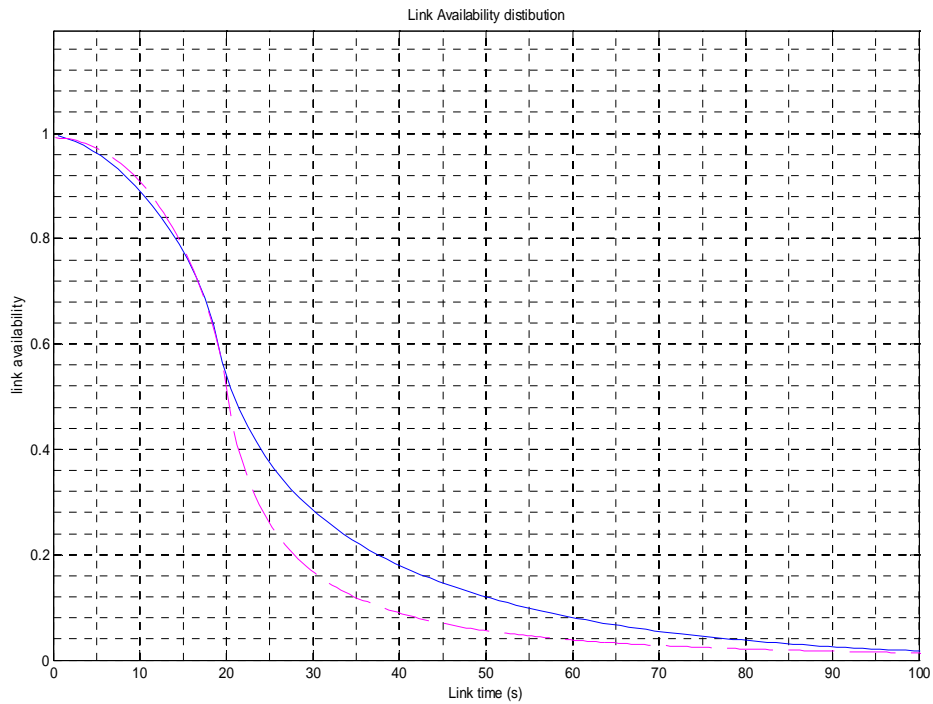
17^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_adhoc_path2

Πίνακας 17: Παράμετροι 17^{ης} προσομοίωσης

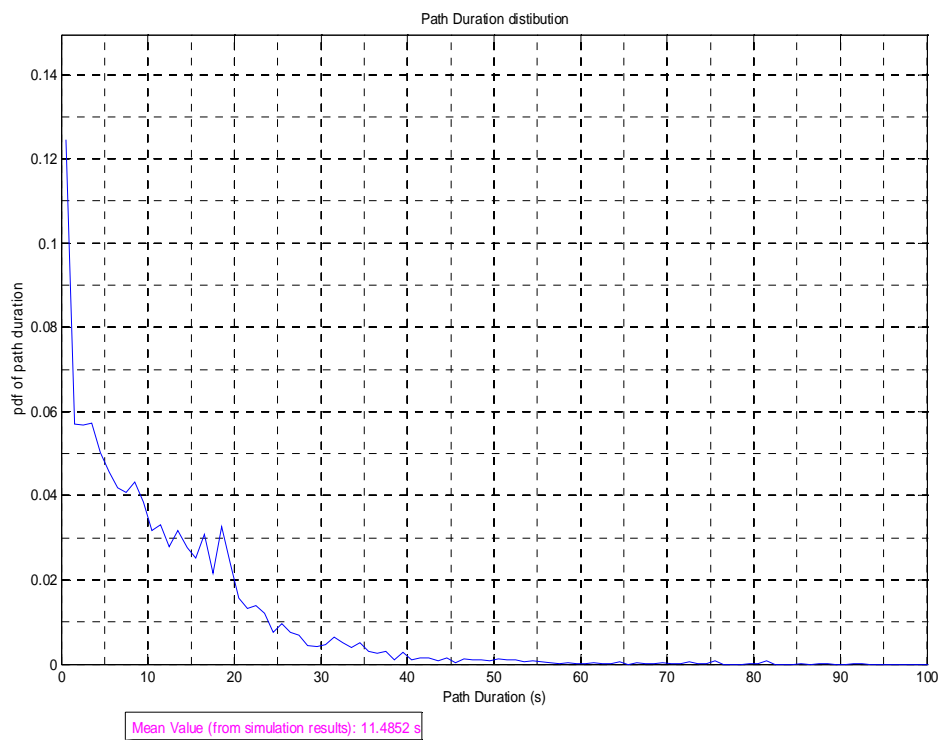
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[20, 20] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	25
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	150 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1 s
Ακτίνα μετάδοσης (maxLinkDist)	400 m



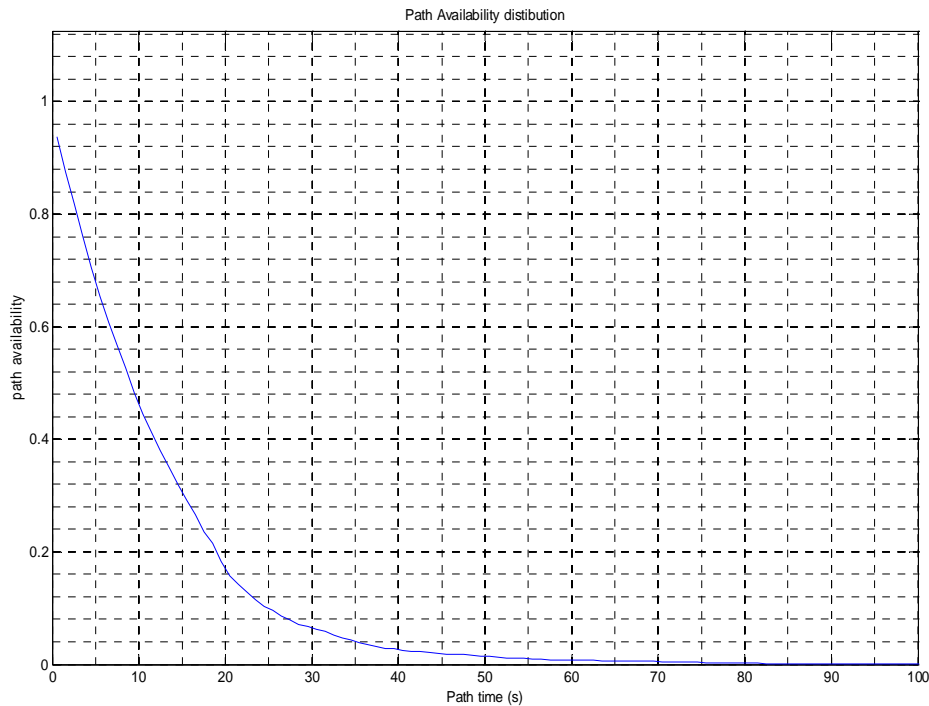
Σχήμα 66: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης



Σχήμα 67: Συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης



Σχήμα 68: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού 2 αλμάτων



Σχήμα 69: Συνάρτηση διαθεσιμότητας μονοπατιού 2 αλμάτων

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην προσομοίωση αυτή, μελετούμε ένα δίκτυο ad hoc, σε μια τετράγωνη περιοχή προσομοίωσης, όπου οι κόμβοι κινούνται με σταθερή ταχύτητα σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και δημιουργούν ζεύξεις ανά δύο μεταξύ τους όταν βρίσκονται ο ένας στην εμβέλεια μετάδοσης του άλλου. Θεωρούμε πως η ακτίνα μετάδοσης (maxLinkDist) είναι η ίδια για όλους τους κόμβους προσομοίωσης και ισούται με 400m.

Αρχικά, στο Σχήμα 66, εξετάζουμε τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας της ζεύξης (link duration) που δημιουργείται ανάμεσα σε οποιοδήποτε ζευγάρι κόμβων της προσομοίωσης. Τόσο η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης που προκύπτει από την προσομοίωση, όσο και η θεωρητική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, αρχικά αυξάνονται μέχρι ένα μέγιστο σημείο και στη συνέχεια φθίνουν απότομα τείνοντας στο μηδέν. Παρατηρούμε ωστόσο πως η καμπύλη προσομοίωσης είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά και έχει μικρότερη μέγιστη τιμή από την αντίστοιχη θεωρητική. Οι αποκλίσεις αυτές της καμπύλης προσομοίωσης από τη θεωρητική καμπύλη οφείλονται στους εξής δύο λόγους:

- Στο θεωρητικό τύπο που χρησιμοποιήσαμε για τον υπολογισμό της θεωρητικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης κάναμε την παραδοχή πως οι κόμβοι συνεχίζουν, μετά την εγκατάσταση της ζεύξης ανάμεσά τους, να κινούνται σε μια ευθεία γραμμή χωρίς να μεταβάλλεται η κατεύθυνση κίνησής

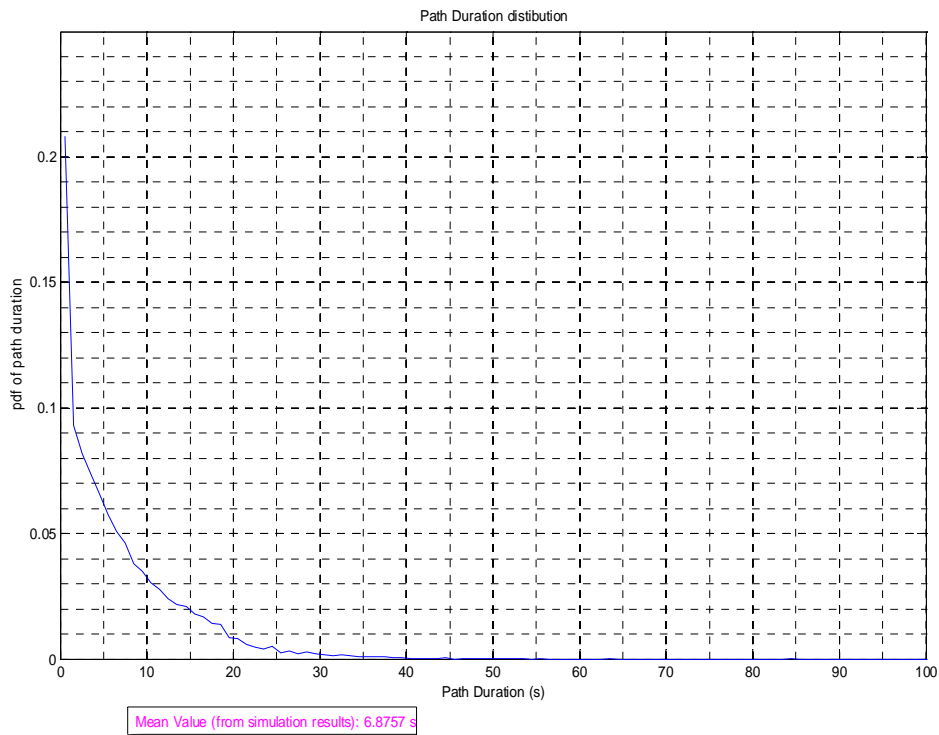
- τους κατά τη διάρκεια της ζεύξης, γεγονός που δεν ισχύει στην περίπτωση της προσομοίωσης μας.
- Στη διαδικασία εξαγωγής της θεωρητικής σχέσης για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης γίνεται η παραδοχή ότι οι κατευθύνσεις κίνησης των κόμβων προέρχονται από ομοιόμορφη κατανομή. Αυτό δεν ισχύει στην πράξη στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, όπως αποδεικνύεται στο [16]-Κεφ.3.

Στο Σχήμα 67 απεικονίζεται η συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης για το συγκεκριμένο ad hoc δίκτυο που υλοποιήσαμε. Και οι δύο συναρτήσεις (προσομοίωσης και θεωρητική) έχουν μέγιστη διαθεσιμότητα (ίση με 1) για μηδενικό χρόνο ζεύξης, η οποία μειώνεται γρήγορα μέχρι να φτάσει στο μισό (σημείο καμπής στο 0.5) και ακολούθως φθίνει καθώς ο χρόνος ζωής της ζεύξης αυξάνεται, τείνοντας στο μηδέν. Παρατηρούμε πως παρόλο που η συνάρτηση που προέκυψε από την προσομοίωση έχει παρόμοια μορφή με τη θεωρητική συνάρτηση διαθεσιμότητας, εντούτοις υπάρχουν πάλι κάποιες αποκλίσεις από τη θεωρητική συνάρτηση, κυρίως για μεγάλες τιμές του χρόνου ζεύξης. Λόγω του ότι η συνάρτηση διαθεσιμότητας εξαρτάται από τη σ.π.π. της διάρκειας ζεύξης (είναι το ολοκλήρωμα της από t μέχρι άπειρο), οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

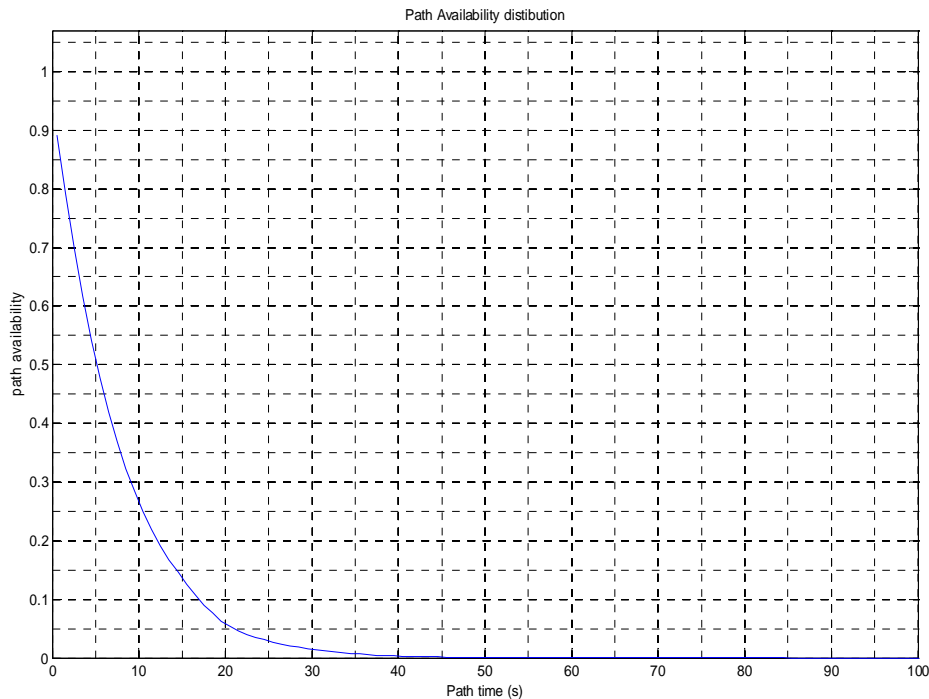
Ακολούθως, για τον υπολογισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας και της συνάρτησης διαθεσιμότητας μονοπατιού δύο αλμάτων, θεωρήσαμε δύο συγκεκριμένους κόμβους (1 και 2) ως τους τερματικούς κόμβους, ανάμεσα στους οποίους μπορεί να δημιουργηθεί ένα μονοπάτι δύο αλμάτων, μέσω της ενεργοποίησης δύο ζεύξεων μεταξύ ενός κοινού ενδιάμεσου κόμβου και των τερματικών κόμβων αντίστοιχα. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού και η συνάρτηση διαθεσιμότητας μονοπατιού παρουσιάζονται στα Σχήματα 68 και 69. Στο Σχήμα 68 παρατηρούμε πως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού είναι μια φθίνουσα συνάρτηση που τείνει στο μηδέν με τη μέγιστη τιμή να λαμβάνεται για διάρκεια μονοπατιού ίση με μηδέν. Επίσης, παρόμοια μορφή έχει και η συνάρτηση διαθεσιμότητας στο Σχήμα 69, η οποία παίρνει τη μέγιστη τιμή της για μηδενικό χρόνο μονοπατιού και φθίνει προς το μηδέν καθώς ο χρόνος μονοπατιού τείνει στο άπειρο.

