



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

Μηχανισμοί Μετατροπής Ιδιοτήτων Δικτύων  
Βασιζόμενοι στο Βαθμό Κόμβου με Εφαρμογές  
στα Αυτοργανούμενα και Κοινωνικά Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ελένης Γ. Στάη

Επιβλέπων: Συμεών Χρ. Παπαβασιλείου  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

Μηχανισμοί Μετατροπής Ιδιοτήτων Δικτύων  
Βασιζόμενοι στο Βαθμό Κόμβου με Εφαρμογές  
στα Αυτοργανούμενα και Κοινωνικά Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ελένης Γ. Στάη

Επιβλέπων: Συμεών Χρ. Παπαβασιλείου  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2009.

.....  
Σ. Παπαβασιλείου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Β. Μάγκλαγης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Δ. Καλογεράς  
Ερευνητής ΕΠΙΣΕΥ

Αθήνα, Οκτώβριος 2009.

.....

### **Ελένη Γ. Στάη**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Copyright © Ελένη Γ. Στάη, 2009

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 στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Τα ασύρματα πολυ-βηματικά δίκτυα διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στις σύγχρονες επικοινωνιακές υποδομές και μελλοντικά αναμένεται να κερδίσουν όλο και περισσότερο έδαφος σε σχέση με τα αντίστοιχα ενσύρματα, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν όπως κινητικότητα, ευκολία στην εγκατάσταση - λειτουργία και ανεκτό κόστος. Ωστόσο, στα ασύρματα δίκτυα είναι επιθυμητή ή και απαραίτητη η διατήρηση της μέσης διαδρομής μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων σε χαμηλές τιμές.

Η εργασία αυτή, εστιάζει στο πρόβλημα της δημιουργίας δικτύων με ιδιότητες δικτύων τύπου μικρού-κόσμου ξεκινώντας από τυχαίους γεωμετρικούς γράφους που αντιστοιχούν σε ασύρματα πολυ-βηματικά δίκτυα. Στόχος είναι η τοποθέτηση του προβλήματος σε μία ρεαλιστική βάση. Αναπτύσσεται και αναλύεται θεωρητικά ένα μοντέλο ώστε ένας τυχαίος γεωμετρικός γράφος να μετατραπεί σ'ενα ισομορφικό γράφο με ιδιότητες μικρού-κόσμου. Το μοντέλο βασίζεται στο βαθμό του κόμβου και προσθέτει συνδέσεις σε κόμβους που διαθέτουν ήδη μεγάλο βαθμό για τη δημιουργία συντομεύσεων. Εξετάζονται πυκνά δίκτυα και οι τιμές των παραμέτρων που επιλέγονται δικαιολογούνται μέσα από κατάλληλα διαγράμματα. Στην προσπάθεια μας να προσεγγίσουμε όσον το δυνατόν καλύτερα το μοντέλο του δικτύου τύπου μικρού-κόσμου εφαρμόζουμε δύο τεχνικές βελτίωσης στο αρχικό μοντέλο εκ των οποίων η μία έχει θετικά αποτελέσματα όπως φαίνεται από τα σχετικά αποτελέσματα. Ακολουθώντας την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, συγκρίνουμε τις προσεγγίσεις και παρουσιάζουμε τα τελικά συμπεράσματα. Τέλος πραγματοποιείται η σύγκριση του μοντέλου που βασίζεται στο βαθμό κόμβου με το αντίστοιχο που βασίζεται στην τοπολογία όπου φαίνεται ότι τα δύο μοντέλα οδηγούν το μέσο μήκος διαδρομής σε ίδιες περίπου τιμές.

## **Λέξεις Κλειδιά**

ασύρματα αυτοργανούμενα δίκτυα, δίκτυα τύπου μικρού-χόσμου, κοινωνικά δίκτυα, τυχαίος γεωμετρικός γράφος, μέσο μήκος διαδρομής δικτύου, συντελεστής ομαδοποίησης, διαδικασία χωρικών σημείων, θεωρία συνέχειας

## **Abstract**

Wireless multi-hop networks play an important role in the modern infrastructure of communications, and in the future they are expected to gain increasing ground against wired networks, due to the advantages they offer such as mobility, ease of installation - operation and tolerable cost. However, in wireless networks it is desirable or even necessary, to maintain the average distance between any two nodes at low prices.

This work, focuses on the problem of creating networks that have properties of small-world networks starting from random geometric graphs, which correspond to wireless multi-hop networks. The objective is to pose the problem on a realistic basis. We develop and analyze theoretically a model so as a random geometric graph to be turned into an isomorphic graph with small-world properties. The model is based on the degree of the node and adds links to nodes, that already have a large degree, to create shortcuts. Dense networks are examined and the parameters selected are justified through appropriate simulation studies. In our effort to approach the model of the network of small-world type by as much as possible, we apply two techniques to improve the original model of which the second has a positive effect as it can be shown from the results. Following the analysis of the results of simulations, we compare the approaches and present useful conclusions. Finally we present the comparison of the model which is based on the degree with the corresponding one based on the topology, which reveals that the two models lead the reduction of the average path length at about the same price.

## **Key Words**

wireless ad hoc networks, small-world networks, social networks, random geometric graph, average path length, clustering coefficient, spatial point processes, continuum theory

## **Ευχαριστίες**

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλα αύτα που με βοήθησαν καθένας με το δικό του τρόπο στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου.

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Συμεών Παπαβασιλείου για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο “Netmode” και την άψογη συνεργασία και καθοδήγηση του.

Σημαντικό ρόλο στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής διαδραμάτισε ο υπεύθυνος της διπλωματικής μου εργασίας μου ο Δρ. Βασίλειος Καρυώτης, τον οποίο και ευχαριστώ για την καθοδήγησή του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τη συμφοιτήτρια και φίλη μου Ευγαγγελία Σκιάνη για την εξαιρετική και εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε κατά την πραγματοποίηση ενός μεγάλου τμήματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας και ελπίζω η συνεργασία μας να συνεχιστεί και μελλοντικά.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Γεώργιο και Μαρία για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν στα μαθητικά και φοιτητικά μου χρόνια. Οι ηθικές αξίες και αρχές που μου μετέδωσαν, όπως και ο τρόπος ζωής τους συνέβαλλαν ουσιαστικά στη διαμόρφωση της προσωπικότητάς μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Ιωάννη για τη συμπαράστασή του και τις συμβουλές του για τις αποφάσεις μου στην περίοδο αυτή της ζωής μου.

# Περιεχόμενα

<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>8</b>
1.1 Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών	
Και Υπολογιστών . . . . .	9
1.2 Συμβολή . . . . .	11
1.3 Διάρθρωση . . . . .	12
<b>2 Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετικές Εργασίες</b>	<b>15</b>
2.1 Ασύρματα Αυτοργανούμενα Δίκτυα . . . . .	15
2.1.1 Εισαγωγή . . . . .	15
2.1.2 Στοίβα Πρωτοκόλλων . . . . .	16
2.1.3 Επιπρόσθετες Βελτιώσεις (Κατευθυντικές Κεραίες) . . . . .	22
2.1.4 Εφαρμογή . . . . .	23
2.2 Δίκτυα Αισθητήρων . . . . .	24
2.2.1 Αρχιτεκτονική . . . . .	25
2.2.2 Στοίβα πρωτοκόλλων . . . . .	32
2.3 Scale-Free Δίκτυα . . . . .	35
2.4 Δίκτυα Τύπου Μικρού Κόσμου . . . . .	41
2.5 Θεωρία Συνέχειας - <i>Continuum Theory</i> . . . . .	44
2.6 Έλεγχος Τοπολογίας . . . . .	54
<b>3 Μοντέλο Μετατροπής Αυτοργανούμενου Δικτύου βασιζόμενο σε Τοπική Επιλεκτική Επικόλληση</b>	<b>58</b>

3.1	Γενική Περιγραφή και Παραδοχές . . . . .	58
3.2	Ανάλυση Μοντέλου Τροποποίησης Επιλεκτικής Επικόλλησης . . . . .	61
3.2.1	Σενάριο 1 - Βασικό Σενάριο . . . . .	66
3.2.2	Σενάριο 2 . . . . .	70
3.3	Διαφοροποίηση της υπόθεσης προσθήκης μονόδρομων ζεύξεων .	74
<b>4</b>	<b>Προσομοίωση Μοντέλου Μετατροπής Δικτύων</b>	<b>80</b>
4.1	Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων του δικτύου . . . . .	80
4.1.1	Συνδεσιμότητα δικτύου ως συνάρτηση του εύρους μετά- δοσης κάθε κόμβου . . . . .	81
4.1.2	Συνδεσιμότητα δικτύου ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων . . . . .	83
4.1.3	Σχέση συνδεσιμότητας σε δίκτυα σταθερής πυκνότητας $\frac{N}{L^2}$ . . . . .	85
4.1.4	Σχέση συνδεσιμότητας και πλήθους κόμβων με το ποσοστό της περιοχής κάλυψης κόμβου προς τη συνολική περιοχή δικτύου . . . . .	86
4.1.5	Εξέταση του απαιτούμενου πλήθους των διαφορετικών τοπολογιών . . . . .	88
4.2	Συμπεράσματα για Συνεκτικότητα Τοπολογιών Προσομοίωσης .	90
4.3	Επιλογή των παραμέτρων . . . . .	91
4.4	Λειτουργία Μοντέλου Τροποποίησης Δικτύου . . . . .	94
4.5	Σύγκριση του βασικού μοντέλων και των παραλλαγών του με τον τυχαίο γεωμετρικό γράφο και το δίκτυο μικρού-κόσμου . .	105
4.6	Σύγκριση Μοντέλου που βασίζεται στο βαθμό κόμβου με το μοντέλο που βασίζεται στην τοπολογία [14] . . . . .	112
<b>5</b>	<b>Επίλογος</b>	<b>116</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Μετάβαση από κανονικό πλέγμα σε ‘ <i>small-world</i> ’ και ‘ <i>random graph</i> ’ . . . . .	42
3.1	Παράδειγμα προσθήκης συνδέσμων σε κόμβο με μεγάλο βαθμό . . . . .	67
4.1	Συνδεσιμότητα σε σχέση με την ακτίνα μετάδοσης για δεδομένο πλήθος κόμβων . . . . .	81
4.2	Συνδεσιμότητα σε σχέση με την ακτίνα μετάδοσης για δεδομένο πλήθος κόμβων για πυκνά δίκτυα . . . . .	83
4.3	Συνδεσιμότητα ως προς το πλήθος των κόμβων . . . . .	84
4.4	Συνδεσιμότητα ως προς το πλήθος των κόμβων . . . . .	85
4.5	Συνδεσιμότητα ως προς την ακτίνα μετάδοσης για πυκνότητα 100 κόμβους ανά $km^2$ . . . . .	86
4.6	Συνδεσιμότητα ως προς αριθμό κόμβων διατηρώντας σταθερή την περιοχή κάλυψης $\frac{\pi R^2}{L^2}$ , ( $L = 1000m$ ) . . . . .	86
4.7	Συνδεσιμότητα ως προς αριθμό κόμβων διατηρώντας σταθερή την περιοχή κάλυψης $\frac{\pi R^2}{L^2}$ , ( $L = 500m$ ) . . . . .	87
4.8	Συνδεσιμότητα ως προς αριθμό κόμβων διατηρώντας σταθερή την περιοχή κάλυψης $\frac{\pi R^2}{L^2}$ , ( $L = 250m$ ) . . . . .	87
4.9	Ποσοστό Συνδεσιμότητας ως προς το πλήθος των κόμβων και την ακτίνα μετάδοσης όταν οι μέσοι όροι υπολογίζονται για $T=1000$ τοπολογίες . . . . .	89
4.10	Ποσοστό Συνδεσιμότητας ως προς το πλήθος των κόμβων και την ακτίνα μετάδοσης όταν οι μέσοι όροι υπολογίζονται για $T=5000$ τοπολογίες . . . . .	89

4.11 Ποσοστό Συνδεσιμότητας ως προς το πλήθος των κόμβων και την ακτίνα μετάδοσης όταν οι μέσοι όροι υπολογίζονται για $T=10000$ τοπολογίες . . . . .	90
4.12 Ποσοστό Συνδεσιμότητας ως προς το πλήθος των κόμβων και την ακτίνα μετάδοσης όταν οι μέσοι όροι υπολογίζονται για $T=15000$ τοπολογίες . . . . .	90
4.13 Τοπολογία αρχικού δικτύου τυχαίου γεωμετρικού γράφου . . . . .	95
4.14 Συνδέσεις που προστίθενται στο πρώτο βήμα της προσομοίωσης . . . . .	96
4.15 Συνδέσεις που προστίθενται στο δεύτερο βήμα της προσομοίωσης . . . . .	96
4.16 Συνδέσεις που προστίθενται στο τρίτο βήμα της προσομοίωσης . . . . .	97
4.17 Συνδέσεις που προστίθενται στο πέμπτο βήμα της προσομοίωσης . . . . .	98
4.18 Συνδέσεις που προστίθενται στο έβδομο βήμα της προσομοίωσης . . . . .	98
4.19 Συνδέσεις που προστίθενται στο δέκατο βήμα της προσομοίωσης . . . . .	99
4.20 Συνδέσεις που προστίθενται στο δωδέκατο βήμα της προσομοίωσης . . . . .	99
4.21 Συνδέσεις που προστίθενται συνολικά . . . . .	100
4.22 Μείωση του Μέσου Μήκους Διαδρομής σε κάθε βήμα - Σενάριο 1100 . . . . .	1100
4.23 Μεταβολή του Συντελεστή Ομαδοποίησης σε κάθε βήμα - Σενάριο 1 . . . . .	101
4.24 Σύγκριση των θεωρητικών αυξήσεων και των αυξησεων από την προσομοίωση, στη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου - Σενάριο 1 . . . . .	101
4.25 Σύγκριση του θεωρητικού μέσου βαθμού κόμβου και του μέσου βαθμού που προκύπτει από την προσομοίωση - Σενάριο 1 . . . . .	102
4.26 Μείωση του Μέσου Μήκους Διαδρομής σε κάθε βήμα - Σενάριο 2102 . . . . .	2102
4.27 Μεταβολή του Συντελεστή Ομαδοποίησης σε κάθε βήμα - Σενάριο 2 . . . . .	103
4.28 Σύγκριση των θεωρητικών αυξήσεων και των αυξησεων από την προσομοίωση, στη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου - Σενάριο 2 . . . . .	103
4.29 Μείωση του Μέσου Μήκους Διαδρομής σε κάθε βήμα - Αμφίδρομες συνδέσεις στο Σενάριο 1 . . . . .	104
4.30 Μεταβολή του Συντελεστή Ομαδοποίησης σε κάθε βήμα - Αμφίδρομες συνδέσεις στο Σενάριο 1 . . . . .	105

4.31 Σύγκριση των θεωρητικών αυξήσεων και των αυξησεων από την προσομοίωση, στη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου - Αμφίδρομες συνδέσεις στο Σενάριο 1 . . . . .	105
4.32 Σύγκριση των μέσων μηκών διαδρομής των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με σταθερό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων $H = 15$ και $150m \leq R_{max} \leq 310m$ . . . . .	106
4.33 Σύγκριση του μέσου μήκους διαδρομής των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με μεταβλητό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων $H = 0.1N$ για προσθήκη συνδέσεων και $150m \leq R_{max} \leq 390m$ . . . . .	107
4.34 Σύγκριση του μέσου μήκους διαδρομής των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με μεταβλητό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων $H = 0.1N$ για προσθήκη συνδέσεων και $150m \leq R_{max} \leq 570m$ . . . . .	108
4.35 Σύγκριση των μέσων μηκών διαδρομής των μοντέλων για διαφορετικές τιμές της αρχικής ακτίνας, $H = 0.1N$ και $150m \leq R_{max} \leq 570m$ . . . . .	109
4.36 Σύγκριση των συντελεστών ομαδοποίησης των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με σταθερό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων $H = 15$ για προσθήκη συνδέσεων και $150m \leq R_{max} \leq 310m$ . . . . .	110
4.37 Σύγκριση των συντελεστών ομαδοποίησης των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με μεταβλητό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων $H = 0.1N$ για προσθήκη συνδέσεων και $150m \leq R_{max} \leq 390m$ . . . . .	111
4.38 Σύγκριση των συντελεστών ομαδοποίησης των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με μεταβλητό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων $H = 0.1N$ για προσθήκη συνδέσεων και $150m \leq R_{max} \leq 570m$ . . . . .	112
4.39 Σύγκριση των συντελεστών ομαδοποίησης των μοντέλων για διαφορετικές τιμές της αρχικής ακτίνας, $H = 0.1N$ και $150m \leq R_{max} \leq 570m$ . . . . .	112

4.40 Μέσο Μήκος Μονοπατιού: Σύγκριση Μοντέλων . . . . .	113
4.41 Παράγοντας Ομαδοποίησης: Σύγκριση Μοντέλων . . . . .	114

# Κατάλογος Πινάκων

2.1	Πρωτόκολλα Χωρίς Ανταγωνισμό . . . . .	16
2.2	Πρωτόκολλα Με Ανταγωνισμό . . . . .	17
2.3	<i>Proactive</i> Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση την Τοπολογία	20
2.4	<i>Reactive</i> Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση την Τοπολογία	20
2.5	Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση τη θέση . . . . .	21
2.6	Πρωτόκολλα <i>Mac</i> στα Δίκτυα Αισθητήρων . . . . .	33
2.7	Δίκτυα <i>scale – free</i> . . . . .	39
2.8	Μη <i>scale – free</i> δίκτυα . . . . .	39
2.9	Κατηγορίες πρωτοκόλλων ελέγχου τοπολογίας . . . . .	57
4.1	Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν . . . . .	92
4.2	Θεωρητική αύξηση των συνδέσεων σε κάθε βήμα . . . . .	97

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Τα δίκτυα υπολογιστών και επικοινωνιών και χυρίως τα ασύρματα δίκτυα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις υπάρχουσες επικοινωνιακές υποδομές και αναμένεται η συμμετοχή τους στην περαιτέρω ανάπτυξη των μελλοντικών επικοινωνιακών δομών να είναι καθοριστική. Τα δίκτυα γενικά προσφέρουν τη δυνατότητα για από κοινού ενημέρωση αρχείων δεδομένων, άντληση δεδομένων από Βάσεις Δεδομένων, κοινή χρήση περιφερειακών συσκευών, διαμοιρασμό προγραμμάτων, ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και υπηρεσίες τηλεδιάσκεψης.

Παραδείγματα μέσα από τα οποία αντανακλάται η χρησιμότητα των δικτύων εντοπίζονται σε όλους τους τομείς της κοινωνικής ζωής όπως οι επιχειρήσεις, οι δημόσιοι οργανισμοί, αλλά και τα οικιακά δίκτυα. Στις επιχειρήσεις είναι απαραίτητη η κοινοχρησία πόρων και είναι επιθυμητό όλα τα προγράμματα, ο εξοπλισμός και τα δεδομένα να είναι διαθέσιμα σε οποιοδήποτε χρήστη, χωρίς να έχει σημασία η φυσική θέση του πόρου που χρησιμοποιείται. Όλες οι εταιρίες και οι δημόσιοι οργανισμοί είναι ζωτικά εξαρτώμενες από πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες σε υπολογιστές, οι οποίοι μάλιστα σε υπολογιστές που δεν βρίσκονται στο ίδιο κτίριο αλλά απέχουν μεγάλη χωρική απόσταση. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη η εξ' αποστάσεως πρόσβαση στους διαθέσιμους. Όσον αφορά την οικιακή χρήση, είναι επιθυμητή ή και απαραίτητη η πρόσβαση στο Διαδίκτυο με στόχο την πρόσβαση σε απομακρυσμένες πληροφορίες, τη διαπροσωπική επικοινωνία, την αλληλεπιδραστική διασκέδαση και το

ηλεκτρονικό εμπόριο.

Σήμερα το ενδιαφέρον για τα ασύρματα δίκτυα αυξάνεται διαρκώς. Οι χρήστες των συγκεκριμένων συστημάτων αποζητούν διαρκή επικοινωνία μεταξύ τους. Η εγκατάσταση ασύρματων δικτύων παρέχει τη δυνατότητα πρόσβασης σε δεδομένα χωρίς τους περιορισμούς των καλωδίων και πολύπλοκων διαδικασιών υποδομής. Η καλωδιακή σύνδεση είναι αδύνατη σε περιπτώσεις κινητών κόμβων, ενώ πολλοί χρήστες επιτραπέζιων υπολογιστών θέλουν να είναι συνδεδεμένοι με τη βάση όντας απομακρυσμένοι ή κινητοί.

Παρόλα αυτά, η ευρεία διάδοση της δικτύωσης έχει εισαγάγει νέα κοινωνικά, ηθικά, πολιτικά και τεχνικά προβλήματα, τα οποία δεν εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Αντίθετα, επικεντρώνει στα ασύρματα αυτοργανούμενα δίκτυα και τις ιδιότητές τους, καθώς και τις συσχετίσεις τους με τα κοινωνικά δίκτυα.