18^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_adhoc_path3*Πίνακας 18: Παράμετροι 18^{ης} προσομοίωσης*

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[20, 20] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	25
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	150 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1 s
Ακτίνα μετάδοσης (maxLinkDist)	400 m



Σχήμα 70: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού 3 αλμάτων



Σχήμα 71: Συνάρτηση διαθεσιμότητας μονοπατιού 3 αλμάτων

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στη 18^η προσομοίωση, αυτό που μεταβάλλεται σε σχέση με την προηγούμενη είναι ο αριθμός των αλμάτων (ζεύξεων) που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός μονοπατιού ανάμεσα σε δύο συγκεκριμένους κόμβους. Επομένως, υλοποιούμε στην προσομοίωση αυτή ένα δίκτυο ad hoc, με ίδια χαρακτηριστικά με την προηγούμενη, εξετάζοντας όμως τώρα την περίπτωση μονοπατιών τριών αλμάτων (δύο ενδιάμεσοι κόμβοι). Επειδή, τα δίκτυα στις δύο προσομοιώσεις είναι όμοια, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης και η συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης θα είναι οι ίδιες με προηγουμένως και παραλείπονται.

Στο Σχήμα 70, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού, παρατηρούμε πως αυτή έχει μια πιο ομαλή μορφή από την αντίστοιχη συνάρτηση για την 17^η προσομοίωση. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο αριθμό μονοπατιών που δημιουργήθηκαν ανά μονάδα χρόνου στη 18^η προσομοίωση (άρα περισσότερα δείγματα και μεγαλύτερη ακρίβεια), λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας δημιουργίας ενός μονοπατιού τριών αλμάτων σε σχέση με ένα μονοπάτι δύο αλμάτων (η ελάχιστη απόσταση που απαιτείται να υπάρχει μεταξύ των δύο τερματικών κόμβων είναι μεγαλύτερη). Διαπιστώνουμε επίσης πως στην περίπτωση του μονοπατιού τριών αλμάτων η μέση διάρκεια μονοπατιού είναι μικρότερη κατά 4.0695s (ποσοστό περίπου 40%) από τη μέση διάρκεια μονοπατιού δύο αλμάτων της προηγούμενης προσομοίωσης. Το γεγονός αυτό εξηγείται εύκολα, αν λάβουμε υπόψη πως ένα μονοπάτι σταματά να υπάρχει αν οποιαδήποτε από τις ζεύξεις που το αποτελούν διακοπεί. Επομένως, ο μέσος χρόνος ζωής ενός μονοπατιού τριών αλμάτων θα είναι μικρότερος από το μέσο χρόνο

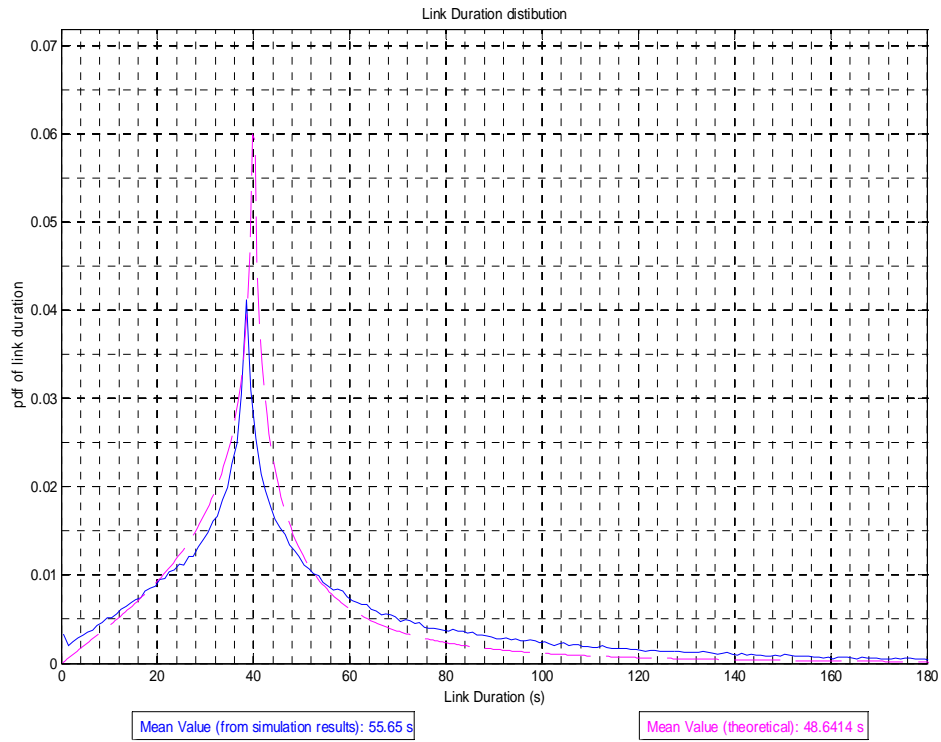
ζωής ενός μονοπατιού δύο αλμάτων, λόγω της μεγαλύτερης πιθανότητας μια από τις τρεις ζεύξεις του να διακοπεί (σε σχέση με τις δύο ζεύξεις του μονοπατιού δύο αλμάτων).

Στο Σχήμα 71, παρατηρούμε πως και η συνάρτηση διαθεσιμότητας μονοπατιού τριών αλμάτων έχει πιο ομαλή μορφή σε σχέση με την αντίστοιχη συνάρτηση μονοπατιού δύο αλμάτων του Σχήματος 69, για τον ίδιο λόγο που εξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

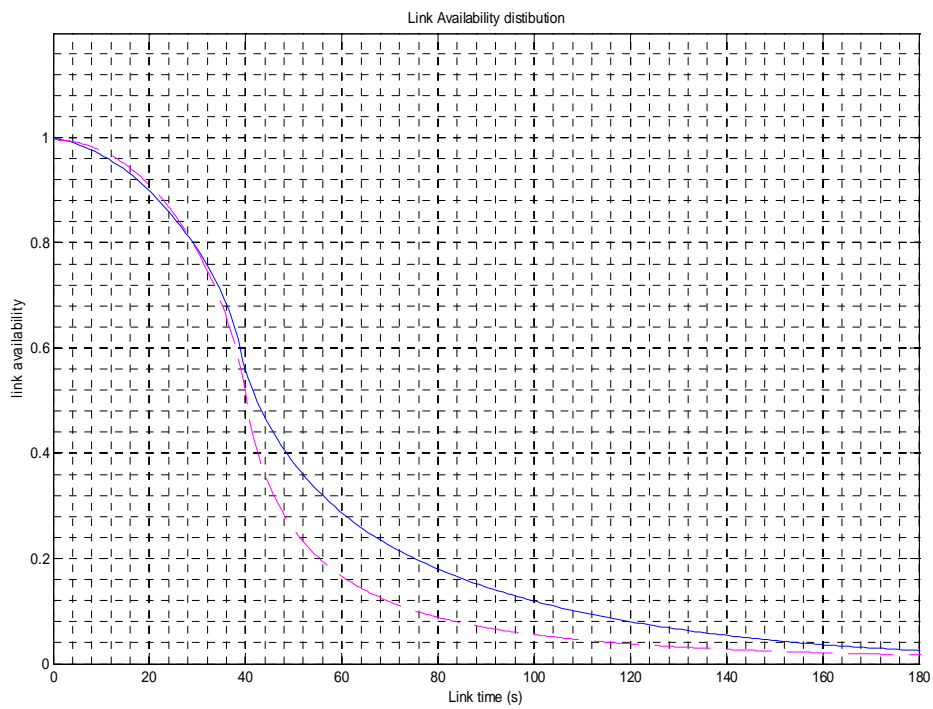
19^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_adhoc_path3

Πίνακας 19: Παράμετροι 19^{ης} προσομοίωσης

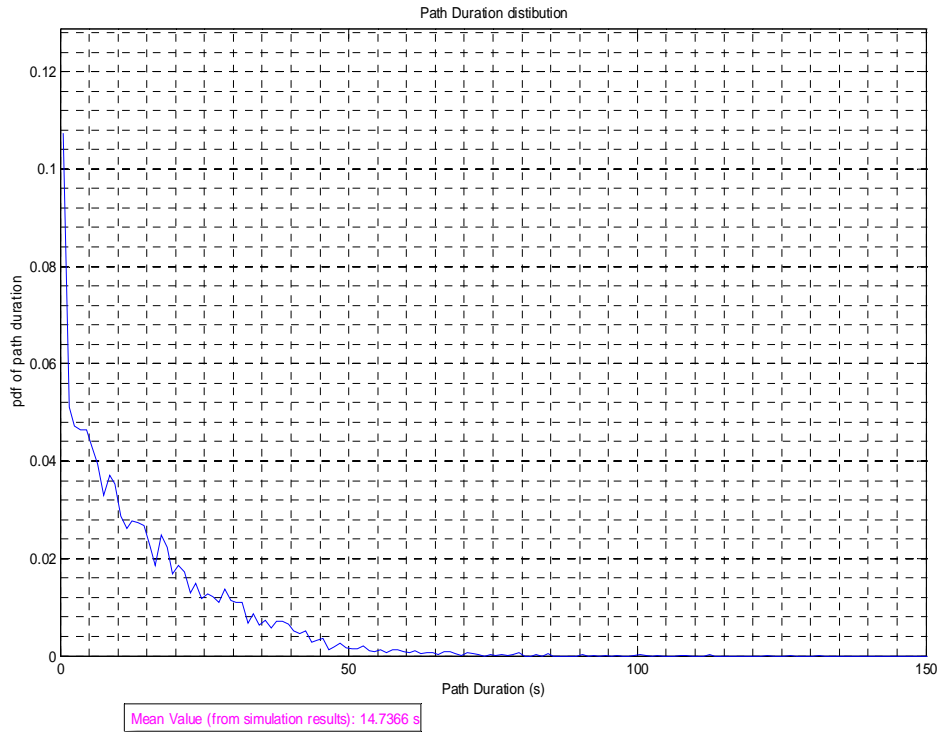
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[10, 10] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	25
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	150 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1 s
Ακτίνα μετάδοσης (maxLinkDist)	400 m



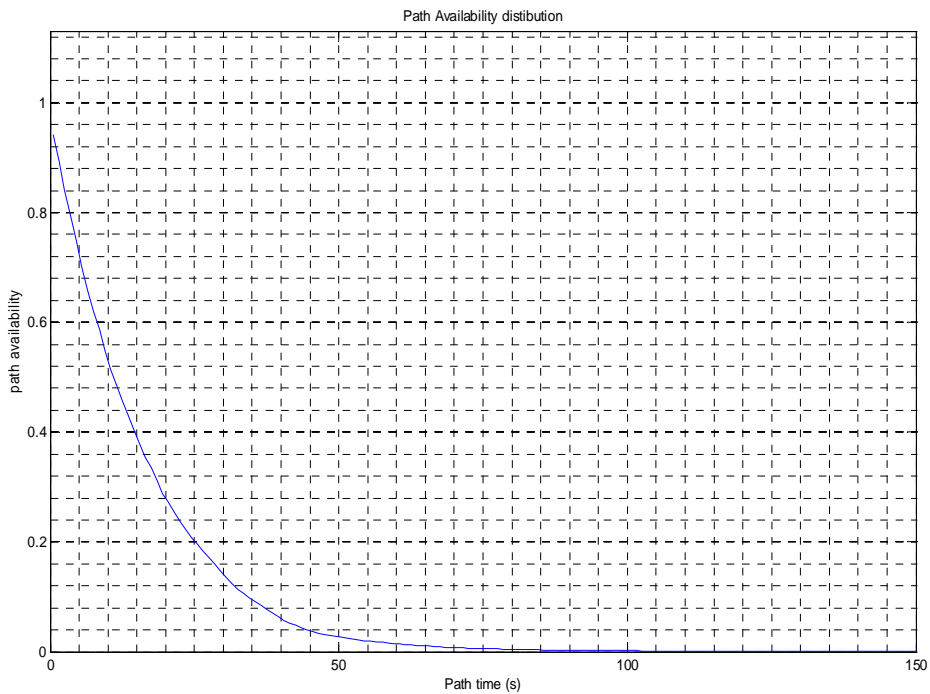
Σχήμα 72: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης



Σχήμα 73: Συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης



Σχήμα 74: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού 3 αλμάτων



Σχήμα 75: Συνάρτηση διαθεσιμότητας μονοπατιού 3 αλμάτων

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην προσομοίωση αυτή, μεταβάλλουμε σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις την τιμή της ταχύτητας με την οποία κινούνται οι κόμβοι της προσομοίωσης από 20 m/s σε 10 m/s, επιδιώκοντας να μελετήσουμε την επίδραση της ταχύτητας των κόμβων σε ένα δίκτυο ad hoc.