## 1.1 Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών Και Υπολογιστών

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο το οποίο χρησιμοποιεί ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίζει το δίκτυο και το περιβάλλον μετάδοσης. Σήμερα όλα τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και, επομένως, κατά μία έννοια, είναι ουσιαστικώς δίκτυα υπολογιστών. Τα ασύρματα δίκτυα υπολογιστών σε μία πρώτη προσέγγιση μπορούν να διαχωριστούν σε κεντροποιημένα και σε δίκτυα χωρίς σταθερή υποδομή. Σε δεύτερη προσέγγιση τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες: τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα δορυφορικά δίκτυα, την ασύρματη διασύνδεση συστήματος (διασύνδεση δηλαδή των εξαρτημάτων ενός υπολογιστή), τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρ-

ματα μητροπολιτικά δίκτυα (*WMAN*), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (*WLAN*) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (*WPAN*). Η τηλεόραση και το ραδιόφωνο, αν και ως τηλεπικοινωνιακά μέσα είναι εκ φύσεως ασύρματα στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν συμπεριλαμβάνονται στα ασύρματα δίκτυα, καθώς η μετάδοση γίνεται προς πάσα κατεύθυνση χωρίς να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών κόμβων (συσκευών) με τη συνήθη έννοια. Επιπλέον, τα μεταφερόμενα δεδομένα συνήθως είναι αναλογικά και επομένως, δεν μπορούν να θεωρηθούν δίκτυα υπολογιστών. Σχεδόν όλα τα ασύρματα δίκτυα συνδέονται σε κάποιο σημείο με ενσύρματα δίκτυα ώστε να παρέχουν πρόσβαση σε αρχεία, σε βάσεις δεδομένων και στο Διαδίκτυο.

Σε μία ασύρματη ζεύξη ένας χρήστης συνδέεται με έναν σταθμό βάσης ή έναν άλλο ασύρματο υπολογιστή μέσω μίας ασύρματης ζεύξης επικοινωνίας. Οι υπολογιστές που συνδέονται στο σταθμό βάσης αναφέρεται ότι λειτουργούν σε τρόπο λειτουργίας υποδομής, εφόσον όλες οι παραδοσιακές υπηρεσίες - δρομολόγηση, εκχώρηση διευθύνσεων - παρέχονται από το δίκτυο στο οποίο συνδέεται ο υπολογιστής μέσου του σταθμού βάσης. Στα αυτοργανούμενα δίκτυα, οι ασύρματοι υπολογιστές δεν έχουν κεντρική υποδομή με την οποία διασυνδέονται. Επομένως οι ίδιοι οι υπολογιστές πρέπει να παρέχουν υπηρεσίες όπως η δρομολόγηση και η μετάφραση ονομάτων *DNS*. Διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματων δικτύων έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και μπορούν να μεταδίδουν σε διαφορετικές ταχύτητες. Η ταχύτητα στο ασύρματο δίκτυο εξαρτάται από το πρωτόκολλο που έχει επιλεγεί αλλά συνήθως είναι εξασθενισμένες και πιο ασταθείς από ότι στα συμβατικά ενσύρματα δίκτυα. Τα καινούρια δίκτυα επιτρέπουν ταχύτητες μέχρι και  $100 Mbps$ , ενώ τα παλιότερα δίκτυα των  $10 Mbps$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα.

Τα αυτοργανούμενα (*ad hoc*) δίκτυα αποτελούν εφαρμογή των ασύρματων τοπικών δικτύων *WLAN* και η εγκατάστασή τους συνήθως προορίζεται για προσωρινή χρήση ή σε περιπτώσεις που η εγκατάσταση σταθερής υποδομής είναι ασύμφορη. Οι σταθμοί που εμπλέκονται αποτελούν ένα αυτοδιαχειριζόμενο και δυναμικό δίκτυο, δηλαδή μπορούν να εισέρχονται και να αποχωρούν ελεύθερα

από το δίκτυο. Τα συστήματα τοποθετούνται σε μία περιοχή, συγχρονίζονται και στη συνέχεια σχηματίζεται το δίκτυο δίνοντας τη δυνατότητα σε μία ομάδα χρηστών να αποτελέσει ένα αυτόνομο τοπικό δίκτυο οπουδήποτε, οποιαδήποτε στιγμή και με αμελητέα προσπάθεια. Τα πρωτόκολλα που απαιτούνται για τη λειτουργία του παραπάνω δικτύου είναι πολύπλοκα, ωστόσο πρόκειται για εύκολα εγκαθιστάμενο και φτηνό δίκτυο για τοπική δικτύωση. Ωστόσο παρουσιάζουν προβλήματα όσον αφορά στην καταναλισκόμενη ενέργεια και μνήμη. Τα *ad hoc* δίκτυα και τα πρωτόκολλα που διέπουν τη λειτουργία τους περιγράφονται πιο αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (*sensor network*) αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων (αισθητήρων) οι οποίοι είναι κατανεμημένοι σε μία καθορισμένη γεωγραφική περιοχή. Επομένως αποτελούν μία ακόμη εφαρμογή των ασύρματων τοπικών δικτύων *WLAN*. Τέτοια δίκτυα χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών όπως είναι ο έλεγχος κυκλοφορίας, η συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος καθώς και εφαρμογές ασφαλείας. Οι αισθητήρες - κόμβοι συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον και τα στέλνουν μέσω των γειτονικών κόμβων (*multi – hop routing*) σε ένα κόμβο-πηγή (*sink*) ο οποίος ψεωρείται ότι έχει απεριόριστο αποθηκευτικό χώρο και ενέργεια. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τα *ad hoc* δίκτυα, καθώς οι κόμβοι χαρακτηρίζονται από μικρή υπολογιστική δύναμη, περιορισμούς μνήμης και ενέργειας. Τα δίκτυα αισθητήρων και τα πρωτόκολλα που διέπουν τη λειτουργία τους περιγράφονται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2.

## 1.2 Συμβολή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται αρχικά τα αυτοργανούμενα (*ad hoc*) δίκτυα, τα δίκτυα αισθητήρων(*sensor*) και οι ιδιότητες των δικτύων τύπου μικρού-κόσμου και στη συνέχεια προτείνεται ένα μοντέλο για τη μετατροπή ενός δικτύου *ad hoc/sensor* σε δίκτυο που ενώ διατηρεί την αρχική *ad hoc* δομή, αλ-

λά φέρει πλέον ιδιότητες δικτύου τύπου μικρού-κόσμου (*small – world*). Στην πράξη - μέχρι τώρα - εφαρμόζεται η αντίστροφη διαδικασία. Η συμβολή της διπλωματικής καταρχάς έγκειται στη μείωση του μέσου μήκους διαδρομής του αρχικού δικτύου τυχαίου γεωμετρικού γράφου σε επίπεδα μέσου μήκους διαδρομής ενός δικτύου τύπου μικρού-κόσμου. Η μείωση επιτυγχάνεται με αύξηση της ακτίνας ορισμένων κόμβων που έχουν μεγαλύτερο βαθμό συγκριτικά με τους υπόλοιπους. Εξετάζονται οι παραμέτροι που επηρεάζουν το μέσο μήκος διαδρομής, κυρίως ο αριθμός των κόμβων στους οποίους προστίθενται συνδέσεις και η αύξηση της ακτίνας, καθώς και ο τρόπος που η μεταβολή των παραμέτρων επιδρά στην αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας από το δίκτυο. Επιπρόσθετα εξετάζεται η επίδραση της εφαρμογής του μοντέλου στο συντελεστή ομαδοποίησης, όπου και οι τρεις παραλλαγές οδηγούν σε αύξηση της ομαδοποίησης όπως φαίνεται και από τα κατάλληλα διαγράμματα που παρατίθενται.

### 1.3 Διάρθρωση

Η παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθεί την εξής δομή:

Το Κεφάλαιο 2 αποτελεί μία εισαγωγή όπου παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά των τύπων δικτύων που εξετάζουμε στην συνέχεια της εργασίας. Πρόκειται για συνοπτικές παρουσιάσεις που αφορούν τα αυτοργανούμενα δίκτυα, τα δίκτυα αισθητήρων, αλλά και τα δίκτυα τύπου μικρού-κόσμου (*small – world networks*), με έμφαση στα ζεχωριστά γνωρίσματα καθενός, προκειμένου να καταστεί σαφής ο διαχωρισμός τους. Γίνεται επίσης εκτενής αναφορά στα μοντέλα που μελετούν τη συνδεσμότητα ενός συστήματος. Μεταξύ άλλων γίνεται εισαγωγή στα δίκτυα χωρίς κλίμακα (*scale – free networks*), τα οποία αποτελούν ειδικού τύπου δίκτυα με συγκεκριμένες ιδιότητες και κύριο γνώρισμα την εκθετική κατανομή του βαθμού των κόμβων. Στο σημείο αυτό, αναδεικνύεται η σημασία των κοινωνικών δικτύων στην μελέτη δικτύων επικοινωνιών και η πιθανή συνεισφορά τους στην έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζεται ένα μοντέλο περιγραφής της συμπεριφοράς ενός δικτύου καθώς μεταβαίνει στη μόνιμη κατάσταση, το οποίο αναφέρεται ως μοντέλο συνέχειας. Η περιγραφή του μοντέλου είναι α-

παραίτητη καθώς αποτελεί θεμέλιο λίθο στη μελέτη του θέματος της εργασίας και συμβάλλει στην επίλυση του προβλήματος που μας απασχολεί εδώ, δίνοντας έμφαση στην κατανομή των κόμβων του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 3 προσεγγίζεται με περισσότερες λεπτομέρειες το πρόβλημα που θα μας απασχολήσει. Μετά την περιγραφή του βασικού προβλήματος, το οποίο συνίσταται στη μετατροπή ενός δικτύου αισθητήρων σε δίκτυο με ιδιότητες μικρού-κόσμου, ακολουθεί η παρουσίαση ενός θεωρητικού μοντέλου, το οποίο προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τις παραμέτρους του δικτύου, και το ρυθμό μεταβολής τους κατά την εξέλιξη του πρωτογενούς δικτύου που εξετάζεται. Το δίκτυο στην αρχή είναι τύπου τυχαίου γεωμετρικού γράφου στην πιο απλή του μορφή, όπου όλοι οι κόμβοι είναι πανομοιότυποι, δηλαδή έχουν την ίδια ακτίνα μετάδοσης, με αποτέλεσμα να επικοινωνούν μόνο τοπικά (στην εμβέλεια της γειτονιάς τους) με τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Αυτό συνεπάγεται ότι το μέσο μήκος μονοπατιού, δηλαδή ο αριθμός των ενδιάμεσων βημάτων για τη μετάδοση πληροφορίας μεταξύ δύο οποιονδήποτε κόμβων έχει μία καθορισμένη τιμή, και μάλιστα σχετικά υψηλή, ειδικά όταν η ακτίνα μετάδοσης είναι μικρή. Προκειμένου να μειωθεί το μήκος μονοπατιού, προσδινοντας στο δίκτυο χαρακτηριστικά 'μικρού-κόσμου', εφαρμόζουμε τις επιμέρους διαδικασίες που περιγράφονται. Ως αποτέλεσμα αυτών εξάγονται αναλυτικές εξισώσεις με σκοπό τη μελέτη της μεταβολής των παραμέτρων και της συμβολής τους στην δημιουργία 'μικρού-κόσμου' τοπολογίας. Το αναλυτικό μοντέλο που παρατίθεται δίνει έμφαση στις εξισώσεις που περιγράφουν τη μεταβολή της συνδεσμότητας του δικτύου, ώστε να εξαχθεί ο τρόπος που αυτό επηρεάζει τις λοιπές παραμέτρους του δικτύου και κυρίως το μέσο μήκος μονοπατιού. Ακόμη παρουσιάζονται δύο διαφοροποιήσεις ή τρόποι πιθανής βελτίωσης του αναλυτικού μοντέλου ώστε να επιλεχθεί εκείνη που στην προσομοίωση θα δώσει το καλύτερο αποτέλεσμα.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται σχηματικά ο τρόπος που λειτουργεί το μοντέλο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο κώδικας για την προσομοιώση και την εξαγωγή των διαγραμμάτων είναι γραμμένος στο μαθηματικό