Στο Σχήμα 72 παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης. Παρατηρούμε πως η καμπύλη προσομοίωσης έχει την ίδια μορφή με την θεωρητική καμπύλη, ωστόσο και πάλι έχει μικρότερο μέγιστο, το οποίο εμφανίζεται για μικρότερη διάρκεια ζεύξης από το αντίστοιχο θεωρητικό. Σε σύγκριση με την περίπτωση κατά την οποία οι κόμβοι κινούνται με ταχύτητα 20 m/s (Σχήμα 66), διαπιστώνουμε διπλασιασμό της μέσης διάρκειας ζεύξης (αύξηση κατά 28.3153 s) ενώ επίσης παρατηρούμε πως η μέγιστη τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης στην προσομοίωση αυτή είναι μικρότερη από τη μέγιστη τιμή της αντίστοιχης συνάρτησης του Σχήματος 66. Αυτό οφείλεται στο ότι οι κόμβοι στη 19^η προσομοίωση κινούνται με μισή ταχύτητα, με αποτέλεσμα η ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων να παραμένει ενεργή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αφού αργούν να βρεθούν ο ένας εκτός της εμβέλειας μετάδοσης του άλλου. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε μια ελαφρά μετατόπιση της καμπύλης προσομοίωσης έτσι ώστε η θέση του μεγίστου της να είναι πιο κοντά στο θεωρητικό μέγιστο σε σχέση με την αντίστοιχη καμπύλη για ταχύτητα 20 m/s. Τέλος, διαπιστώνουμε πως στην περίπτωση της συνάρτησης του Σχήματος 72 η καμπύλη προσομοίωσης παρουσιάζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις από τη μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 66. Αυτό εξηγείται αν αναλογιστούμε πως από τη στιγμή που οι κόμβοι κινούνται πιο αργά στην προσομοίωση αυτή, οι ζεύξεις διαρκούν περισσότερο με αποτέλεσμα στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης να έχουμε μικρότερο πλήθος ζεύξεων σε αυτή την προσομοίωση σε σχέση με την 17^η, άρα και μικρότερη ακρίβεια στα αποτελέσματά μας.

Εξετάζοντας στη συνέχεια το Σχήμα 73, παρατηρούμε πως η συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης για την προσομοίωση αυτή, έχει παρόμοια μορφή με την αντίστοιχη του Σχήματος 67. Λόγω του ότι η συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης είναι ουσιαστικά το ολοκλήρωμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης και επειδή η πράξη της ολοκλήρωσης εξομαλύνει τη μορφή μιας καμπύλης, παρατηρείται αυτή η ομαλή μορφή της συνάρτησης διαθεσιμότητας. Ωστόσο, διαπιστώνουμε πως το σημείο καμψής της συνάρτησης (που βρίσκεται στο σημείο όπου η συνάρτηση μειώνεται περίπου στο μισό της μέγιστης τιμής της) συναντάται για διπλάσιο χρόνο ζεύξης (40 s για ταχύτητα 10 m/s έναντι 20 s για ταχύτητα 20 m/s), λόγω ακριβώς της μεγαλύτερης διάρκειας ζεύξης που παρατηρείται για ταχύτητα των κόμβων ίση με 10 m/s. Αυτό καθιστά μια ζεύξη διαθέσιμη για μεγαλύτερο χρόνο. Για τον ίδιο λόγο, διαπιστώνουμε πως και η πιθανότητα μια ζεύξη να είναι διαθέσιμη μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στην προσομοίωση αυτή είναι μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση όπου οι κόμβοι κινούνται με διπλάσια ταχύτητα.

Μελετώντας ακολούθως τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού τριών αλμάτων του Σχήματος 74, παρατηρούμε πως η μέση διάρκεια μονοπατιού όπως προκύπτει από την προσομοίωση αυτή είναι περίπου διπλάσια (κατά 2.14 φορές μεγαλύτερη) από την αντίστοιχη της 18^{ης} προσομοίωσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 70. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί πλήρως με τον ορισμό της διάρκειας

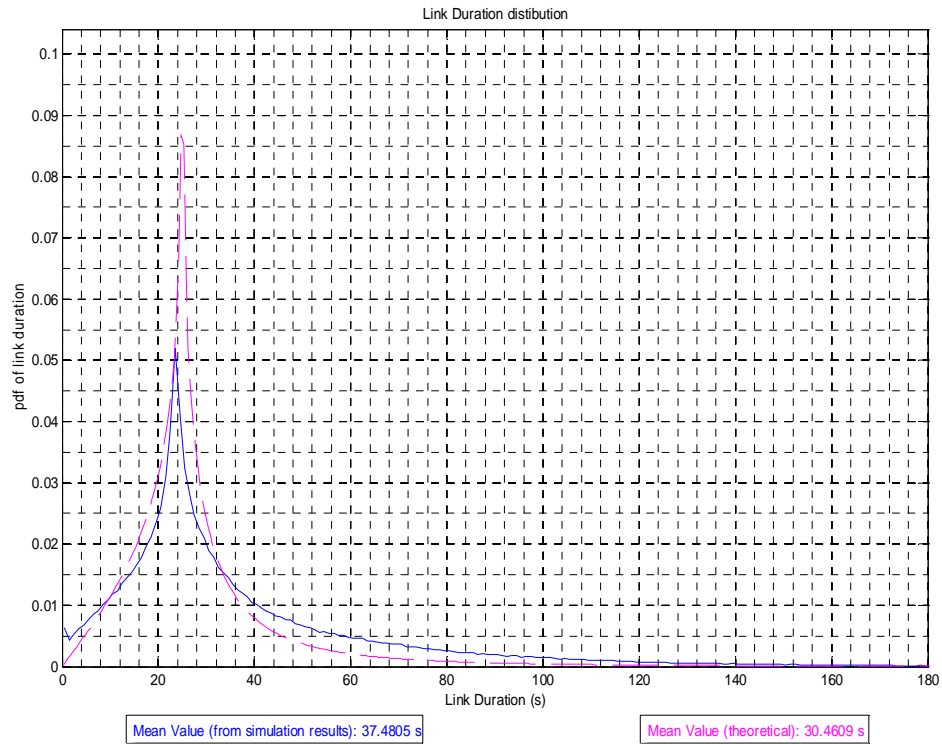
μονοπατιού, με βάση τον οποίο ένα μονοπάτι διακόπτεται αν οποιαδήποτε από τις ζεύξεις που το αποτελούν διακοπεί. Επομένως, για μεγαλύτερη διάρκεια ζεύξης θα έχουμε αυτόματα και μεγαλύτερη μέση διάρκεια μονοπατιού. Ωστόσο, η μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 74 παρουσιάζει περισσότερες διακυμάνσεις από τη μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 70. Αυτό οφείλεται, στο μικρότερο αριθμό μονοπατιών που δημιουργούνται στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης, λόγω της μεγαλύτερης μέσης διάρκειας των μονοπατιών, που έχει ως αποτέλεσμα λιγότερα δείγματα και μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με την 18^η προσομοίωση.

Τέλος, στο Σχήμα 75, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση της διαθεσιμότητας μονοπατιού τριών αλμάτων, παρατηρούμε και πάλι μια εξομάλυνση της καμπύλης λόγω της πράξης της ολοκλήρωσης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού. Επιπρόσθετα, διαπιστώνουμε πως η διαθεσιμότητα ενός μονοπατιού μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση κατά την οποία οι κόμβοι κινούνται με μικρότερη ταχύτητα, όπως μπορεί εύκολα να συμπεράνουμε από τη σύγκριση των καμπυλών στα Σχήματα 75 και 71, για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί.

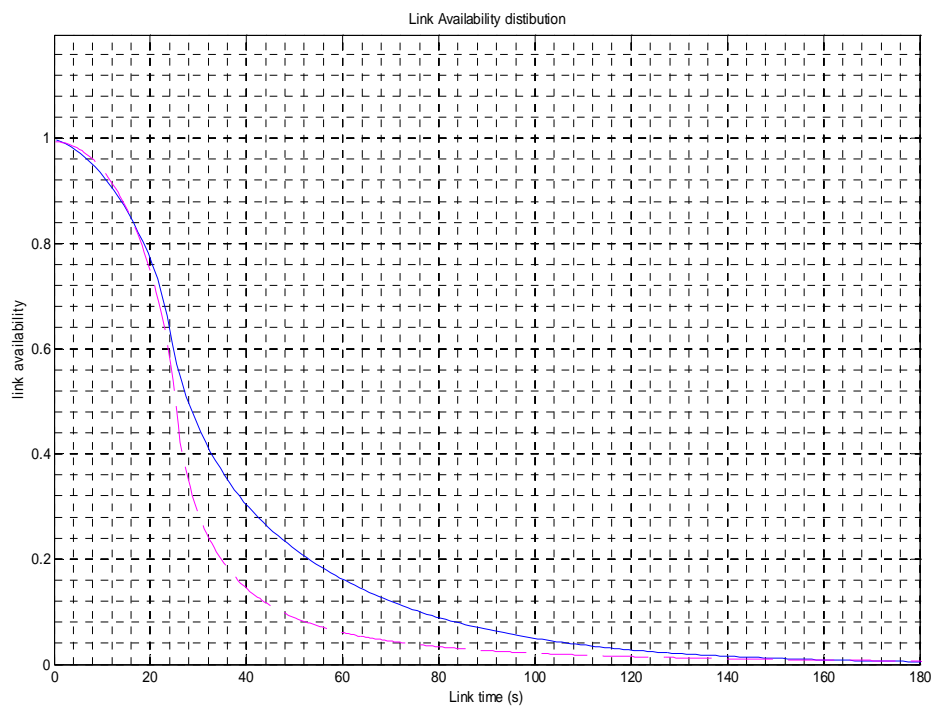
20^η Προσομοίωση: Κώδικας rwp_adhoc_path3

Πίνακας 20: Παράμετροι 20^{ης} προσομοίωσης

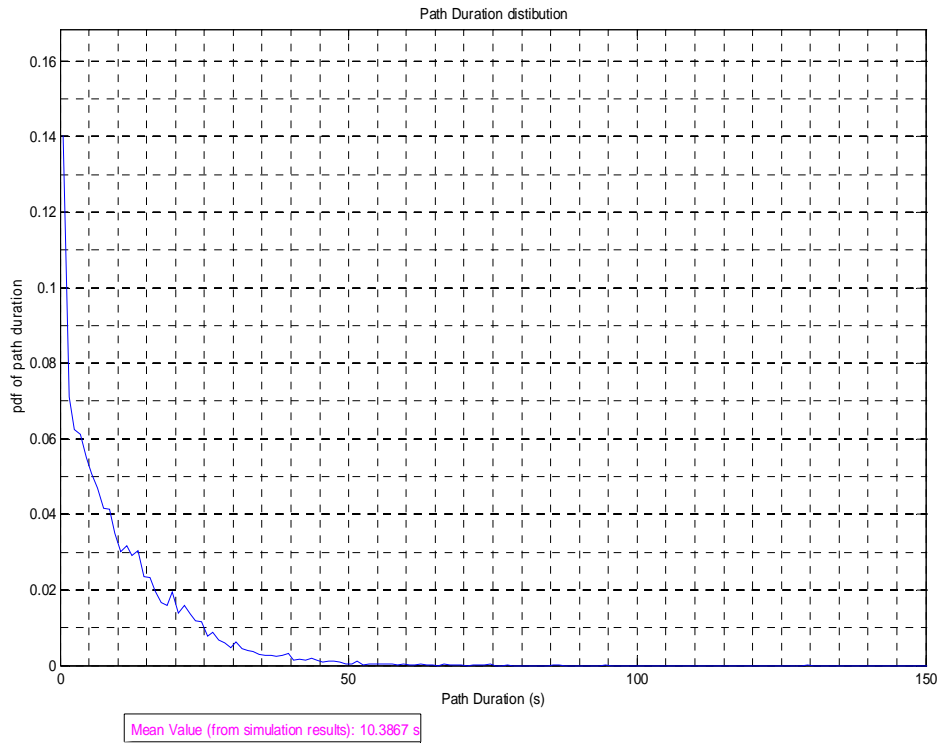
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[20, 20] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	25
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	150 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1 s
Ακτίνα μετάδοσης (maxLinkDist)	500 m



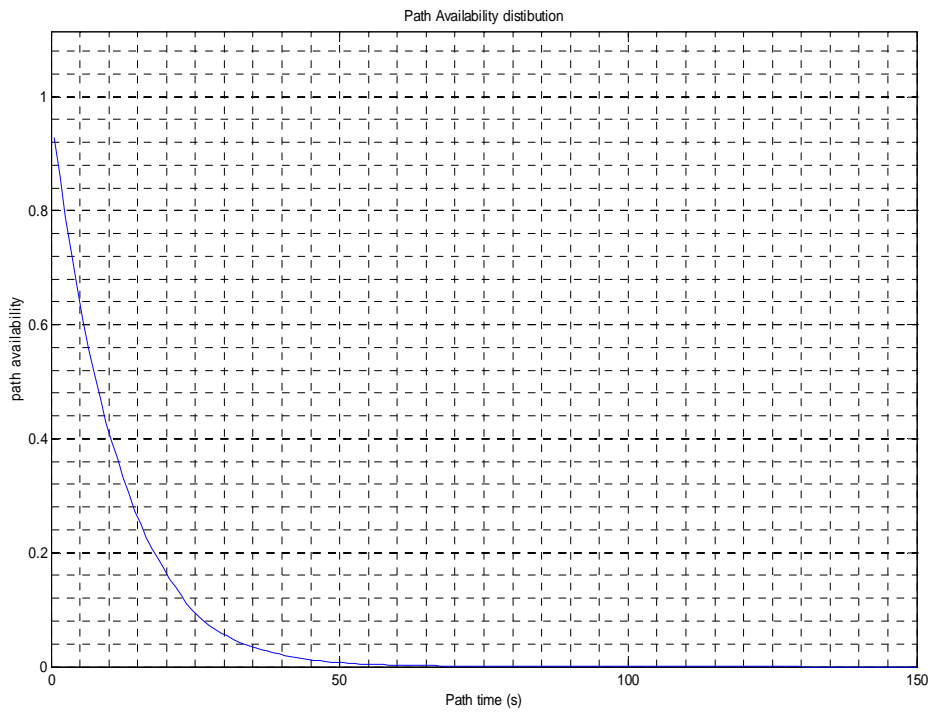
Σχήμα 76: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης



Σχήμα 77: Συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης



Σχήμα 78: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού 3 αλμάτων



Σχήμα 79: Συνάρτηση διαθεσιμότητας μονοπατιού 3 αλμάτων

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην 20^η προσομοίωση, αυτό που μεταβάλλεται σε σχέση με την 18^η είναι η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων, η οποία αυξάνεται από τα 400 m στα 500 m (αύξηση 25%).

Εξετάζοντας προσεκτικά το Σχήμα 76, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, παρατηρούμε πως, σε σύγκριση με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης του Σχήματος 66, όπου η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων είναι μικρότερη από ότι στην προσομοίωση αυτή, έχει μικρότερη μέγιστη τιμή (θεωρητική και προσομοίωσης). Επίσης, η μέση διάρκεια ζεύξης στην προσομοίωση αυτή είναι μεγαλύτερη από τη μέση διάρκεια ζεύξης στην 17^η προσομοίωση κατά 10.1458s (ποσοστό περίπου 37%). Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ακτίνα μετάδοσης των κόμβων της προσομοίωσης αυτής, με συνέπεια ένας κόμβος να παραμένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην εμβέλεια μετάδοσης ενός άλλου κόμβου και επομένως η ζεύξη να έχει μεγαλύτερη διάρκεια. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε μια ελαφρά μετατόπιση της καμπύλης προσομοίωσης έτσι ώστε η θέση του μεγίστου της να είναι πιο κοντά στο θεωρητικό μέγιστο σε σχέση με την αντίστοιχη καμπύλη του Σχήματος 66 για την 18^η προσομοίωση. Επιπλέον, οι πολύ μικρές διακυμάνσεις στη μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 76 σε σχέση με τη μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 66 οφείλονται, όπως και πριν, στο μικρότερο πλήθος ζεύξεων που δημιουργούνται στην προσομοίωση αυτή λόγω της μεγαλύτερης μέσης διάρκειας ζεύξης.

Στο Σχήμα 77, όπου απεικονίζεται η συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης, παρατηρούμε μια πιο ομαλή μορφή της καμπύλης σε σχέση με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, επειδή όπως αναφέραμε, η πρώτη είναι το ολοκλήρωμα της δεύτερης. Διαπιστώνουμε όμως πάλι πως το σημείο καμψής της συνάρτησης συναντάται για μεγαλύτερο χρόνο ζεύξης (περίπου στα 25 s) σε σχέση με την περίπτωση όπου οι κόμβοι μεταδίδουν σε ακτίνα 400 m, καθώς και τη μεγαλύτερη πιθανότητα μια ζεύξη να είναι διαθέσιμη μετά από ένα συγκεκριμένο χρόνο ζεύξης.

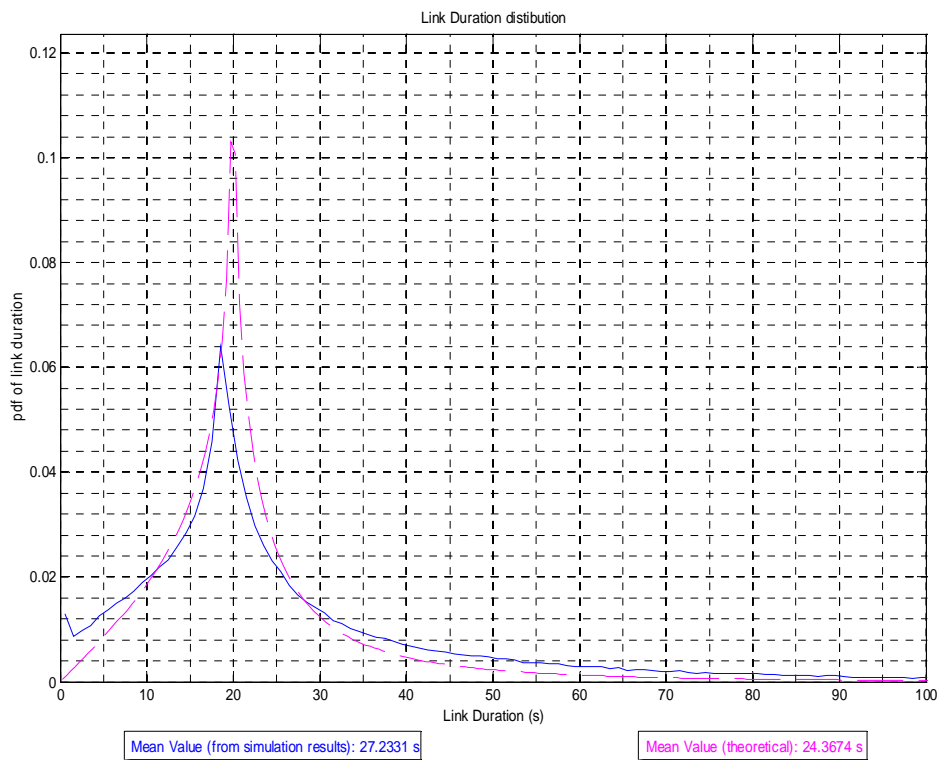
Εξετάζοντας τώρα τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού τριών αλμάτων του Σχήματος 78, διαπιστώνουμε πως η μέση διάρκεια μονοπατιού όπως προκύπτει από την 20^η προσομοίωση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της 18^{ης} (Σχήμα 70) κατά 3.511 s (ποσοστό περίπου 51%), όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της σχέσης μεταξύ της διάρκειας μονοπατιού και της διάρκειας ζεύξης. Εντούτοις, η καμπύλη του Σχήματος 78 παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερες διακυμάνσεις από την καμπύλη του Σχήματος 70, που οφείλονται, όπως έχει ήδη εξηγηθεί, στη μεγαλύτερη μέση διάρκεια ζεύξης που συνεπάγεται μεγαλύτερη μέση διάρκεια μονοπατιού και επομένως μικρότερο αριθμό μονοπατιών (δειγμάτων) στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης.

Τέλος, στο Σχήμα 79, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση της διαθεσιμότητας μονοπατιού τριών αλμάτων, διαπιστώνουμε και πάλι μια εξομάλυνση της καμπύλης λόγω της πράξης της ολοκλήρωσης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις καμπύλες των Σχημάτων 79 και 71, παρατηρούμε πως η πιθανότητα ένα μονοπάτι να είναι διαθέσιμο μετά από ένα συγκεκριμένο χρόνο είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση κατά την οποία η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων ισούται με 500 m.

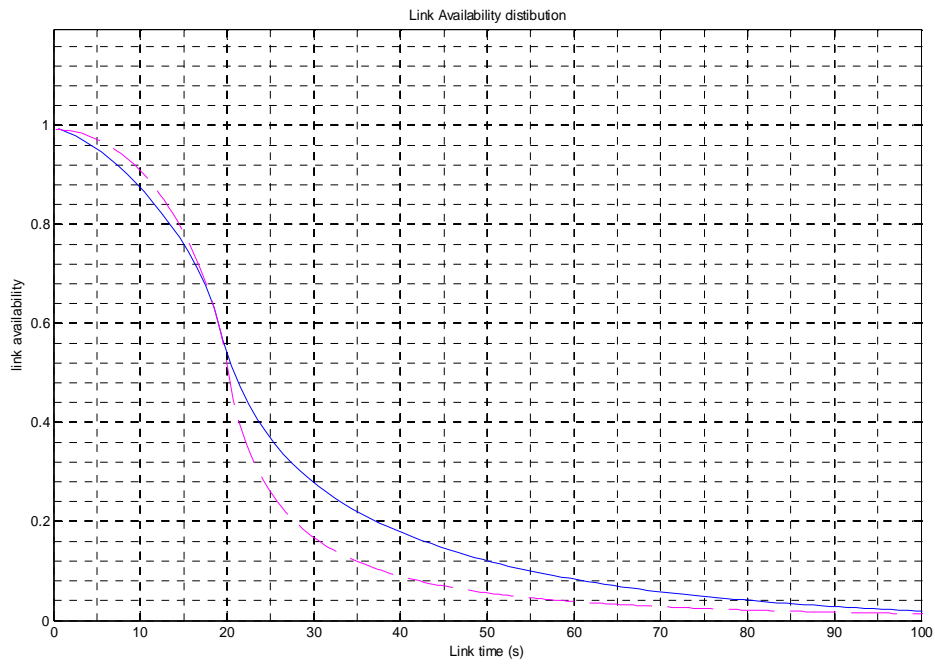
21^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_adhoc_path2

Πίνακας 21: Παράμετροι 21^{ης} προσομοίωσης

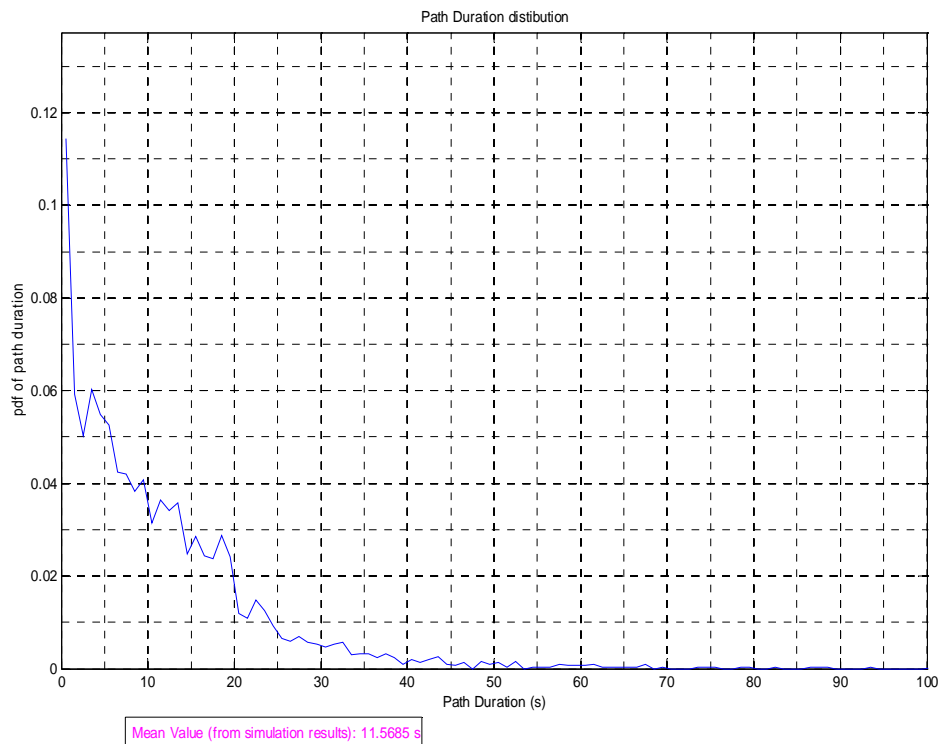
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[20, 20] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	25
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	150 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1 s
Ακτίνα μετάδοσης (maxLinkDist)	400 m



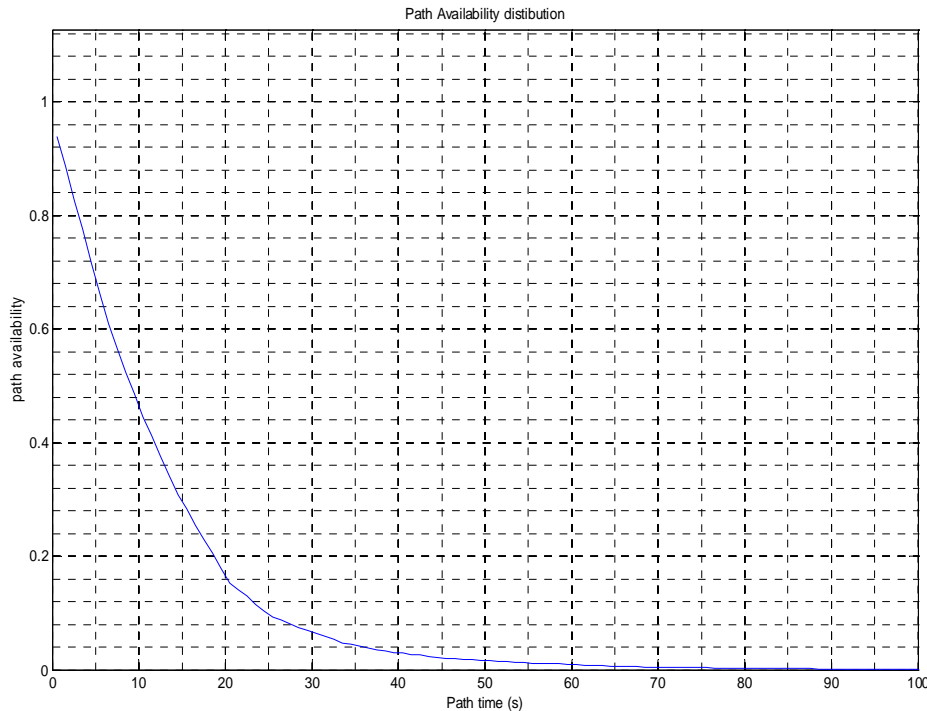
Σχήμα 80: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης



Σχήμα 81: Συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης



Σχήμα 82: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού 2 αλμάτων



Σχήμα 83: Συνάρτηση διαθεσιμότητας μονοπατιού 2 αλμάτων

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στη 21^η προσομοίωση, οι τιμές των παραμέτρων παραμένουν οι ίδιες με τη 17^η, ωστόσο οι κόμβοι κινούνται τώρα σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.

Παρατηρώντας το Σχήμα 80, διαπιστώνουμε πως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης που προκύπτει από την προσομοίωση έχει την ίδια μορφή με την αντίστοιχη συνάρτηση της 17^{ης} προσομοίωσης. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται ανάμεσα στην καμπύλη προσομοίωσης και τη θεωρητική καμπύλη οφείλονται στους εξής λόγους:

- Στο θεωρητικό τύπο που χρησιμοποιήσαμε για τον υπολογισμό της θεωρητικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης κάναμε την παραδοχή πως οι κόμβοι συνεχίζουν, μετά την εγκατάσταση της ζεύξης ανάμεσά τους, να κινούνται σε μια ευθεία γραμμή χωρίς να μεταβάλλεται η κατεύθυνση κίνησής τους κατά τη διάρκεια της ζεύξης, γεγονός που δεν ισχύει στην περίπτωση της προσομοίωσης μας.
- Για τον υπολογισμό της θεωρητικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, θεωρήσαμε επίσης μια περιοχή προσομοίωσης χωρίς όρια (άπειρη). Ωστόσο, στην προσομοίωση μας η περιοχή προσομοίωσης είναι τετράγωνη με όρια $[0, 1500] \times [0, 1500]$, με αποτέλεσμα οι κόμβοι να ανακλούνται στο σύνορο της περιοχής και να αλλάζουν κατεύθυνση κατά τη διάρκεια της ζεύξης.

Τα ίδια συμπεράσματα με αυτά για τη 17^η προσομοίωση ισχύουν και για τη συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης (Σχήμα 81), η οποία εξαρτάται άμεσα από τη συνάρτηση πυκνότητας της διάρκειας ζεύξης. Παρατηρείται και πάλι ομοιότητα ως προς τη μορφή σε σχέση με την αντίστοιχη καμπύλη για το μοντέλο Τυχαίων Στάσεων.