πακέτο *Matlab*, και προσομοιώνει τη συμπεριφορά του δικτύου καθώς οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων μεταβάλλονται έως ότου γίνει η μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση. Εξηγούνται αναλυτικά τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων αλλά και ο τύπος του δικτύου, που εξαρτάται από την χωρική κατανομή των κόμβων. Μάλιστα, πολλές αρχικοποιήσεις όπως ο αριθμός των επαναλήψεων, η ακτίνα μετάδοσης, ο αριθμός των κόμβων στηρίχθηκαν σε αποτελέσματα προσομοιώσεων που παρουσιάζονται με περισσότερες λεπτομέρειες στην πρώτη υποενότητα του κεφαλαίου και συνοδεύονται από σχετικά γραφήματα. Επιπλέον γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του βασικού μοντέλου και των διαφοροποιησεών του χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα διαγράμματα. Επιπρόσθετα τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των μοντέλων στο δίκτυο για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν και κυρίως το μέσο μήκος μονοπατιού και ο συντελεστής ομαδοποίησης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη ενός δικτύου τυχαίου γεωμετρικού γράφου και ενός δικτύου τύπου μικρού-κόσμου. Τέλος στην ενότητα 4.6 πραγματοποίειται σύγκριση του μοντέλου που βασίζεται στο βαθμό κόμβου με το αντίστοιχο που βασίζεται στην τοπολογία. Συγκρίνεται η αποτελεσματικότητα του κάθε μοντέλου στη μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού με βάση τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται.

Τέλος στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα όσα παρουσιάζονται στη διπλωματική εργασία, τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και οι προοπτικές μελλοντικής εξέλιξης και επέκτασης του μοντέλου.

## Κεφάλαιο 2

# Θεωρητικό Υπόβαθρο και Σχετικές Εργασίες

### 2.1 Ασύρματα Αυτοργανούμενα Δίκτυα

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Ένα ασύρματο αυτοργανούμενο (ad hoc) δίκτυο είναι μία συλλογή από κόμβους που μπορούν να οργανωθούν αυτόνομα και δυναμικά, σχηματίζοντας ένα δίκτυο χωρίς καμία προϋπάρχουσα υποδομή. Δύο κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν είτε απευθείας μεταξύ τους, είτε μέσω ενδιάμεσων κόμβων. Επομένως, κάθε κόμβος θα μπορούσε να θεωρηθεί ταυτόχρονα ως δρομολογητής και χρήστης. Παρέχουν ευελιξία, χαμηλό κόστος, ευρωστία, εύκολη ανάπτυξη ακόμη και σε έρημες περιοχές, ανθεκτικότητα στις φυσικές καταστροφές και σε στρατιωτικές επιχειρήσεις. Τυπικά προβλήματα συσχετιζόμενα με τα αυτοργανούμενα δίκτυα είναι ο θόρυβος, το περιορισμένο φάσμα, οι ανασφαλείς ασύρματες μεταδόσεις, ο υψηλός ρυθμός λαθών, ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης, οι εναλλαγές στις συνθήκες του φυσικού μέσου μετάδοσης, η κινητικότητα, οι περιορισμοί στην κατανάλωση ενέργειας, η ασφάλεια. Στο τμήμα αυτό του κεφαλαίου περιγράφονται τα πρωτόκολλα που διέπουν τη λειτουργία των αυτοργανούμενων δικτύων στα διάφορα επίπεδα, η δυνατότητα βελτίωσης της επίδοσής τους με χρήση κατευθυντικών κεραιών καθώς και ορισμένες εφαρμογές.

## 2.1.2 Στοίβα Πρωτοκόλλων

### Στρώμα Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (MAC)

Τα πρωτόκολλα Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (Medium Access Control - MAC) πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, αποτελεσματική πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης και Ποιότητα Υπηρεσίας (*QoS*). Μπορούν να ταξινομηθούν ως πρωτόκολλα χωρίς ανταγωνισμό τα οποία εγγυώνται μετάδοση χωρίς ακρόαση του μέσου (Πίνακας 2.1), καθώς οι εκχωρήσεις πρόσβασης είναι προκαθορισμένες, και πρωτόκολλα με ανταγωνισμό (Πίνακας 2.2) τα οποία χαρακτηρίζονται από τυχαιότητα και προσωρινότητα στην τοπολογία και είναι κατάλληλα για σποραδική μετάδοση δεδομένων.

Πίνακας 2.1: Πρωτόκολλα Χωρίς Ανταγωνισμό

Πρωτόκολλα Χωρίς Ανταγωνισμό
TDMA [1]
CDMA [1]
FDMA [1]
Polling [1]
Token-based [1]

Τα πρωτόκολλα *MAC* μπορούν - με απώτερο σκοπό να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητά τους - να επεκταθούν ως εξής:

1. **Πρωτόκολλα πολλαπλών καναλιών.** Τα πολλαπλά κανάλια μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική επίδοση ενός δικτύου εξαιτίας του γεγονότος ότι κάθε κανάλι αποτελεί ένα διαφορετικό τομέα συγχρούσεων, το διαυθέσιμο εύρος ζώνης αυξάνει με αντίστοιχη αύξηση του αριθμού των καναλιών και είναι επιπρόσθετα δυνατή η διαφοροποίηση μεταξύ των καναλιών για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (*QoS*). Τέλος, μπορεί να υπάρχει ένα ξεχωριστό κανάλι ελέγχου ή όχι.
2. **Πρωτόκολλα με έλεχγο της κατανάλωσης ενέργειας.** Οι κινητές ασύρματες συσκευές - σταθμοί τροφοδοτούνται από μπαταρία επομένως όμως πρέπει να μη σπαταλούν ενέργεια προκειμένου να επεκτεί-

Πίνακας 2.2: Πρωτόκολλα Με Ανταγωνισμό

Πρωτόκολλα Με Ανταγωνισμό [1]	Περιγραφή	Πιθανότητα Σύγχρουσης	Κρυμμένο Τερματικό <sup>1</sup>	Εκτεθειμένο Τερματικό <sup>2</sup>
<i>ALOHA</i>	Ο σταθμός επιδιώκει πρόσβαση στο μέσο όταν έχει δεδομένα να στείλει	πολύ υψηλή	ναι	ναι
<i>Slotted ALOHA</i>	Ο σταθμός αναμένει για ενα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ώστε να επιδιώξει πρόσβαση στο μέσο	υψηλή	ναι	ναι
<i>CSMA</i> ( <i>p</i> -επίμονο ή μη-επίμονο)	Ο σταθμός ενημερώνεται για τις πρόσφατες μεταδόσεις διαμέσου αισθητήρων στο μέσο. Όταν το μέσο γίνει ανενεργό, ο σταθμός μεταδίδει με πιθανότητα <i>p</i> ( <i>p</i> -επίμονο) ή περιμένει για ένα τυχαίο διάστημα μέχρι την επόμενη πρόσβαση στο μέσο (μη-επίμονο)	μέση	ναι	ναι
<i>MACA</i>	Ο σταθμός που επιδιύκει να μεταδώσει στέλνει ένα <i>RTS</i> πλάσιο και ο προορισμός απαντά με ένα <i>CTS</i> πλάσιο, αποτέλεσμα με την ανταλλαγή αυτή άλλους σταθμούς να μεταδώσουν για το χρονικό διάστημα που έχει ανακοινωθεί (το μέσο έχει δεσμευτεί)	μέση (εξαιτίας της εκθετικής οπισθιοχώρησης)	ίσως (εξαιτίας συγχρούσεων ανάμεσα σε πακέτα ελέγχου και δεδομένων)	ναι
<i>MACAW</i>	όπως <i>MACA</i> + επιβεβαίωση επιπέδου ζεύξεως ( <i>ACK</i> )	μέση	ίσως	ναι
<i>FAMA</i>	Χρησιμοποιεί ταυτόχρονα αίσθηση του μέσου και τον <i>RTS/CTS</i> μηχανισμό. Προσθέτει διαστήματα ανάμεσα στα μεταδόμενα πλαίσια ώστε να επιτευχθεί αντιστάθμιση του πολλαπλασιασμού των πακέτων και των καθυστερήσεων λόγω της επεξεργασίας των δεδομένων	χαμηλή	όχι	όχι
<i>CSMA/CA</i>	Συνδυασμός των <i>CSMA</i> , <i>MACA/MACAW</i> και <i>FAMA</i> . Προσθέτει επίσης ένα τυχαίο χρονικό διάστημα ( <i>NAV</i> ) <sup>3</sup> στοχεύοντας στον εντοπισμό επιπλέον συγχρούσεων	χαμηλή	όχι	όχι

νουν τη διάρκεια λειτουργίας τους, όταν σχηματίζουν ένα αυτοργανούμενο (*ad hoc*) δίκτυο. Οι τεχνικές των πρωτοκόλλων με έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας είναι: ενεργές και σε αναμονή λειτουργίες μεταγωγής, καθορισμός ισχύος στην ελάχιστη απαραίτητη και αποφυγή

<sup>1</sup>Φαινόμενο που συμβαίνει όταν ο σταθμός δεν δύναται να αντιληφθεί μία τρέχουσα μετάδοση και μεταδίδει την ίδια χρονική στιγμή, στον ίδιο παραλήπτη με άλλο εκπομπό.

<sup>2</sup>Φαινόμενο που συμβαίνει όταν ένας σταθμός δεν μπορεί να μεταδόσει επειδή βρίσκεται στο εύρος μετάδοσης ενός σταθμού που μεταδίδει ακόμα και αν ο επιθυμητός προορισμός βρίσκεται εκτός του προαναφερθέντος εύρους μετάδοσης.

<sup>3</sup>Σε κάθε σταθμό διατηρείται ένας μετρητής του οποίου η ένδειξη αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου το μέσο αναμένεται να είναι κατειλημένο και επομένως ο σταθμός μπορεί να μεταδόσει μόνο μετά την εκπνοή του *NAV*.

των επαναμεταδόσεων. Τα πρωτόκολλα με έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιούν μηχανισμούς διαχείρισης ισχύος ή ελέγχου ισχύος.