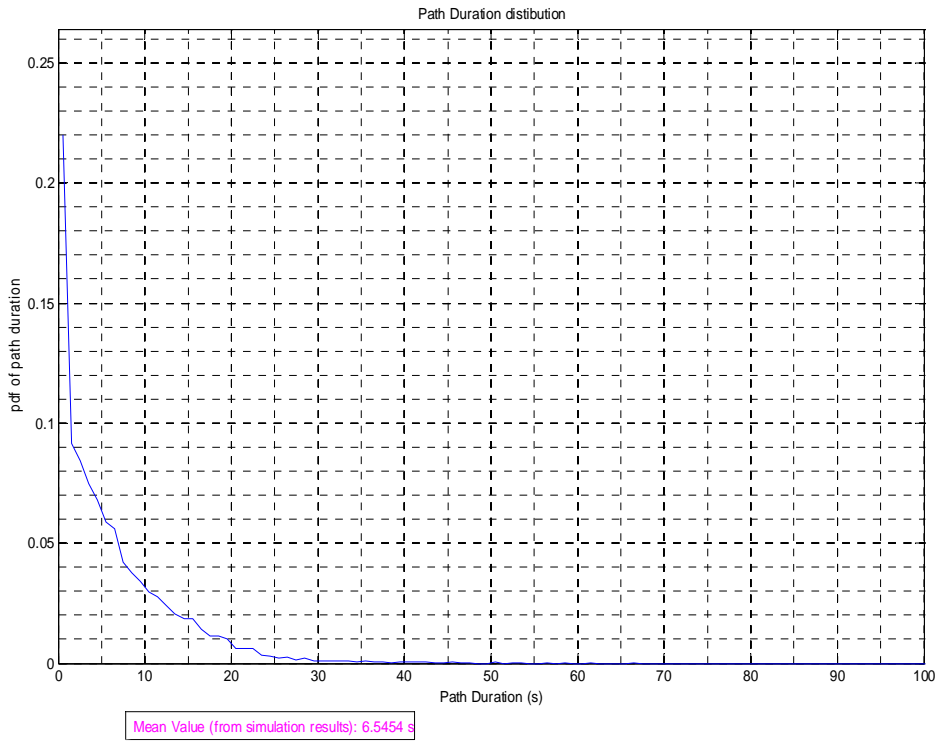
Όσον αφορά τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού του Σχήματος 82, παρατηρούμε ξανά μεγάλη ομοιότητα με τη συνάρτηση που απεικονίζεται στο Σχήμα 68 της 17^{ης} προσομοίωσης. Επίσης, διαπιστώνουμε πως η μέση διάρκεια ενός μονοπατιού δύο αλμάτων στην 21^η προσομοίωση είναι λίγο μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της 17^{ης} προσομοίωσης.

Τέλος, στο Σχήμα 75, διαπιστώνουμε πως η συνάρτηση διαθεσιμότητας που προκύπτει από την 21^η προσομοίωση σχεδόν ταυτίζεται με αυτήν της 17^{ης} προσομοίωσης.

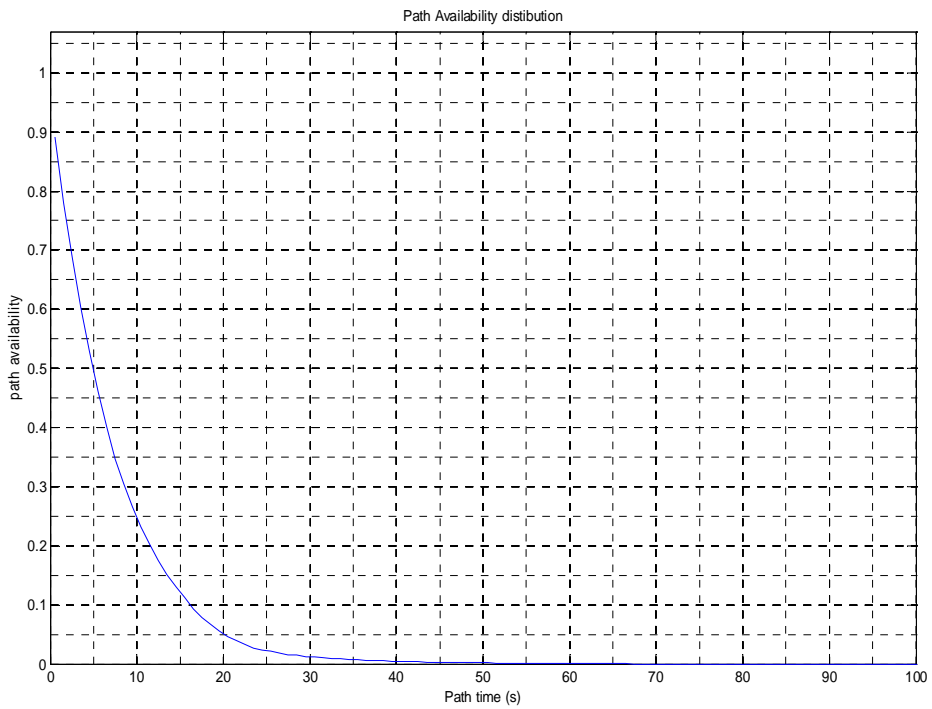
22^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_adhoc_path3

Πίνακας 22: Παράμετροι 22^{ης} προσομοίωσης

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[20, 20] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	25
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	150 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1 s
Ακτίνα μετάδοσης (maxLinkDist)	400 m



Σχήμα 84: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού 3 αλμάτων



Σχήμα 85: Συνάρτηση της διαθεσιμότητας μονοπατιού 3 αλμάτων

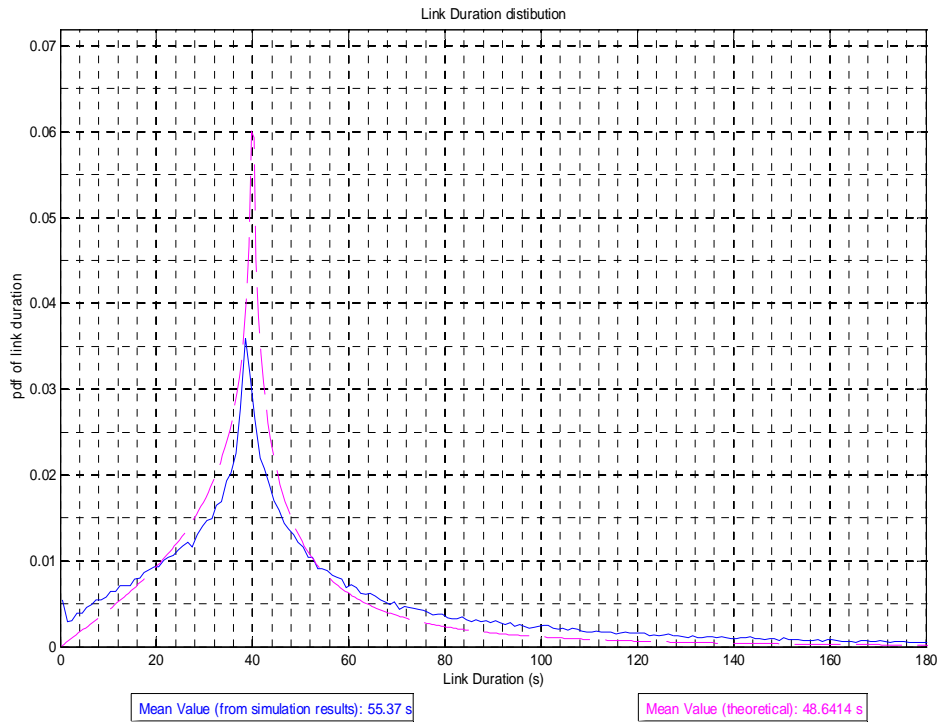
Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην 22^η προσομοίωση, ισχύουν τα ίδια με την 18^η προσομοίωση με τη διαφορά πως οι κόμβοι στην προσομοίωση αυτή κινούνται σύμφωνα με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης. Επειδή, οι παράμετροι των προσομοιώσεων 21 και 22 έχουν τις ίδιες τιμές, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης και η συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης της 22^{ης} προσομοίωσης θα είναι οι ίδιες με προηγουμένως και επομένως παραλείπονται.

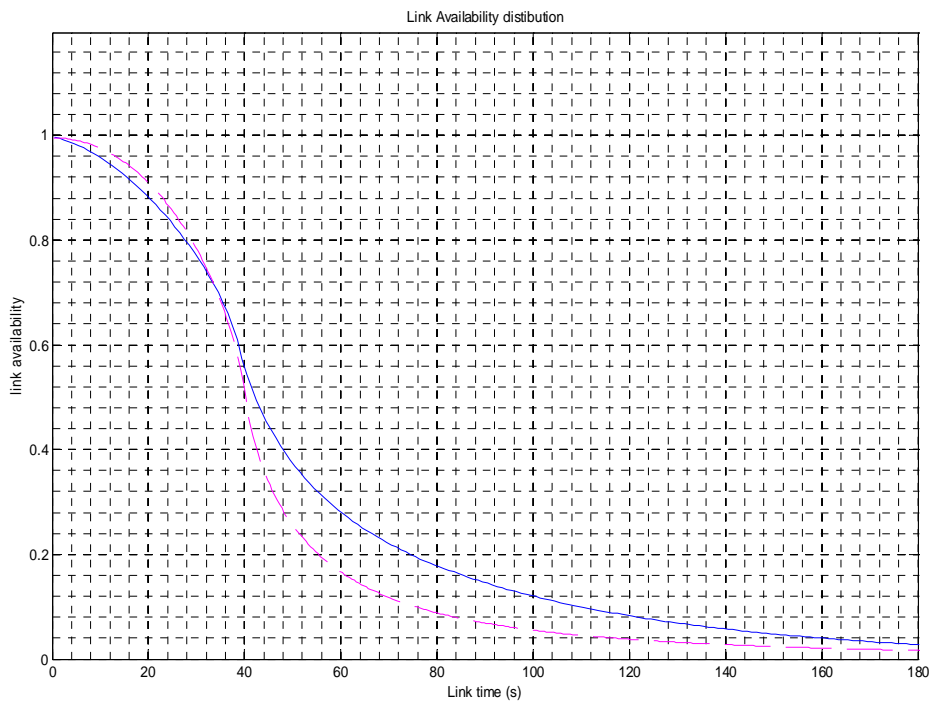
Στο Σχήματα 84 και 85, όπου παρουσιάζονται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας και της διαθεσιμότητας μονοπατιού τριών αλμάτων, παρατηρούμε μια εξομάλυνση των συναρτήσεων σε σχέση με πριν που οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και στη 18^η προσομοίωση, στα περισσότερα δείγματα που λήφθηκαν (περισσότερα μονοπάτια που δημιουργήθηκαν) στην προσομοίωση για τα μονοπάτια τριών αλμάτων σε σχέση με την προσομοίωση για μονοπάτια δύο αλμάτων. Επίσης, τα μονοπάτια τριών αλμάτων έχουν γενικά μικρότερο χρόνο ζωής σε σχέση με τα μονοπάτια δύο αλμάτων (μικρότερο μέση διάρκεια ζωής κατά ποσοστό περίπου 43%).

23^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_adhoc_path3*Πίνακας 23: Παράμετροι 23^{ης} προσομοίωσης*

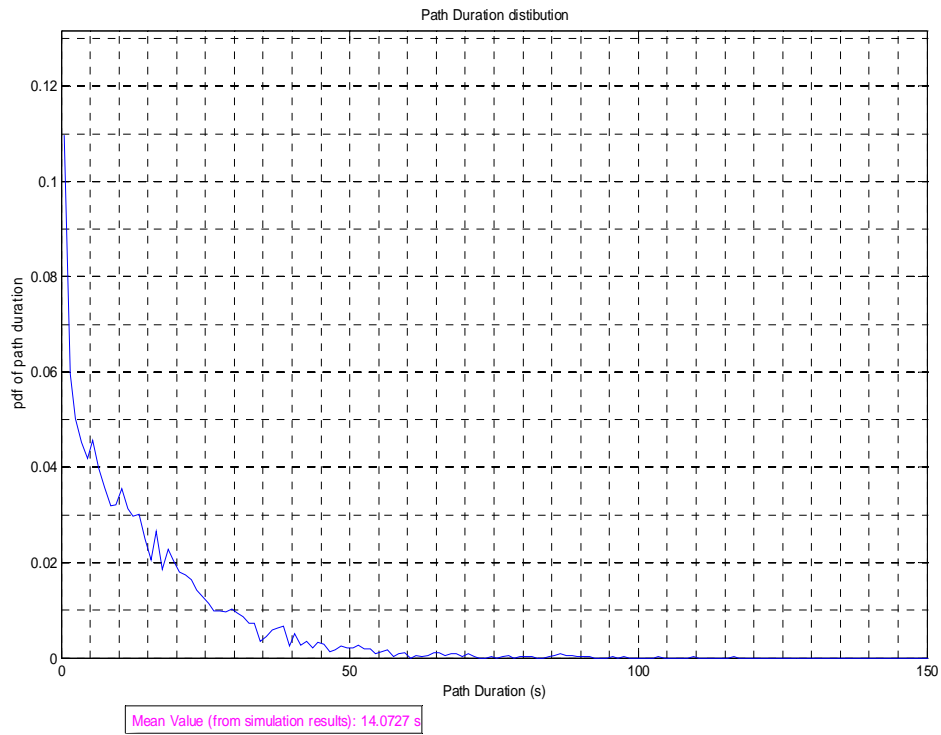
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX] x [minY, maxY]	[0, 1500] x [0, 1500] m ²
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[10, 10] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	25
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	150 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1 s
Ακτίνα μετάδοσης (maxLinkDist)	400 m



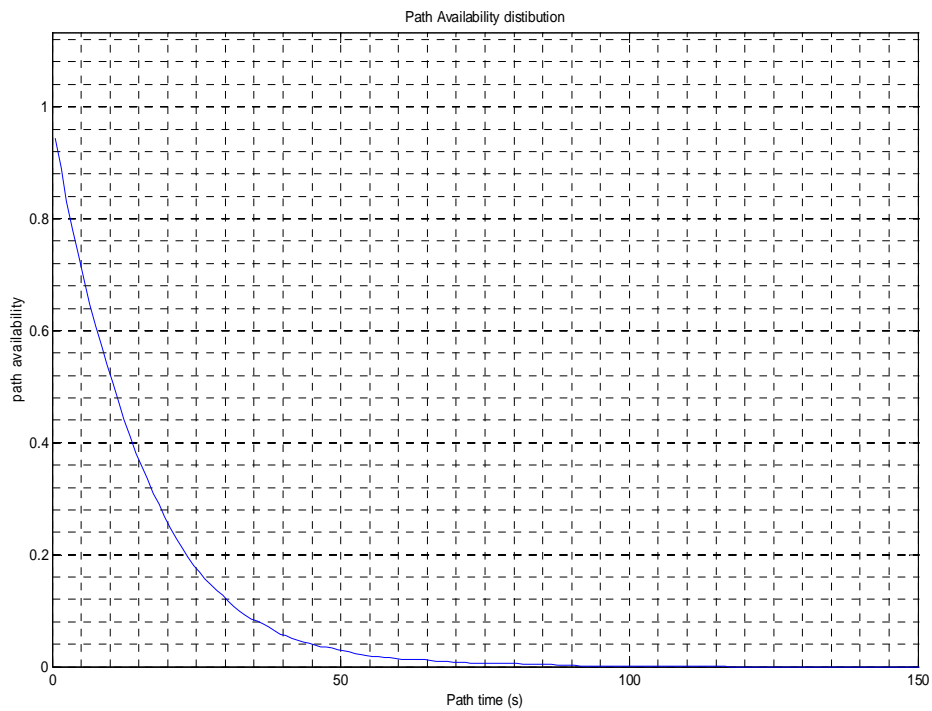
Σχήμα 86: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης



Σχήμα 87: Συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης



Σχήμα 88: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού 3 αλμάτων



Σχήμα 89: Συνάρτηση διαθεσιμότητας μονοπατιού 3 αλμάτων

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην προσομοίωση αυτή, το μόνο που διαφέρει από την 21^η προσομοίωση είναι το μοντέλο κινητικότητας με βάση το οποίο κινούνται οι κόμβοι, αφού τώρα χρησιμοποιείται το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.