3. **Πρωτόκολλα με έλεγχο της ποιότητας υπηρεσίας.** Η ποιότητα υπηρεσίας (*QoS*) σε ένα δίκτυο είναι δύσκολο να επιτευχθεί εξαιτίας των παρακάτω παραγόντων: (α) μη προβλεψιμότητα του ασύρματου μέσου μετάδοσης, (β) δυσκολίες στη διάκριση μεταξύ χαμένων πλαισίων (προκαλούμενα από συγκρούσεις ή συμφόρηση) και σε λανθασμένες αποδοχές λόγω του υψηλού ρυθμού λαθών, (γ) η κατανευμημένη φύση των ασύρματων δικτύων και (δ) η εξάρτηση ενός σταθμού από άλλους σταθμούς για την προώθηση των δεδομένων. Τέλος, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της ποιότητας υπηρεσίας (*QoS*), έχουν προταθεί μοντέλα που δρουν χρησιμοποιώντας διαστρωματική πληροφορία (*cross-layer models*) [2] [3] [4].

### Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Τα αυτοργανούμενα δίκτυα απαιτούν αποτελεσματικά πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία δίνουν τη δυνατότητα δυναμικής εύρεσης διαδρομών μεταξύ των κόμβων. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα ενσύρματα δίκτυα θεωρούνται ακατάλληλα για τα ασύρματα καθώς στα τελευταία οι κόμβοι μετακινούνται αυθαίρετα οδηγώντας σε απρόβλεπτες τοπολογικές αλλαγές και η κατάσταση των συνδέσεων είναι συνάρτηση παραμέτρων όπως η θέση των κόμβων, το επίπεδο της ισχύος μετάδοσης και οι παρεμβολές μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Ενώ στα ενσύρματα δίκτυα η συχνότητα των ενημερώσεων των πινάκων δρομολόγησης εξαρτάται από το ρυθμό των αλλαγών στην τοπολογία, στα ασύρματα δίκτυα, υπάρχει ένας συμβιβασμός στη συχνότητα των ενημερώσεων

που αφορούν στη δρομολόγηση και στην ενέργεια ή στη χωρητικότητα των ασύρματων συνδέσεων.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των αυτοργανούμενων δικτύων μπορούν να ταξινομηθούν σε πρωτόκολλα που λειτουργούν με βάση την τοπολογία και σε πρωτόκολλα που λειτουργούν με βάση τη θέση.

### **Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση την Τοπολογία**

Η προώθηση των πακέτων βασίζεται στη διεύθυνση του κόμβου προορισμού και πρέπει να λαμβάνει υπόψη την κατάσταση των συνδέσεων από την πηγή στον προορισμό. Διακρίνονται σε *proactive* (προορατικά) και *reactive* (αντιδραστικά) πρωτόκολλα. Στην *proactive* δρομολόγηση οι πληροφορίες δρομολόγησης ανταλλάσσονται συνεχώς, αποσκοπώντας στη διαρκή ανανέωση των διαδρομών μεταξύ όλων των κόμβων που συναποτελούν το δίκτυο, μέσω της διάδοσης μηνυμάτων ανανέωσης κάθε φορά που συμβαίνει μία τοπολογική αλλαγή. Χαρακτηρίζονται από άμεση διαθεσιμότητα διαδρόμων δρομολόγησης, ωστόσο, παράγουν ανεπιθύμητη κίνηση ελέγχου. Δύο παραδείγματα προορατικών πρωτόκολλων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3:

Ένα *reactive* πρωτόκολλο δρομολόγησης λειτουργεί μόνο όταν υπάρχει συγκεκριμένη αίτηση για μία διαδρομή. Περιλαμβάνει τη διαδικασία εύρεσης διαδρομής (η οποία τερματίζεται όταν έχει βρεθεί διαδρομή είτε όταν όλες οι δυνατές παραλλαγές έχουν εξεταστεί) και τη διατήρηση ή αποθήκευση της διαδρομής (μέχρι ένας προορισμός να γίνει μη προσβάσιμος ή η διαδρομή να μη χρειάζεται πια). Παρέχει γρήγορη εύρεση διαδρομής και χαμηλή κατανάλωση μνήμης σε βάρος του χαμηλού εύρους ζώνης, του ανταγωνισμού, των συγκρού-

Πίνακας 2.3: *Proactive* Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση την Τοπολογία

	Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV)[1]	Optimized Link State Routing (OLSR)[1]
<b>Κύρια Χαρακτηριστικά</b>	Βασίζεται στον αλγόριθμο Bellman – Ford. Διατηρεί ενήμερους πίνακες δρομολόγησης που ανανεώνονται είτε μέσω πλήρων πακέτων, είτε μέσω συμπληρωματικών (που μεταφέρουν μόνο τα αλλαγμένα δεδομένα)	Βασίζεται στον link – state αλγόριθμο. Διατηρεί ένα τοπολογικό χάρτη του δικτύου μέσω της ανταλλαγής της πληροφορίας δρομολόγησης. Αναπτύσσει MPRs (multipoint relays - πολυσημειωκές αναμεταδόσεις) προκειμένου να υπολογίσει το συντομότερο μονοπάτι
<b>Πλεονεκτήματα</b>	Μείωση της επιπλέον δρομολόγησης, εγγυάται μονοπάτια χωρίς κύκλους	Μείωση των πακέτων ελέγχου εξατίας των MPR επιλογέων
<b>Μειονεκτήματα</b>	Χαμηλό Εύρος Ζώνης	Ακατάλληλο για αραιά δίκτυα

σεων και των περιορισμένων σε ενέργεια τερματικών κυρίως εξαιτίας της πλημύρας από τα μηνύματα ελέγχου. Η πλημμύρα αναφέρεται στην προώθηση ενός μηνύματος ελέγχου από ένα δρομολογητή σε κάθε άλλο κόμβο που συνδέεται στο δρομολογητή εκτός από τον κόμβο από τον οποίο προήλθε το πακέτο, και είναι χρήσιμη για μεταφορά της πληροφορίας γρήγορα σε κάθε κόμβο του δικτύου. Παραδείγματα τέτοιων πρωτοκόλλων συνοψίζονται στον Πίνακα 2.4:

Πίνακας 2.4: *Reactive* Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση την Τοπολογία

	Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV)[1]	Dynamic Source Routing (DSR)[1]
<b>Κύρια Χαρακτηριστικά</b>	Εύρεση Διαδρομής: Η πηγή αποστέλλει ένα πακέτο αίτησης διαδρομής (RREQ), ο προορισμός ή ένας ενδιάμεσος κόμβος με μία έγκυρη διαδρομή στέλνει ένα πακέτο απάντησης διαδρομής, κάθε κόμβος καταγράφει το γείτονα από τον οποίο έλαβε το πακέτο (εγκαθίδρυση αντίστροφου μονοπατιού).	Βασίζεται στη δρομολόγηση πηγής. Κάθε κόμβος κρατάει μία μνήμη δρομολογιών και μεταχειρίζεται διαδικασίες όπως η AODV.
<b>Πλεονεκτήματα</b>	Μονοπάτια χωρίς κύκλους (χρήση ακολουθίας αριθμών)	Τυποστηρίζει ασύμμετρες συνδέσεις.
<b>Μειονεκτήματα</b>	Υποστηρίζει μόνο συμμετρικές συνδέσεις, καθώς κάθε πακέτο προωθείται μέσω ενός προεγκατεστημένου μονοπατιού.	-

## Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση τη Θέση

Τα πρωτόκολλα που λειτουργούν με βάση τη θέση απαιτούν πληροφορία για τη γεωγραφική θέση των επικοινωνούντων κόμβων. Σε αυτήν την περίπτωση, δεν υπάρχουν πίνακες δρομολόγησης και η μετάδοση είναι βασισμένη στη θέση του κόμβου προορισμού, η οποία περιλαμβάνεται στη διεύθυνση προορισμού του πακέτου. Δύο πρωτόκολλα που λειτουργούν με βάση τη θέση - DREAM, GRID - συνοψίζονται παρακάτω:

Πίνακας 2.5: Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση τη θέση

	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM) [1]	GRID [1]
<b>Κύρια Χαρακτηριστικά</b>	Κάθε κόμβος έχει μία βάση θέσεων με τις θέσεις όλων των κόμβων στο δίκτυο. Οι κόμβοι ανταλλάσσουν μηνύματα ανανέωσης θέσης με συχνότητα που είναι: ανάλογη με την κινητικότητα τους και αντίστροφα ανάλογη με την απόσταση που τους χωρίζει.	Συντίθεται από το GRID LOCATION SERVICE - GLS - και μία άπληστη στρατηγική για την προώθηση των πακέτων· η περιοχή διαιρείται σε διάφορα τετράγωνα, όπου τα $n$ -τάξεως τετράγωνα περιέχουν 4 μικρότερα $(n-1)$ -τάξεως τετράγωνα.
<b>Πλεονεκτήματα</b>	Υποστηρίζει μία αυστηρά κατευθυντική πλημμύρα για την προώθηση των πακέτων (ένας κόμβος μεταδίδει μόνο προς τους γείτονες ενός βήματος, οι οποίοι βρίσκονται μέσα σε περιοχή με κατεύθυνση προς τον προορισμό).	'Όχι πλημμύρα [Αν ο κόμβος δεν γνωρίζει τη διεύθυνση του προορισμού, θα διαβιβάσει την αίτηση προς τον κόμβο με το μικρότερο αναγνωριστικό από εκείνους που βρίσκονται στον πίνακά του].'
<b>Μειονεκτήματα</b>	Διαδικασία ανάκτησης που απαιτείται στην περίπτωση απουσίας γειτόνων ενός βήματος προς τον επιθυμητό προορισμό.	-

## Επίπεδο Μεταφοράς

To *Transmission Control Protocol (TCP)* είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς υπό σύνδεση σχεδιασμένο για να παρέχει ποιότητα υπηρεσίας *QoS* ειδικά σε ενσύρματα δίκτυα. Ωστόσο, η επίδοση του δεν είναι ικανοποιητική όταν χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα τα οποία υποφέρουν από σφάλματα μεταδόσεων και υψηλό ρυθμό λαθών οδηγώντας σε αλλοιωμένα *TCP* πακέτα. Το *TCP* είναι

σχεδιασμένο για ενσύρματα δίκτυα με μικρό ρυθμό λαθών και υποθέτει ότι οι απώλειες πακέτων οφείλονται σε συμφόρηση δικτύου/ζεύξεων. Αν θεωρηθούν ασύρματα δίκτυα, τότε είναι υποχρεωτική η διάκριση ανάμεσα σε λάθη λόγω της συμφόρησης από σφάλματα που οφείλονται σε άλλες αιτίες όπως απώλεια πακέτων λόγω υψηλού ρυθμού λαθών (το οποίο απαιτεί άμεση επαναμετάδοση) και σφάλματα σε διαδρομές εξαιτίας της κινητικότητας των κόμβων (μετά από μία διακοπή σε ένα μονοπάτι). Μία λύση στα παραπάνω αποτελεί, το *FIXED-RTO* (τεχνική που επιτρέπει στον *TCP* αποστολέα να αποφύγει την αναμονή για ακόμη μεγαλύτερη χρονική περίοδο πριν προσπαθήσει να επαναμεταδώσει πακέτα): υποθέτει αποτυχία διαδρομής μετά από δύο συνεχόμενες λήξεις χρονομέτρου και επαναμεταδίδει το *TCP* πακέτο χωρίς να διπλασιάζει το χρονομετρητή. Ένας άλλος τρόπος για να βελτιωθεί η επίδοση του *TCP* είναι η αλληλεπίδραση του *TCP* (επίπεδο μεταφοράς) με τα άλλα επίπεδα - χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα όπως *Explicit Link Failure Notification*, *TCP - Ανατροφοδότηση*, *Αυτοργανούμενο TCP*. Υπάρχουν επίσης δύο μηχανισμοί επιπέδου συνδέσμου, το *Link Random Early Discarding* - το οποίο παρέχει μία βέλτιστη τιμή για το παράθυρο συμφόρησης - και την προσαρμοστική απόσταση που επιτρέπει τον χαλύτερο συντονισμό μεταξύ των ισχυρισμών για πρόσβαση στο κανάλι. (Πιο αναλυτικά για τα πρωτόκολλα στην υποενότητα επίπεδο μεταφοράς του [1])

### 2.1.3 Επιπρόσθετες Βελτιώσεις (Κατευθυντικές Κεραίες)

Έχει προταθεί η άποψη ότι οι κατευθυντικές κεραίες μπορούν να υποκαταστήσουν τις ομοιοκατευθυντικές καθώς περιορίζουν την περιοχή που καλύπτει η μετάδοση ενός κόμβου σε ένα τομέα, επομένως αυξάνουν το εύρος χρησι-

μοποίησης και καθιστούν δυνατή τη χωρική επαναχρησιμοποίηση που προστίθεται στο μεγαλύτερο κέρδος λήψης τους (μέγιστη ισχύς σήματος). Οι κατευθυντικές κεραίες οδηγούν σε χαμηλές παρεμβολές με σήματα από διαφορετικές διευθύνσεις. Από την άλλη μεριά, εμφανίζεται το πρόβλημα της 'κώφωσης' (ανικανότητα των σταθμών να ακούσουν από άλλες διευθύνσεις), ενώ το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού επιδεινώνεται. Με την προοπτική του περιορισμού αυτών των προβλημάτων στο φυσικό επίπεδο *MAC*, διάφορες προσαρμογές έχουν προταθεί όπως τα πρωτόκολλα Directional Network allocation Vector per sector, Directional MAC, Multihop RTS MAC (MMAC), κατευθυντικά *RTS* πλαίσια και ομοιοχατευθυντικά *CTS* και η χρήση του κυκλικού ή σαρωτικού *RTS* (ο εκπομπός στέλνει *RTS* σε όλες τις κατευθυντικές κεραίες). Περισσότερες πληροφορίες για τα παραπάνω πρωτόκολλα μπορούν να βρεθούν στο [1]. Όσον αφορά τη δρομολόγηση, το κύριο πρόβλημα προκύπτει από τη σάρωση η οποία προσθέτει καθυστέρηση. Η χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών στα αυτοργανούμενα δίκτυα θεωρείται ιδανική λύση καθώς μειώνει τον αριθμό των ενημερώσεων που αφορούν στην κατάσταση των συνδέσμων ανάλογα με την απόσταση από την πηγή. (Πιο αναλυτικά για τις κατευθυντικές κεραίες στο [1])

#### 2.1.4 Εφαρμογή

**Wi-Fi-IEEE 802.11:** παρέχει υπηρεσία τύπου *best – effort*. Οι αλγόριθμοι πρόσβασης του μέσου είναι:

- *DCF-κατανεμημένος*: Ένας κόμβος ακούει το μέσο και μεταδίδει μόνο όταν το μέσο είναι ανενεργό για περισσότερο από μία περίοδο *DIFS*, διαφορετικά αρχίζει έναν αντίστροφο μετρητή επιλέγοντας ως αρχή μέτρησης έναν τυχαίο αριθμό μεταξύ του μηδενός και του παραθύρου συμφόρησης.

Χρησιμοποιείται τεχνική *CRC* για ανίχνευση λαθών. Αν ο προορισμός λάβει ένα σωστό μήνυμα, στέλνει ένα πακέτο επιβεβαίωσης *ACK* αφού όμως το μέσο είναι ανενεργό για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από *SIFS* όπου *SIFS < DIFS*.

- *PCF-κεντροποιημένος*: Υπάρχει ένα κοινό σημείο πρόσβασης που καθορίζει τη χρησιμοποίηση του μέσου. Δεν υποστηρίζεται ποιότητα υπηρεσίας, και ο χρόνος πρόσβασης στο μέσο σπαταλάται από επιβεβαιώσεις, *ACKs* και διαστήματα μεταξύ των πακέτων - *SIFS, DIFS*.

## 2.2 Δίκτυα Αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν μια κατηγορία αυτοργανούμενων δικτύων, ικανά να επιτελέσουν σημαντικές λειτουργίες όπως επιτήρηση συστημάτων και διαστήματος, παρακολούθηση χώρων, ανίχνευση και εντοπισμός στόχων. Για το λόγο αυτό, βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορες περιοχές όπως είναι ο χώρος της υγείας, ο στρατός ακόμα και στο σπίτι. Οι αισθητήρες, οι οποίοι συνιστούν τους κόμβους ενός τέτοιου δικτύου, χαρακτηρίζονται από το μεγάλο αριθμό λειτουργιών που επιτελούν, το χαμηλό τους κόστος και το μικρό τους μέγεθος ενώ μπορούν να επικοινωνούν μόνο όταν βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός δικτύου αισθητήρων είναι η τυχαία εγκατάσταση και τοποθέτηση των κόμβων, η δυνατότητα αυτό-οργάνωσης, και η συνεργατική προσπάθεια, δεδομένου ότι επεξεργάζονται τα ληφθέντα δεδομένα με σκοπό να μεταδώσουν μόνο τη ζητούμενη πληροφορία. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά αυτοργανούμενα δίκτυα, τα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν αρκετές διαφορές, γεγονός που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη συλλογή δεδομένων από μεγάλο αριθμό κόμβων. Πρώτον, τα δίκτυα αισθητήρων απαρτίζονται συνήθως από μεγαλύτερο αριθμό κόμβων. Κατά συνέπεια, περισσότεροι κόμβοι με λιγότερες

δυνατότητες ισοδυναμούν με έναν και μόνο κόμβο υψηλότερης ακρίβειας αλλά και υψηλότερου κόστους. Δεύτερον, η πυκνότητα των κόμβων είναι μεγαλύτερη και οι αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου είναι συχνότερες. Εκτός από τους περιορισμούς υλικού (ενέργεια, μνήμη και υπολογιστική χωρητικότητα) και την υψηλότερη ευαισθησία λαθών, διαφοροποιήσεις παρατηρούνται και ως προς τον τρόπο επικοινωνίας, δεδομένου ότι τα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούν μετάδοση προς όλους (ευρυεκπομπή), ενώ τα αυτοργανούμενα δίκτυα επικοινωνούν με μετάδοση σημείο- προς -σημείο. Τέλος, τα δίκτυα αισθητήρων δεν αποδίδουν συνήθως στα μέλη τους αναγνωριστικά παγκόσμιας εμβέλειας για την ταυτοποίηση των κόμβων.

### 2.2.1 Αρχιτεκτονική

Οι παράμετροι σχεδιασμού ενός δικτύου αισθητήρων είναι οι εξής [5]:

- **Ανεκτικότητα λαθών.** Είναι η ικανότητα ενός δικτύου αισθητήρων να διατηρεί τη λειτουργικότητά του χωρίς να διακόπτεται εξαιτίας της απώλειας ενός ή περισσότερων κόμβων (εξάντληση ενέργειας, φυσική φυσική ή περιβαλλοντικές επιρροές). Ένα μέτρο της αξιοπιστίας είναι η πιθανότητα να μη σημειωθεί αποτυχία εντός ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος. Επίσης, η υψηλή πυκνότητα των κόμβων εξασφαλίζει εναλλακτικές επιλογές δρομολόγησης σε περίπτωση αποτυχίας των συνδέσμων επικοινωνίας.
- **Επεκτασιμότητα.** Είναι η δυνατότητα επέκτασης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, όσον αφορά τον αριθμό των κόμβων αλλά και την πυκνότητά τους, η οποία υπολογίζεται βάσει της σχέσης:  $m(R) = \frac{N \cdot \pi R^2}{A}$ . Η επεκτασιμότητα οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσοστό συνολικής κάλυψης

που ορίζεται ως η ένωση των μικρότερων περιοχών κάλυψης των κόμβων χαμηλότερου κόστους. Τα μοντέλα κάλυψης είναι είτε ντετερμινιστικά είτε στοχαστικά. Η πρώτη περίπτωση προϋποθέτει ότι οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες θέσεις είτε ομοιόμορφα ή σταθμισμένα (αν για παράδειγμα κάποιες περιοχές έχουν ανάγκη από καλύτερη επιτήρηση) ενώ στη δεύτερη οι κόμβοι είναι τυχαία κατανεμημένοι, οδηγώντας έτσι στην ανάπτυξη και το σχεδιασμό αλγορίθμων για τον υπολογισμό της κάλυψης τόσο στη χειρότερη όσο και στην καλύτερη περίπτωση όπως και στην εναλλαγή μεταξύ απενεργοποιημένης και ενεργοποιημένης κατάστασης με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος [6]. Η αποτελεσματικότητα τους εξαρτάται από την ένταση της κίνησης και του φορτίου στο δίκτυο.