Μελετώντας το Σχήμα 86, όπου απεικονίζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, παρατηρούμε πως, σε σύγκριση με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης του Σχήματος 80, όπου οι κόμβοι κινούνται με τη διπλάσια ταχύτητα (20 m/s) από ότι στην προσομοίωση αυτή, έχει μικρότερη μέγιστη τιμή (θεωρητική και προσομοίωσης). Επιπρόσθετα, η μέση διάρκεια ζεύξης είναι σχεδόν διπλάσια από τη μέση διάρκεια ζεύξης στην 21^η προσομοίωση, γεγονός που οφείλεται στη μισή ταχύτητα με την οποία κινούνται οι κόμβοι στην προσομοίωση αυτή, με αποτέλεσμα οι ζεύξεις να διακόπτονται δυσκολότερα, αφού ένας κόμβος παραμένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην εμβέλεια μετάδοσης των υπόλοιπων κόμβων με τους οποίους έχει εγκαταστήσει ζεύξεις. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε μια ελαφρά μετατόπιση της καμπύλης προσομοίωσης έτσι ώστε η θέση του μεγίστου της να είναι πιο κοντά στο θεωρητικό μέγιστο σε σχέση με την αντίστοιχη καμπύλη του Σχήματος 80 για την 21^η προσομοίωση. Τέλος, διαπιστώνουμε πως η μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 86 έχει μεγαλύτερες διακυμάνσεις από τη μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 80. Αυτό οφείλεται στο ότι η διάρκεια μια ζεύξης εξαρτάται από την κίνηση των κόμβων. Επομένως, αφού οι κόμβοι κινούνται πιο αργά στην προσομοίωση αυτή, οι ζεύξεις διαρκούν περισσότερο με αποτέλεσμα στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης να έχουμε μικρότερο πλήθος ζεύξεων στην 23^η προσομοίωση σε σχέση με την 21^η προσομοίωση, άρα και λιγότερη ακρίβεια.

Στο Σχήμα 87, παρατηρούμε πως η καμπύλη διαθεσιμότητας ζεύξης για την προσομοίωση αυτή, έχει παρόμοια μορφή με την αντίστοιχη του Σχήματος 81, επειδή η συνάρτηση αυτή είναι το ολοκλήρωμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, μια πράξη που εξομαλύνει τη μορφή της συνάρτησης διαθεσιμότητας. Ωστόσο, διαπιστώνουμε πως το σημείο καμπής της συνάρτησης συναντάται για διπλάσιο χρόνο ζεύξης (40 s για ταχύτητα 10 m/s έναντι 20 s για ταχύτητα 20 m/s), όπως ήταν αναμενόμενο για το λόγο που εξηγήθηκε πιο πάνω. Τέλος, παρατηρώντας τα Σχήματα 81 και 87, συμπεραίνουμε πως μια ζεύξη είναι πιο πιθανό να είναι διαθέσιμη μετά από ένα συγκεκριμένο χρόνο ζεύξης στην περίπτωση που οι κόμβοι κινούνται με μικρότερη ταχύτητα.

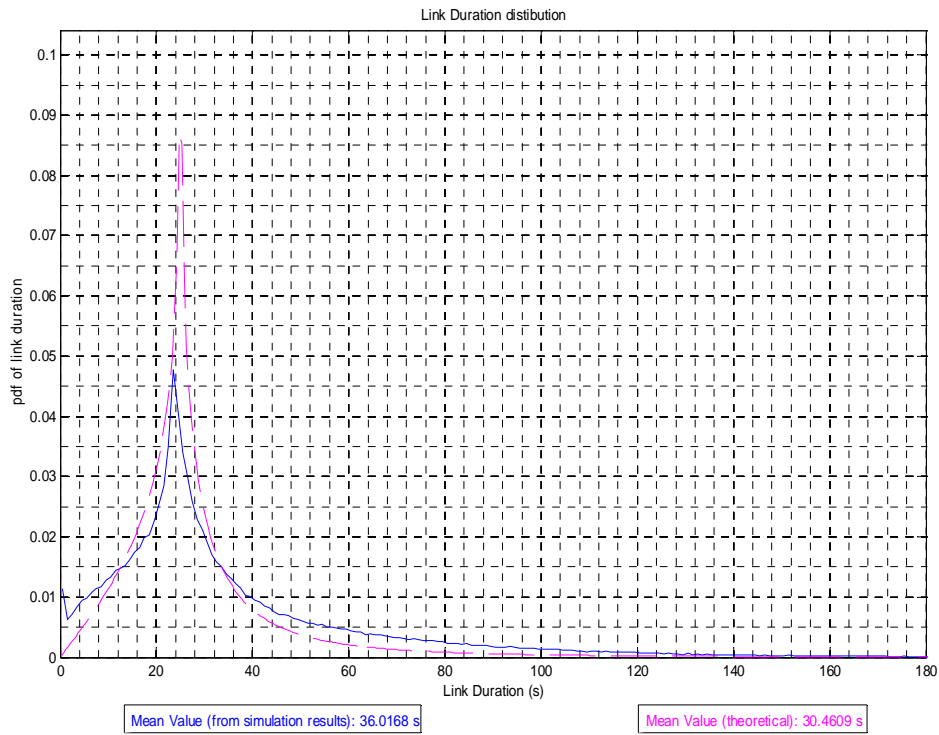
Εξετάζοντας τώρα τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού τριών αλμάτων του Σχήματος 88, παρατηρούμε πως η μέση διάρκεια μονοπατιού όπως προκύπτει από την 23^η προσομοίωση είναι περίπου διπλάσια (κατά 2,15 φορές μεγαλύτερη) από την αντίστοιχη της 22^{ης} προσομοίωσης του Σχήματος 84, γεγονός που συμφωνεί με τα πιο πάνω αποτελέσματα και τον ορισμό της διάρκειας μονοπατιού. Ωστόσο, η μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 84 παρουσιάζει λιγότερες διακυμάνσεις από τη μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 88. Αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, στη μεγαλύτερη μέση διάρκεια ζεύξης, λόγω της μικρότερης ταχύτητας με την οποία κινούνται οι κόμβοι, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη μέση διάρκεια μονοπατιού. Αυτό οδηγεί τελικά σε μικρότερο αριθμό μονοπατιών στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης, δηλαδή σε λιγότερα δείγματα και μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με την 22^η προσομοίωση.

Τέλος, στο Σχήμα 89, όπου απεικονίζεται η συνάρτηση της διαθεσιμότητας μονοπατιού τριών αλμάτων, διαπιστώνουμε και πάλι μια εξομάλυνση της καμπύλης λόγω της πράξης της ολοκλήρωσης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε πως η πιθανότητα ένα μονοπάτι να είναι διαθέσιμο μετά από ένα συγκεκριμένο χρόνο είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση κατά την οποία οι κόμβοι κινούνται με μικρότερη ταχύτητα, όπως μπορεί εύκολα να εξαχθεί από τη σύγκριση των συναρτήσεων στα Σχήματα 89 και 85 για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί.

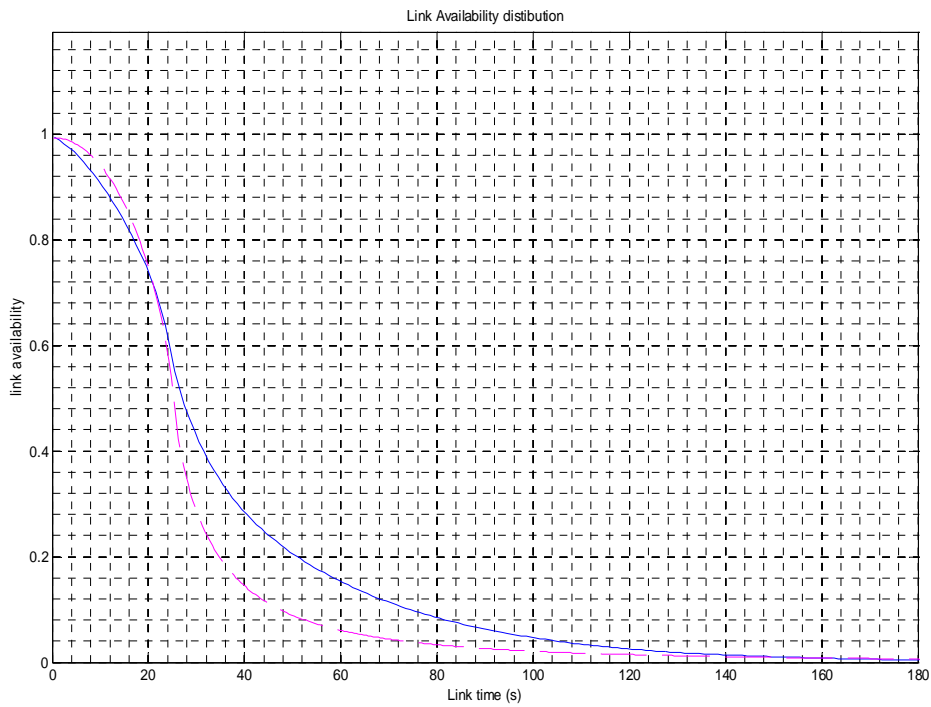
24^η Προσομοίωση: Κώδικας rd_adhoc_path3

Πίνακας 24: Παράμετροι 24^{ης} προσομοίωσης

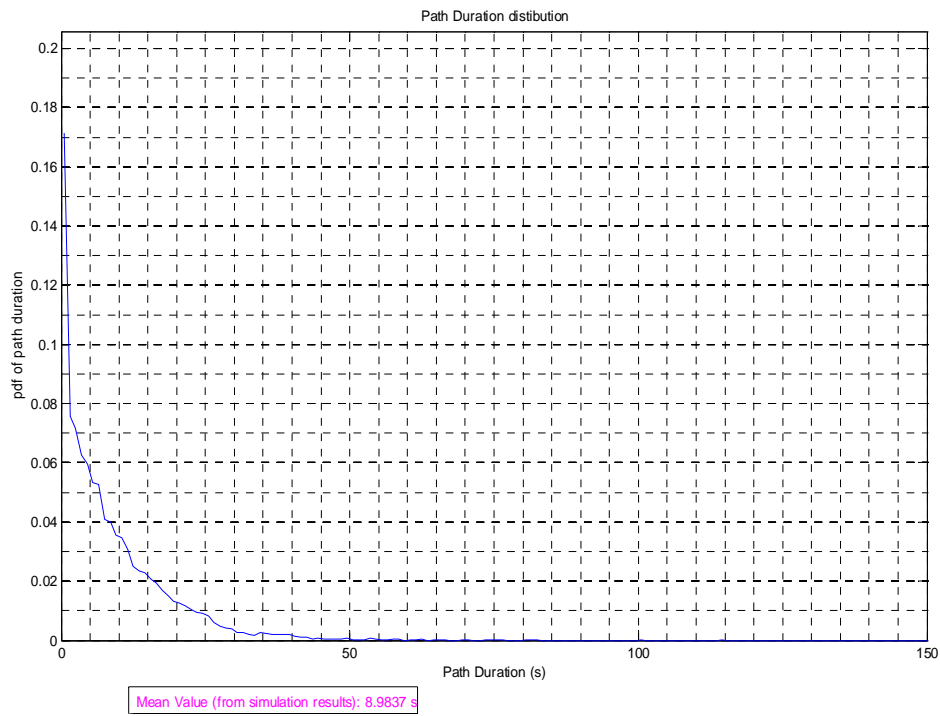
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ
Όρια περιοχής προσομοίωσης [minX, maxX]	[0, 1500] m
Όρια διαστήματος χρόνου παύσης [minPauseTime, maxPauseTime]	[0, 0] s
Όρια διαστήματος ταχύτητας κόμβων [minV, maxV]	[20, 20] m/s
Αριθμός Κόμβων (N)	25
Χρόνος προσομοίωσης (simulationTime)	150 000 s
Βήμα - κβάντο χρόνου (dt)	1 s
Ακτίνα μετάδοσης (maxLinkDist)	500 m



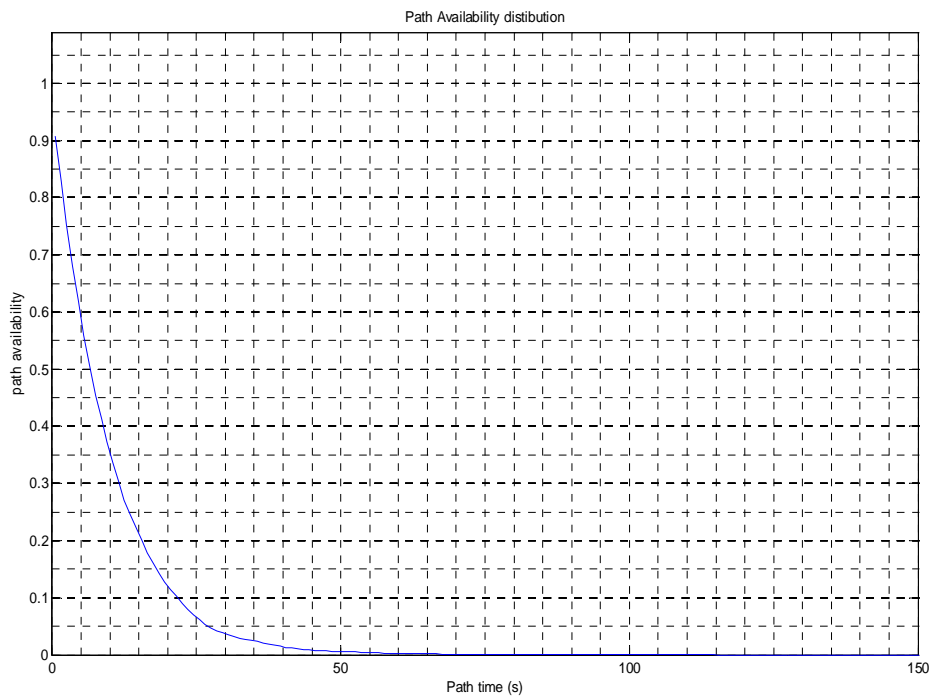
Σχήμα 90: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης



Σχήμα 91: Συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης



Σχήμα 92: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού 3 αλμάτων



Σχήμα 93: Συνάρτηση διαθεσιμότητας μονοπατιού 3 αλμάτων

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Στην 24^η προσομοίωση, αυτό που μεταβάλλεται σε σχέση με την 21^η προσομοίωση είναι η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων, η οποία αυξάνεται από τα 400 m στα 500 m.

Εξετάζοντας προσεκτικά το Σχήμα 90, όπου παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, παρατηρούμε πως, σε σύγκριση με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης του Σχήματος 80, όπου η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων είναι μικρότερη από ότι στην προσομοίωση αυτή, έχει μικρότερη μέγιστη τιμή (θεωρητική και προσομοίωσης). Επιπρόσθετα, η μέση διάρκεια ζεύξης είναι μεγαλύτερη από τη μέση διάρκεια ζεύξης στην 21^η προσομοίωση κατά 8,7837 s (ποσοστό περίπου 32%), γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη ακτίνα μετάδοσης των κόμβων της προσομοίωσης αυτής, που έχει ως αποτέλεσμα ένας κόμβος να βρίσκεται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην εμβέλεια μετάδοσης ενός άλλου και άρα η ζεύξη να παραμένει ενεργή. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε μια ελαφρά μετατόπιση της καμπύλης προσομοίωσης έτσι ώστε η θέση του μεγίστου της να είναι πιο κοντά στο θεωρητικό μέγιστο σε σχέση με την αντίστοιχη καμπύλη του Σχήματος 80 για την 21^η προσομοίωση. Τέλος, κάποιες μικρές διακυμάνσεις στη μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 90 σε σχέση με τη μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 80 οφείλονται, όπως και πριν, στο ότι οι ζεύξεις διαρκούν περισσότερο με αποτέλεσμα στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης να έχουμε μικρότερο πλήθος ζεύξεων στην προσομοίωση αυτή σε σχέση με την 21^η προσομοίωση, άρα μικρότερο πλήθος δειγμάτων και μικρότερη ακρίβεια.

Στο Σχήμα 91, παρατηρούμε πως η συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης για την προσομοίωση αυτή, έχει μια πιο ομαλή μορφή από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, επειδή η πρώτη είναι το ολοκλήρωμα της δεύτερης. Εντούτοις, διαπιστώνουμε και πάλι πως το σημείο καμψής της συνάρτησης είναι μετατοπισμένο προς τα δεξιά (περίπου για χρόνο ζεύξης 25 s) σε σχέση με την περίπτωση ακτίνας μετάδοσης ίση με 400 m, για το λόγο που εξηγήθηκε πιο πάνω. Επίσης, από τα Σχήματα 81 και 91 παρατηρούμε, όπως και πριν, πως η διαθεσιμότητα ζεύξης έχει μεγαλύτερη τιμή για ένα συγκεκριμένο χρόνο ζεύξης, όταν οι κόμβοι έχουν μεγαλύτερη ακτίνα μετάδοσης.

Μελετώντας τώρα τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού τριών αλμάτων του Σχήματος 92, παρατηρούμε πως η μέση διάρκεια μονοπατιού όπως προκύπτει από την 24^η προσομοίωση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της 22^{ης} προσομοίωσης (Σχήμα 84) κατά 2.4383 s (ποσοστό περίπου 37%), όπως αναμενόταν αφού η διάρκεια μονοπατιού εξαρτάται άμεσα από τη διάρκεια της ζεύξης. Ωστόσο, η μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 92 παρουσιάζει κάποιες ελαφρώς μεγαλύτερες διακυμάνσεις από τη μορφή της συνάρτησης του Σχήματος 84, που οφείλονται, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, στη μεγαλύτερη μέση διάρκεια ζεύξης, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη μέση διάρκεια μονοπατιού που καταλήγει σε μικρότερο αριθμό μονοπατιών στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης, άρα μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με την 22^η προσομοίωση.

Τέλος, στο Σχήμα 93, όπου απεικονίζεται η συνάρτηση της διαθεσιμότητας μονοπατιού τριών αλμάτων, διαπιστώνουμε και πάλι μια εξομάλυνση της καμπύλης λόγω της πράξης της ολοκλήρωσης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας μονοπατιού. Επίσης, διαπιστώνουμε πως η πιθανότητα ένα μονοπάτι να είναι διαθέσιμο μετά από ένα συγκεκριμένο χρόνο είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση κατά την

οποία η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων είναι 500 m, όπως μπορεί εύκολα να εξαχθεί από τη σύγκριση των συναρτήσεων στα Σχήματα 93 και 85 για τους λόγους που έχουν εξηγηθεί πιο πάνω.

4.5. Σύνοψη συμπερασμάτων από τις προσομοιώσεις

Στην παράγραφο αυτή, επιχειρούμε να παρουσιάσουμε συγκεντρωτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις προηγούμενες προσομοιώσεις.

4.5.1. Προσομοιώσεις Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων χωρίς δικτυακή υποδομή

- Η χωρική κατανομή των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά έχει μέγιστη τιμή στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης και φθίνει καθώς πλησιάζουμε προς τα σύνορα της περιοχής. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων οι κόμβοι τείνουν να συσσωρευτούν στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης. Η ιδιότητα αυτή του συγκεκριμένου μοντέλου δεν είναι επιθυμητή και γίνεται εντονότερη όσο μεγαλώνει το μέσο πλήθος των κόμβων που βρίσκονται σε κίνηση προς το μέσο πλήθος των κόμβων που κάνουν παύση σε κάποιο σημείο στάσης. Δηλαδή, η χωρική κατανομή των κόμβων γίνεται πιο απότομη όσο μεγαλώνει ο χρόνος μιας μετάβασης μεταξύ δύο σημείων στάσης (π.χ. με μείωση της ταχύτητας των κόμβων) και όσο μικραίνει ο χρόνος παύσης στα σημεία στάσης. Στην περίπτωση μηδενικού χρόνου παύσης στα σημεία στάσης, η χωρική κατανομή των κόμβων τείνει να μηδενιστεί στα σύνορα της περιοχής.
- Όσον αφορά τη σύγκριση με τη θεωρητική χωρική κατανομή των κόμβων, παρατηρούμε κάποιες μικρές αποκλίσεις ως προς την τιμή του μεγίστου και κάποια μικρή διαφορά στη μορφή. Ωστόσο, η θεωρητική κατανομή είναι προσεγγιστική και έτσι είναι πιο αξιόπιστη η κατανομή που προκύπτει από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.
- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά έχει τιμή αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας. Αυτό σημαίνει πως σε κάθε τυχαία χρονική στιγμή, είναι περισσότεροι οι κόμβοι που κινούνται με χαμηλές παρά με ψηλές ταχύτητες.
- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά αρχικά αυξάνεται μέχρι ενός μεγίστου και στη συνέχεια φθίνει μέχρι να μηδενιστεί. Δηλαδή, έχουμε μεγαλύτερες πιθανότητες για μεταβάσεις μεσαίου μήκους παρά μικρού ή μεγάλου μήκους. Οι τιμές της συνάρτησης πυκνότητας του μήκους μετάβασης εξαρτώνται προφανώς από το μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης. Όσο μεγαλώνει η περιοχή προσομοίωσης, τόσο διαπλατύνεται το πεδίο ορισμού της – δηλαδή τα πιθανά μήκη μετάβασης.

- Αντίστοιχη συμπεριφορά με το μήκος μετάβασης έχει και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μορφή της συγκεκριμένης συνάρτησης εξαρτάται τόσο από την κατανομή του μήκους μετάβασης, όσο και από την κατανομή από την οποία οι κόμβοι επιλέγουν τις ταχύτητές τους στα σημεία στάσης, που στις προσομοιώσεις ήταν η ομοιόμορφη κατανομή. Εξαιτίας του δεύτερου γεγονότος, η μορφή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης εξαρτάται κυρίως από τη μορφή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης. Το πεδίο ορισμού της συνάρτησης, δηλαδή οι πιθανοί χρόνοι μετάβασης, επεκτείνεται είτε με μείωση της ταχύτητας των κόμβων είτε με αύξηση του μήκους μετάβασης (που προκύπτει από αύξηση του μεγέθους της περιοχής προσομοίωσης). Ο μέσος χρόνος μετάβασης είναι πολύ χρήσιμο μέγεθος διότι αντιπαραβάλλοντάς τον με τον μέσο χρόνο παύσης μπορούμε να βρούμε το μέσο ποσοστό των κόμβων που κινούνται και το μέσο ποσοστό των κόμβων που βρίσκονται σε παύση.

- Οι καμπύλες που προέκυψαν από την προσομοίωση συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις θεωρητικές καμπύλες. Οι αποκλίσεις μεταξύ τους μειώνονται όταν αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν στην προσομοίωση, διότι έχουμε αντίστοιχη αύξηση του πλήθους των δειγμάτων για κάθε μέγεθος που δειγματοληπτείται (στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης). Αντίστοιχη συμπεριφορά αναμένεται όταν αυξηθεί ο χρόνος προσομοίωσης και το πλήθος των κόμβων διατηρηθεί σταθερό. Επίσης, η ακρίβεια της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας αυξάνεται είτε με μείωση του εύρους τιμών της, είτε με αύξηση του ποσοστού των κόμβων που κινούνται σε σχέση με το ποσοστό των κόμβων που είναι σε παύση. Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας του μήκους και του χρόνου μετάβασης γίνονται πιο ακριβείς όταν έχουμε περισσότερες μεταβάσεις στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης, κάτι που μεταφράζεται σε ταχέως κινούμενους κόμβους με μικρούς χρόνους παύσης στα σημεία στάσης.

4.5.2. Προσομοιώσεις Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης χωρίς δικτυακή υποδομή

- Η χωρική κατανομή των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση είναι σχεδόν ομοιόμορφη. Παρουσιάζει, όμως, μια μειωμένη τιμή κοντά στα σύνορα της περιοχής προσομοίωσης, καθώς και κάποιες μικρές «κυματώσεις» στην υπόλοιπη περιοχή. Το γεγονός ότι οι κόμβοι στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης κατανέμονται σχεδόν ομοιόμορφα σε ολόκληρη την περιοχή προσομοίωσης αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου έναντι του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Η χωρική κατανομή των κόμβων πλησιάζει ακόμα περισσότερο στην ομοιόμορφη (με εξαίρεση την περιοχή κοντά στα σύνορα) όταν το μέσο ποσοστό των κόμβων που κάνουν παύση σε μια τυχαία χρονική στιγμή αυξάνεται (δηλαδή μειώνεται το ποσοστό των κόμβων που βρίσκονται σε κίνηση).

- Όπως και στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, έτσι και στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση δεν είναι ομοιόμορφη αλλά η τιμή της είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας.

- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του μήκους μετάβασης είναι ομοιόμορφη, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, διότι στο μοντέλο αυτό οι κόμβοι επιλέγουν απευθείας το μήκος για κάθε μετάβασή τους από μια ομοιόμορφη κατανομή. Όποιες μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τη θεωρητική καμπύλη οφείλονται στον περιορισμένο χρόνο προσομοίωσης και μόνο.
- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου μετάβασης έχει σταθερή τιμή μέχρι ενός σημείου και μετά φθίνει μέχρι να μηδενιστεί. Η κατανομή αυτή δικαιολογείται πλήρως και συμφωνεί με τα θεωρητικά αποτελέσματα, δεδομένου ότι ο χρόνος μετάβασης είναι μια τυχαία μεταβλητή που ορίζεται ως το πηλίκο δύο ομοιόμορφα κατανομημένων τυχαίων μεταβλητών: του μήκους μετάβασης και της ταχύτητας που επιλέγει ο κόμβος σε κάθε μετάβασή του. Επίσης για τις ίδιες παραμέτρους (μέγεθος περιοχής προσομοίωσης και όρια ταχύτητας των κόμβων), οι μεταβάσεις κατά μέσο όρο διαρκούν περισσότερο στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε σχέση με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων.
- Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα αντίστοιχα θεωρητικά. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης αυξάνεται με τους ίδιους τρόπους που αναφέρθηκαν και για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.