- **Περιορισμοί υλικού.** Αφορούν τις απαιτήσεις για μικρό μέγεθος και χαμηλό βάρος, χαμηλή ισχύ, χαμηλό κόστος, ευκολία προσαρμογής σε αντίξοες συνθήκες, διαθεσιμότητα και αυτονομία. Το υλικό διαμορφώνεται από τα παρακάτω επίπεδα:

<b>Επίπεδο αισθητήρων<sup>4</sup></b>	Εκτελεί τη συλλογή δεδομένων από αντικείμενα που έχουν ανιχνευθεί.
<b>Επίπεδο επικοινωνίας<sup>5</sup></b>	Εκτελεί τις λειτουργίες της συσχέτισης, συμπίεσης, διανομής και δρομολόγησης των δεδομένων. Τα δεδομένα μεταδίδονται προς τον προορισμό, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την εξοικονόμηση ενέργειας όσο και την ασφάλεια (εφόσον υπάρχει επίπεδο ασφάλειας).
<b>Επίπεδο επεξεργασίας<sup>6</sup></b>	Επεξεργάζεται τα δεδομένα και τα συσχετίζει βάσει τεχνικών λήψης απόφασης, επεξεργασίας σήματος, συγκέντρωσης δεδομένων ( <i>data fusion</i> ), τεχνητής νοημοσύνης και την υπάρχουσα γνώση όσον αφορά στις επιδόσεις του δικτύου ώστε να παράγει τα τελικά αποτελέσματα της ανίχνευσης.
<b>Επίπεδο χρήστη</b>	Παρουσιάζει τα τελικά αποτελέσματα, παρέχοντας μία διεπαφή ανθρώπου-μηχανής αλλά και διαδραστικές λειτουργίες.
<b>Μονάδα ισχύος</b>	Μία μονάδα εύρεσης θέσεως ή ένας <i>mobilizer</i> ίσως είναι απαραίτητα ανάλογα με την εφαρμογή.
<b>Επιπρόσθετες λειτουργικές μονάδες</b>	i. <b>Μονάδα Διαχείρισης Πόρων</b> που παρακολουθεί τους διαθέσιμους πόρους ii. <b>Μονάδα Ελέγχου Τοπολογίας/Κάλυψης</b> που προσαρμόζει την τοπολογία του δικτύου και συγχρονίζει τους κόμβους

- Κόστος παραγωγής.** Μία παράμετρος που καθορίζει πόσο συμφέρουσα είναι οικονομικά η εγκατάσταση ασύρματων αισθητήρων σε σύγχριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες. Το κόστος ενός μεμονωμένου κόμβου πρέπει να παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.
- Τοπολογία δικτύου αισθητήρων.** Η εγκατάσταση, προ-εγκατάσταση και επανεγκατάσταση των αισθητήρων.
- Περιβάλλον.** Οι συνθήκες στην περιοχή όπου τοποθετούνται οι κόμβοι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο δεδομένου ότι οι κόμβοι λειτουργούν χωρίς επιτήρηση. Είναι επίσης σχεδιασμένοι ώστε να προσαρμόζονται σε δυσμενή και απαιτητικά περιβάλλοντα.

<sup>4</sup> αποτελείται από τους αισθητήρες και έναν μετατροπέα *ADC*

<sup>5</sup> γνωστό και ως πομποδέκτης

<sup>6</sup> περιλαμβάνει την μονάδα αποθήκευσης και τον επεξεργαστή

- **Μέσο Μετάδοσης.** Η πλειοψηφία των ασύρματων συνδέσεων εγκαθίστανται σε μέσα ραδιοσυχνοτήτων, υπέρυθρα ή οπτικά μέσα. Τα δύο τελευταία επιβάλλουν την οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη.
- **Κατανάλωση Ισχύος.** Οι περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι και η αδυναμία επαναφόρτισης καθιστούν επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης πρωτοκόλλων και αλγορίθμων που λαμβάνουν υπόψη τη διαθέσιμη ισχύ. Οι διαδικασίες που καταναλώνουν τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας είναι η ανίχνευση, η επικοινωνία και η επεξεργασία των δεδομένων. Η ενεργειακή ισορροπία μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω της συνεργασίας. Η διάρκεια ζωής ορίζεται ως ο χρόνος λειτουργίας μέχρι τη χρονική στιγμή που θα σημειωθεί για πρώτη φορά κατάρρευση ενός κόμβου ή απώλεια κάλυψης. Μπορεί ακόμα να οριστεί και ως το χρονικό διάστημα από το σημείο εκκίνησης μέχρι το σημείο εκείνο που κάποιες παράμετροι του δικτύου ξεπερνούν ένα καθορισμένο κατώφλι. Οι κόμβοι μπορούν να είναι σταθεροί ή κινητοί. Οι κινητοί έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τη θέση τους ή να ανανεώνουν τη συνδεσιμότητα τους με σκοπό τη βελτίωση της επιτήρησης ή της ποιότητας της επικοινωνίας και τη μείωση της απαραίτητης ισχύος μετάδοσης.
- **Ποιότητα.** Σχετίζεται με την ακρίβεια και το χρόνο μετάδοσης. Τα δίκτυα αισθητήρων οφείλουν να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες στους χρήστες, χωρίς μεγάλες καθυστερήσεις. Η ποιότητα εξασφαλίζεται εις βάρος της αποτελεσματικής κατανάλωσης ισχύος, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.
- **Απόδοση.** Η μεγιστοποίηση της από άκρο-σε-άκρο απόδοσης είναι επιτακτική ανάγκη όταν μεταδίδεται μεγάλος όγκος δεδομένων. Κάτι τέτοιο

οφείλεται στο περιορισμένο εύρος ζώνης και την υψηλή πυκνότητα των αισθητήρων.

Τα δίκτυα αισθητήρων είναι είτε ομογενή, δηλαδή όλοι οι κόμβοι έχουν πανομοιότυπες δυνατότητες και την ίδια λειτουργικότητα ή ετερογενή όταν κάθε κόμβος επιτελεί διαφορετική λειτουργία και έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Συνεπώς, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα ετερογενή δίκτυα παρουσιάζουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και δυσκολία στην εγκατάσταση. Οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές είναι:

1. *ανάλογα με τον μηχανισμό επικοινωνίας*:

- (α') **ΑΠΕΤΘΕΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗ** (*Directly connected*): κάθε αισθητήρας επικοινωνεί απευθείας με τον προορισμό. Αυτό οδηγεί σε υψηλό κόστος και κατ' επέκταση μεγάλη αναποτελεσματικότητα, ιδιαίτερα στα δίκτυα μεγάλης κλίμακας.
- (β') **ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΥΤΟΡΓΑΝΩΤΜΕΝΑ** (*Flat ad hoc*): κάποιοι αισθητήρες αναλαμβάνουν λειτουργίες αναμετάδοσης πακέτων, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό, πολυβηματική μετάδοση μικρής εμβέλειας, που είναι ενεργειακά αποτελεσματική. Ωστόσο, οι κόμβοι με τη μεγαλύτερη εγγύτητα στον προορισμό έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εξαντλήσουν τη διαθέσιμη ενέργεια τους πολύ γρήγορα οδηγώντας στην αποσύνδεση του δικτύου.
- (γ') **PEER – TO – PEER ΠΟΛΥΒΗΜΑΤΙΚΗ**: ομαδοποίηση ενός επιπέδου.
- (δ') **CLUSTER – BASED ΠΟΛΥΒΗΜΑΤΙΚΗ**: οι κόμβοι διαμορφώνουν ομάδες, κάθε μία εκ των οποίων έχει το δικό της επικεφαλής που είναι υπεύθυνος αφενός για τη συλλογή δεδομένων στην περιοχή

του, δηλαδή τοπικά, και αφετέρου για την κατηγοριοποίησή τους. Οι επικεφαλής κόμβοι χαμηλότερου επιπέδου προωθούν δεδομένα σε εκείνους ανώτερου επιπέδου, γεγονός που οδηγεί στη μείωση του όγκου της πληροφορίας που μεταδίδεται αλλά ταυτόχρονα, αυξάνει το ρυθμό κατανάλωσης της ισχύος.

2. *ανάλογα με τη συγκέντρωση δεδομένων:*

- (α') **ΚΕΝΤΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ** (*Centralized*): όλες οι αναφορές κόμβων μεταδίδονται προς τον προορισμό χωρίς καθυστέρηση. Η περιορισμένη χωρητικότητα και τα προβλήματα συγχρονισμού είναι πιθανό να αποτρέψουν την εξαγωγή των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Αυτός ο τρόπος σχεδιασμού ενδείκνυται για καλύτερη ανίχνευση και παρακολούθηση στόχου.
- (β') **ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ** (*Localized*): η υψηλή συσχέτιση των δεδομένων που προέρχονται από γειτονικούς κόμβους επιτρέπει την κατανεμημένη συλλογή τους οδηγώντας έτσι σε χαμηλότερο κόστος και μειωμένο όγκο μεταδιδόμενης πληροφορίας.
- (γ') **ΥΒΡΙΔΙΚΗ** (*Hybrid*): συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των χαρακτηριστικών των δικτύων αισθητήρων είναι τα ακόλουθα:

- **Μοντέλα κίνησης.** Οι παράμετροι της κινητικότητας των δικτύων αισθητήρων εξαρτώνται από την κατάσταση λειτουργίας και διαχρίνονται ως:
  - **Σταθερής κατάστασης** που βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ακριβής και ενημερωμένη εκτίμηση του πεδίου που μελετάται. Προϋποτίθεται σταθερή ροή πληροφορίας.

- *Ad hoc request-response mode* που χρησιμοποιούνται όταν οι αισθητήρες απαντούν στις αιτήσεις του συλλέκτη. Είναι ο μοναδικός τρόπος λειτουργίας που εγκαθιστά αμφίδρομη επικοινωνία ανάμεσα στο συλλέκτη και τους υπόλοιπους κόμβους.
- *Ad hoc threshold-based mode* που χρησιμοποιούνται όταν η μετάδοση πληροφορίας προκαλείται από ένα συμβάν κατά το οποίο μία από τις παραμέτρους που εξετάζονται και παρακολουθούνται υπερβαίνει ένα καθορισμένο κατώφλι.
- *Μοντέλα Ενέργειας και Μπαταρίας.* Τα μοντέλα ενέργειας αφορούν στον υπολογισμό και τη μετάδοση της ισχύος, που συνίσταται στην απαραίτητη ενέργεια για ανίχνευση, συλλογή, επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων. Τα μοντέλα που λειτουργούν με μπαταρία σχετίζονται με τη χωρητικότητα της μπαταρίας και τη συνολική συμπεριφορά. Σύμφωνα με το [7], τα μοντέλα είναι (α) γραμμικά (β) εξαρτώμενα από το ρυθμό αποφόρτισης (λαμβάνεται υπόψη η επιδραση του ρυθμού αυτού στη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας) και (γ) απενεργοποίησης.

Ένα ακόμα ζήτημα που αξίζει να αναφερθεί είναι η κατανομή της συνδεσιμότητας και πως επηρεάζεται από την ακτίνα μετάδοσης, την πυκνότητα καθώς και τη θέση όπου έχουν τοποθετηθεί οι κόμβοι. Οι *Zhu* και *Papavassiliou* [6] περιγράφουν ένα μοντέλο [2.5] για τη συνδεσιμότητα του αυτοργανούμενου δικτύου το οποίο στηρίζεται στις διαδικασίες που συντελούνται κατά την εξέλιξη ενός δικτύου, δηλαδή την προσθαφαίρεση ή την αναδιάταξη των συνδέσεων. Τα συμπεράσματα αναδεικνύουν τη συσχέτιση της πιθανότητας πρόσθησης, αναδιάταξης ή αφαίρεσης συνδέσμων με την συνδεσιμότητα του συστήματος. Ανάλογα με τη διαδικασία, η συνδεσιμότητα συνήθως ακολουθεί κανονική κατανομή με τις κύριες διαφορές να εντοπίζονται στη μεταβατική περίοδο.