4.5.3. Προσομοιώσεις Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε κυψελωτά συστήματα

- Οι κυψέλες σε ένα σύστημα 3 x 3 ή σε ένα σύστημα 5 x 5 μπορούν να χωριστούν σε ομάδες ανάλογα με τη θέση τους, όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα:

7(A)	8(B)	9(A)
4(B)	5(C)	6(B)
1(A)	2(B)	3(A)

(α)

21(A)	22(B)	23(C)	24(B)	25(A)
16(B)	17(D)	18(E)	19(D)	20(B)
11(C)	12(E)	13(F)	14(E)	15(C)
6(B)	7(D)	8(E)	9(D)	10(B)
1(A)	2(B)	3(C)	4(B)	5(A)

(β)

Σχήμα 94: Ομαδοποίηση συμμετρικών κυψελών σε (α) 3 x 3 και (β) 5 x 5 σύστημα. Το γράμμα στην παρένθεση δίπλα από τον αύξοντα αριθμό της κυψέλης δηλώνει την ομάδα στην οποία ανήκει

- Κυψέλες που ανήκουν στην ίδια ομάδα έχουν (σχεδόν) τα ίδια χαρακτηριστικά, δηλαδή (ιδανικά) ίδιο μέσο χρόνο παραμονής ενός κόμβου, ίδιους ρυθμούς εισόδου/εξόδου και ίδια κατανομή του χρόνου παραμονής ενός κόμβου. Τυχόν αποκλίσεις κάποιων μεγεθών που αφορούν κυψέλες της ίδιας ομάδας οφείλονται στην πεπερασμένη ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο σύστημα 5×5 , οι εννιά εσωτερικές κυψέλες (7, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18, 19), αν και ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες, για κάποια χαρακτηριστικά παρουσιάζουν περίπου την ίδια συμπεριφορά, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι βρίσκονται στο εσωτερικό της περιοχής προσομοίωσης και κάθε μία από αυτές «βλέπει» γύρω της οκτώ κυψέλες και συνεπώς είναι περίπου ισοδύναμες.
- Ο μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε μια γωνιακή κυψέλη είναι μεγαλύτερος από αυτόν για τις υπόλοιπες κυψέλες. Επίσης, διαφορετικός είναι ο μέσος χρόνος παραμονής για τις υπόλοιπες συνοριακές (μη γωνιακές) κυψέλες και διαφορετικός για την (τις) κεντρική (κεντρικές) κυψέλες. Μελετώντας ένα κυψελωτό δίκτυο 5×5 κυψελών και παρατηρώντας τους μέσους χρόνους παραμονής για τις εννιά εσωτερικές κυψέλες, παρατηρούμε ότι αυτοί είναι περίπου ίσοι. Με αυτό τον τρόπο, καταφέραμε να εξαλείψουμε (σχεδόν) τα φαινόμενα άκρων (border effects) που οφείλονται στην ύπαρξη του συνόρου (πεπερασμένη περιοχή προσομοίωσης). Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι με την μείωση της ταχύτητας των κόμβων αυξάνεται και ο μέσος χρόνος παραμονής τους εντός κάθε κυψέλης.
- Στη μόνιμη κατάσταση, δηλαδή για αποτελέσματα που προκύπτουν από προσομοιώσεις μεγάλης διάρκειας, ο ρυθμός εισόδου (κόμβοι/sec) σε κάθε κυψέλη είναι ίσος με το ρυθμό εξόδου. Αυτό οφείλεται στο ότι στη μόνιμη κατάσταση, η χωρική κατανομή των κόμβων παραμένει σταθερή (στάσιμη), οπότε δεν υπάρχει συσσώρευση ή αραιώση κόμβων σε μια συγκεκριμένη κυψέλη που θα προέκυπτε από διαφορετικούς ρυθμούς εισόδου και εξόδου. Επίσης, μεγαλύτερους ρυθμούς εισόδου/εξόδου παρουσιάζουν οι εσωτερικές κυψέλες και ακολουθούν οι συνοριακές – μη γωνιακές και οι γωνιακές κυψέλες. Αυτό, όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, οφείλεται στο γεγονός ότι οι εσωτερικές κυψέλες έχουν τέσσερις πλευρές από τις οποίες μπορούν να διέλθουν οι κινητοί κόμβοι, ενώ οι συνοριακές – μη γωνιακές τρεις και οι γωνιακές δύο. Στο 5×5 σύστημα, οι εννιά εσωτερικές κυψέλες έχουν σαφώς μεγαλύτερους ρυθμούς εισόδου/εξόδου από τις υπόλοιπες, όμως, στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων παρουσιάζουν κάποιες διαφορές μεταξύ τους, ανάλογα με την ομάδα στην οποία ανήκουν (βλέπε Σχήμα 94(β)), ενώ στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημους ρυθμούς εισόδου/εξόδου. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, η χωρική κατανομή των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση δεν είναι ομοιόμορφη, σε αντίθεση με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, όπου η χωρική κατανομή των κόμβων είναι σχεδόν ομοιόμορφη. Έτσι, στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, η θέση (ομάδα) μιας εσωτερικής κυψέλης επηρεάζει το ρυθμό εισόδου/εξόδου κόμβων σε αυτήν. Επίσης, και στα δύο μοντέλα, οι ρυθμοί αλλαγής κυψέλης μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας των κόμβων.

- Ο μέσος ρυθμός αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο είναι ένα μέγεθος που μας δίνει μια γενική εικόνα καθώς αφορά το ρυθμό μεταπομπών που «βλέπει» ο μέσος κόμβος. Όπως είναι φυσικό, ο ρυθμός αυτός μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας των κόμβων. Όμως, με την ίδια ταχύτητα κόμβων και μέγεθος κυψέλης, αλλά διαφορετικό πλήθος κυψελών (3 x 3 και 5 x 5), ο μέσος ρυθμός αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο είναι διαφορετικός. Συγκεκριμένα, αυξάνεται με την αύξηση του πλήθους των κυψελών. Αυτό, όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 3, οφείλεται στο πεπερασμένο μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης και τα φαινόμενα συνόρου, των οποίων η επίδραση γίνεται μικρότερη όσο αυξάνεται το μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης (δηλαδή το πλήθος των ισομεγεθών κυψελών). Έτσι, αν συνεχίζαμε να αυξάνουμε το πλήθος των κυψελών του συστήματος, θα παρατηρούσαμε ότι ο μέσος ρυθμός αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο τελικά θα συνέκλινε προς μια τιμή. Συνεπώς, για μεγάλο πλήθος κυψελών, ο μέσος ρυθμός αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο θα εξαρτάται μόνο από το μέγεθος της κυψέλης και την ταχύτητα των κόμβων. Επίσης, έχουμε να παρατηρήσουμε ότι ο μέσος ρυθμός αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο, όπως προκύπτει από τις προσομοιώσεις, αποκλίνει ελάχιστα από τον αντίστοιχο θεωρητικό.

- Όσον αφορά τις κατανομές του χρόνου παραμονής σε κάθε κυψέλη, έχουμε να παρατηρήσουμε ότι αυτές έχουν διαφορετική μορφή για τις γωνιακές, τις συνοριακές – μη γωνιακές και τις εσωτερικές κυψέλες. Συγκεκριμένα, για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, οι γωνιακές κυψέλες παρουσιάζουν απόλυτο μέγιστο για μηδενικό χρόνο παραμονής και στη συνέχεια φθίνουν, οι συνοριακές – μη γωνιακές παρουσιάζουν δύο μέγιστα, ένα για μηδενικό και ένα για μη μηδενικό χρόνο παραμονής, ενώ οι εσωτερικές παρουσιάζουν αρχικά μια αύξηση που οδηγεί σε ένα μέγιστο και στη συνέχεια μια πτώση. Παρατηρώντας τις εννιά εσωτερικές κυψέλες του συστήματος 5 x 5, συνειδητοποιούμε ότι η μορφή των συναρτήσεων κατανομής του χρόνου παραμονής είναι παρόμοια. Για το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, οι κατανομές των χρόνων παραμονής παρουσιάζουν λίγο διαφορετική μορφή, κάτι που εξηγείται από τις διαφορές στη συμπεριφορά των δύο μοντέλων (ανακλάσεις ή όχι στο σύνορο) καθώς και από τη διαφορετική χωρική κατανομή των κόμβων στη μόνιμη κατάσταση.

- Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά των κόμβων στα δύο μοντέλα κινητικότητας, έχουμε να παρατηρήσουμε ότι για τις ίδιες παραμέτρους κίνησης των κόμβων και μεγεθών των κυψελών και της περιοχής προσομοίωσης, στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, ο μέσος χρόνος παραμονής ενός κόμβου σε μια κυψέλη είναι μικρότερος και ο ρυθμός αλλαγών κυψέλης ανά κόμβο μεγαλύτερος σε σχέση με το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης. Αυτό οφείλεται στο μικρότερο χρόνο μετάβασης που συναντάται στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, που οδηγεί σε μεγαλύτερο πλήθος αλλαγών κυψέλης ανά μετάβαση.

4.5.4. Προσομοιώσεις Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης σε αδόμητα δίκτυα

- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, αν και παρουσιάζει γενικά την ίδια μορφή με την αντίστοιχη θεωρητική, εντούτοις εμφανίζει κάποιες αποκλίσεις, ιδιαίτερα στην περιοχή του μεγίστου. Αυτό οφείλεται στο ότι η θεωρητική

καμπύλη εξήχθηκε λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες παραδοχές. Η πρώτη παραδοχή θεωρεί ότι κατά τη διάρκεια σύνδεσής τους, δύο κόμβοι δεν αλλάζουν κατεύθυνση – κάτι που στην πραγματικότητα δεν ισχύει, καθώς ενδέχεται κάποιος από τους δύο (ή και οι δύο) να ολοκληρώσει μια μετάβαση και να αλλάξει κατεύθυνση. Επίσης, στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης, μπορεί να προκύψει αλλαγή κατεύθυνσης και όταν ένας κόμβος κτυπήσει στο σύνορο και ανακλαστεί. Η δεύτερη παραδοχή θεωρεί ότι η κατεύθυνση κίνησης ενός κόμβου είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη τυχαία μεταβλητή, κάτι που δεν ισχύει στην περίπτωση του Μοντέλου Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων.

- Κοιτάζοντας προσεκτικά τη μορφή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης, παρατηρούμε ότι αρχικά ξεκινά από μια χαμηλή τιμή (για σχεδόν μηδενική διάρκεια ζεύξης), στη συνέχεια αυξάνεται, φτάνοντας σε ένα απότομο μέγιστο (όπου υπάρχει ασυνέχεια της παραγωγού) και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τη μέση διάρκεια ζεύξης στα δύο μοντέλα κινητικότητας, παρατηρούμε ότι είναι περίπου τα ίδια για αντίστοιχες παραμέτρους.
- Η μέση διάρκεια ζεύξης αυξάνεται είτε με μείωση της ταχύτητας των κόμβων, είτε με αύξηση της εμβέλειάς τους. Συγκεκριμένα, με μείωση της ταχύτητας των κόμβων στη μισή, αυξάνεται περίπου στο διπλάσιο η μέση διάρκεια ζεύξης. Επίσης, αυξάνοντας την εμβέλεια (ακτίνα μετάδοσης) κάθε κόμβου κατά 25%, παρατηρείται μια αύξηση στη μέση διάρκεια ζεύξης κατά περίπου 37% στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και κατά περίπου 32% στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.
- Η συνάρτηση διαθεσιμότητας ζεύξης εξαρτάται άμεσα από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διάρκειας ζεύξης και συνεπώς, οποιεσδήποτε αποκλίσεις μεταξύ καμπυλών που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις και θεωρητικών καμπυλών οφείλονται στους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Σαν γενική παρατήρηση μπορούμε να πούμε ότι η θεωρητική καμπύλη είναι πιο «απαισιόδοξη» για τη διαθεσιμότητα ζεύξεων σε μεγάλους χρόνους. Αυτό ίσως εξηγείται από το γεγονός ότι οι αλλαγές κατεύθυνσης που παρατηρούνται στην προσομοίωση κατά τη διάρκεια της σύνδεσης δύο κόμβων συμβάλλουν στο να μείνουν οι κόμβοι περισσότερο χρόνο ο ένας στην εμβέλεια του άλλου.
- Η κατανομή της διάρκειας ενός μονοπατιού παρουσιάζει μια απότομα φθίνουσα μορφή. Συγκεκριμένα, έχουμε μέγιστη τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για μηδενική διάρκεια μονοπατιού και στη συνέχεια η τιμή της συνάρτησης φθίνει απότομα μέχρι να μηδενιστεί. Για μονοπάτια τριών αλμάτων, έχουμε μέση διάρκεια μονοπατιού μικρότερη κατά περίπου 40% σε σχέση με τη μέση διάρκεια μονοπατιού δύο αλμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι, μεταξύ δύο συγκεκριμένων κόμβων, δημιουργούνται αλλά και διακόπτονται πιο εύκολα μονοπάτια τριών αλμάτων σε σχέση με μονοπάτια δύο αλμάτων. Αυτό σημαίνει πως στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης θα έχουμε περισσότερα δείγματα για τα μονοπάτια τριών αλμάτων σε σχέση με τα μονοπάτια δύο αλμάτων και συνεπώς ακριβέστερα (με μικρότερες διακυμάνσεις) αποτελέσματα.

- Η μέση διάρκεια ενός μονοπατιού αυξάνεται είτε με τη μείωση της ταχύτητας των κόμβων είτε με την αύξηση της εμβέλειάς τους. Συγκεκριμένα, για τα μονοπάτια τριών αλμάτων που μελετήθηκαν, η μείωση της ταχύτητας των κόμβων στη μισή τιμή της οδηγεί περίπου σε διπλασιασμό της μέσης διάρκειας ενός μονοπατιού. Επίσης, αύξηση της εμβέλειας των κόμβων κατά 25%, οδηγεί σε αύξηση της μέσης διάρκειας μονοπατιού κατά περίπου 50% στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων και κατά περίπου 37% στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης.

4.6. Μελλοντική εργασία – προοπτικές

Όπως είδαμε στα προηγούμενα, έγινε μια προσπάθεια υλοποίησης προσομοιώσεων δύο συγκεκριμένων μοντέλων κινητικότητας, τόσο σε ένα στοιχειώδες κυψελωτό, όσο και σε ένα αδόμητο δίκτυο. Κάποιες επεκτάσεις που θα μπορούσαν να γίνουν, βασισμένες στις υλοποιήσεις που παρουσιάστηκαν, είναι οι εξής:

- Υλοποίηση νέων μοντέλων κινητικότητας εκτός των Μοντέλων Κινητικότητας Τυχαίας Κατεύθυνσης και Τυχαίων Στάσεων, που εξομοιώνουν πιο ρεαλιστικά τις κινήσεις των χρηστών. Τέτοια μοντέλα έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 1, και περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων, γεωγραφικούς περιορισμούς, κίνηση σε δρόμους με βάση κάποιο χάρτη, ύπαρξη εμποδίων, χρονική συσχέτιση μεταξύ των θέσεων και των ταχυτήτων των κόμβων, ενσωμάτωση κινήσεων ομάδων, κλπ. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα στους κώδικες που παρουσιάστηκαν, καθώς το μόνο που πρέπει να αλλάξει είναι ο αλγόριθμος κίνησης των κόμβων.
- Ενσωμάτωση διαλείψεων μεγάλης κλίμακας (large scale fading), δηλαδή εξασθένιση και σκιάσεων, και συνεπώς, εξάρτηση του σήματος που στέλνει/λαμβάνει κάθε κινητός κόμβος από την απόσταση του από το σταθμό βάσης (κυψελωτό σύστημα) ή από τους άλλους κόμβους (αδόμητο δίκτυο), καθώς και από εμπόδια που υπάρχουν μεταξύ τους.
- Υλοποίηση πιο ρεαλιστικών σχημάτων για τις κυψέλες του κυψελωτού συστήματος και ενσωμάτωση πιο έξυπνων αλγορίθμων μεταπομπής.
- Εφαρμογή πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε αδόμητο δίκτυο, με βάση τη γνώση για τη διαθεσιμότητα ζεύξεων και μονοπατιών, και λήψη στατιστικών στοιχείων επιπέδου δικτύου, π.χ. ποσοστό παράδοσης πακέτων (packet delivery ratio) από έναν κόμβο σε έναν άλλο.
- Θεωρητική μελέτη της διάρκειας και της διαθεσιμότητας μονοπατιών, βασισμένη στο θεωρητικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 για τη διάρκεια και τη διαθεσιμότητα ζεύξης, και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από τις προσομοιώσεις.