Η ποιότητα υπηρεσίας, ιδιαίτερα η αξιοπιστία, η ενεργειακή αποτελεσματικότητα καθώς και η υψηλή ρυθμαπόδοση εξασφαλίζονται μέσω της βελτιστοποίησης της τοπολογίας που συνίσταται στις αλλαγές της συνδεσιμότητας. Στα πολυβηματικά αυτοργανούμενα δίκτυα, η ποιότητα της υπηρεσίας είναι ακόμα πιο δύσκολο να επιτευχθεί καθώς η αποκεντροποίηση των κόμβων προϋποθέτει ότι κάθε ένας πρέπει να μεταδίδει με τόση ισχύ, όση απαιτείται προκειμένου να εξασφαλίζεται η συνολική συνδεσιμότητα του δικτύου. Όσον αφορά τα μεγάλης κλίμακας δίκτυα, οι *Zhu* και *Papavassiliou* έδειξαν ότι η συνδεσιμότητα ακολουθεί μία *Poisson* κατανομή με παράμετρο που εξαρτάται από την πυκνότητα και την ακτίνα μετάδοσης των κόμβων. Επιπρόσθετα, στην εν λόγω μελέτη λαμβάνεται ειδική μέριμνα για την κατανάλωση ισχύος καθώς και το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων.

### 2.2.2 Στοίβα πρωτοκόλλων

**Φυσικό στρώμα:** οι λειτουργίες που επιτελούνται είναι η επιλογή συχνότητας, η διαμόρφωση (απλή δυαδική, ή M-ψηφίων που είναι καλύτερη αλλά με υψηλότερη κατανάλωση ισχύος και πολυπλοκότητα), η κωδικοποίηση δεδομένων και δύο λειτουργίες που αφορούν κυρίως το υλικό: δημιουργία φέρουσας συχνότητας και ανίχνευση σήματος. Επιπλέον το φυσικό στρώμα μεριμνά και για την ενεργειακή απόδοση.

**Στρώμα Ελέγχου Ζεύξης:** έχει σχέση με την πολυπλεξία της ροής δεδομένων, την ανίχνευση πλαισίου, πρόσβαση στο μέσο και έλεγχο σφάλματος και εγγυάται επικοινωνία σημείο - προς - σημείο και σημείο - προς - πολλαπλά σημεία. Όσον αφορά την πρόσβαση στο μέσο, τα πρωτόκολλα *MAC* πρέπει να εξασφαλίζουν τη δημιουργία μιας υποδομής για το δίκτυο και τη δίκαι-

Πίνακας 2.6: Πρωτόκολλα *Mac* στα Δίκτυα Αισθητήρων

<i>MAC protocol [5]</i>	<i>Πρόσβαση στο μέσο</i>	<i>Πλεονεκτήματα</i>	<i>Κατανάλωση ισχύος</i>
<i>SMAC\$ and EAR</i>	Σταθερή εκχώρηση αμφιδρομών χρονοσχισμών σε σταθερή συχνότητα	Εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης	Απενεργοποίηση του δέκτη όταν είναι αδρανής
<i>Hybrid TDMA – FDMA</i>	Κεντροποιημένη συχνότητα και διαιρέση χρόνου	Βέλτιστος αριθμός καναλιών για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος	Προσέγγιση βάσει υλικού
<i>CDMA – based</i>	Ανταγωνιστική και τυχαία πρόσβαση στο μέσο	Αλλαγή φάσης και καθυστέρηση πριν τη μετάδοση	Συνεχής ακρόαση του μέσου

η κατανομή των επικοινωνιακών πόρων μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων. Τα υπάρχοντα πρωτόκολλα *MAC* (κυψελωτά συστήματα, *Bluetooth*, *MANET*) δεν είναι εφαρμόσιμα καθώς προϋποθέτουν την ύπαρξη ενός κεντρικού πράκτορα ελέγχου ενώ η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας έχει δευτερεύουσα σημασία. Οι λύσεις που προτείνονται προς την κατεύθυνση αυτή είναι ο τρόπος λειτουργίας με γνώμονα την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και η προτίμηση της λήξης χρόνου έναντι των *ACKs*. Η απενεργοποίηση του αναμεταδότη όταν δεν χρησιμοποιείται για μετάδοση είναι ένας τρόπος λειτουργίας που μειώνει την κατανάλωση ισχύος και είναι δυνατόν να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση μόνο σε περίπτωση που το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο κόμβος είναι σε αυτή την κατάσταση υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι.

Ο Πίνακας 2.6 περιέχει μία σύντομη περιγραφή των *MAC* πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων.

Όσον αφορά τον έλεγχο σφαλμάτων, αναφέρονται δύο λειτουργίες: forward error correction (FEC) and automatic repeat request (ARQ). Το ARQ προσθέτει το κόστος της αναμετάδοσης και την επιπλέον πληροφορία-overhead. Το *FEC* αποδίδει μόνο όταν οι κωδικοί σφαλμάτων είναι απλοί, με μικρή πολυπλοκότητα κατά την κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση - στα δί-

κτυα αισθητήρων συνίσταται η εγκατάσταση ενός αποκωδικοποιητή *Viterbi*. Δείκτης αξιοπιστίας των συνδέσεων είναι ο ρυθμός των λανθασμένων ψηφίων (*BER*).

**Το Στρώμα Δικτύου** είναι σχεδιασμένο με γνώμονα τη σωστή διαχείριση ενέργειας, την αποτελεσματική αξιοποίηση της συλλογής δεδομένων, τη γνώση της τοπολογίας του δικτύου ενώ λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι τα δίκτυα αισθητήρων στηρίζονται στη συλλογή δεδομένων (*data-centric nature of sensor networks*) και ότι μας ενδιαφέρει κυρίως να εξετάσουμε μία ιδιότητα του φαινομένου παρά να μελετάμε κάθε κόμβο ζεχωριστά (*attribute-based naming*). Η δρομολόγηση βάσει δεδομένων σημαίνει ότι η ανάθεση εργασιών στους επιμέρους κόμβους προϋποθέτει την εκδήλωση ενδιαφέροντος. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις: είτε ο προορισμός εκδηλώνει ενδιαφέρον ή οι κόμβοι γνωστοποιούν τα διαθέσιμα δεδομένα και αναμένουν για αιτήσεις. Μία ενεργειακά αποδοτική διαδρομή αντιστοιχεί σε εκείνη με τη μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια, ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ, ελάχιστο αριθμό βημάτων και μέγιστη διαθέσιμη ισχύ κόμβου. Το στρώμα δικτύου θα πρέπει να επιτρέπει τη διαδικτύωση με εξωτερικά δίκτυα. Άλλοι τρόποι μετάδοσης δεδομένων είναι η πλημμύρα, το *gossiping* - δηλαδή η αποστολή δεδομένων σε τυχαία επιλεγόμενους γείτονες, πρωτόκολλα για πληροφορία μέσω διαπραγμάτευσης, δρομολόγηση βάσει ανάθεσης αυξόντων αριθμών, κατευθυνόμενη διάδοση, ιεραρχία ομαδοποίησης χαμηλής ισχύος και δίκτυο επικοινωνιών χαμηλής ενέργειας που προϋποθέτει την παραγωγή υπογράφου από τον υπάρχοντα γράφο με τις διαδρομές ελαχίστου κόστους [5].

Το **Στρώμα Μεταφοράς** είναι απαραίτητο προκειμένου το σύστημα να είναι προσβάσιμο από το Διαδίκτυο και άλλα εξωτερικά δίκτυα. Το *TCP* πρωτόκολ-

λο δεν μπορεί να εφαρμοστεί εξαιτίας των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν τα δίκτυα αισθητήρων. Η διαίρεση του *TCP* ή (*TCP – splitting*) ίσως είναι απαραίτητη για να καταστεί δυνατή η αλληλεπίδραση με άλλα δίκτυα. Σε αυτό το πρωτόκολλο, ο προορισμός είναι το άκρο της *TCP* σύνδεσης και η επικοινωνία ανάμεσα στο χρήστη και τον προορισμό εξασφαλίζεται από το *UDP* ή *TCP* μέσω Διαδικτύου ή δορυφόρου.

Στο **Στρώμα εφαρμογής**, τα αντίστοιχα πρωτόκολλα του στρώματος αυτού απαιτούν περαιτέρω έξέταση. Ωστόσο, τα τρία πιθανότερα είναι το πρωτόκολλο διαχείρισης αισθητήρων, το πρωτόκολλο ανάθεσης εργασιών και γνωστοποίησης δεδομένων και το πρωτόκολλο αίτησης και διάδοσης πληροφορίας [5].

## 2.3 Scale-Free Δίκτυα

Τα *Scale-Free* Δίκτυα ή διαφορετικά, Δίκτυα Χωρίς Κλίμακα αποτελούν μία κατηγορία δικτύων κατάλληλη για την περιγραφή των κοινωνικών δικτύων. Τα κοινωνικά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση διάφορων φαινομένων που δημιουργεί η κοινωνική δραστηριότητα, παρουσιάζουν ιδιαίτερα και πολύπλοκα γνωρίσματα όσον αφορά στην αρχιτεκτονική και τη δομή τους. Η πολυπλοκότητα αυτή οφείλεται κυρίως στον τρόπο με τον οποίο είναι διασυνδεδεμένοι οι κόμβοι, αλλά και στη μεταξύ τους αλληλεπίδραση καθώς το δίκτυο εξελίσσεται. Μέχρι πριν μερικά χρόνια, όλα τα σύνθετα δίκτυα θεωρούνταν τυχαία. Στα τυχαία δίκτυα, ή εκθετικά όπως λέγονται διαφορετικά, οι κόμβοι ακολουθούν κατανομή *Poisson* με σχήμα καμπάνας, ενώ η πιθανότητα ένας κόμβος να συνδέεται με  $k$  άλλους μειώνεται εκθετικά για μεγάλες τιμές του  $k$ , γεγονός που αιτιολογεί τον όρο εκθετικός (για τα δίκτυα αυτού του τύπου). Έτσι, είναι εξαιρετικά απίθανο να υπάρξουν κόμβοι με πολύ περισσότερες ή λιγότερες συνδέσεις από το μέσο όρο. Οι *Barabasi* και *Bonabeau*

[9], κατά τη διάρκεια μίας εργασίας με σκοπό την απεικόνιση του Παγκόσμιου Ιστού εισήγαγαν τον όρο *scale – free* για να χαρακτηρίσουν τα δίκτυα που δεν εμφανίζουν καμίας μορφής κλίμακα και στα οποία επικρατούν λίγοι κόμβοι με εξαιρετικά μεγάλο αριθμό συνδέσεων. Αυτοί οι κόμβοι, γνωστοί με τον όρο *hubs*, έχουν μεγάλο αριθμό συνδέσεων. Ωστόσο, στα δίκτυα αυτά, η πλειοψηφία των κόμβων έχουν μικρό αριθμό συνδέσεων και δεν υπάρχει ομοιομορφία μεταξύ των κόμβων. Τα *scale – free* δίκτυα έχουν αυστηρή αρχιτεκτονική, ακολουθούν θεμελιώδεις κανόνες και εμφανίζουν σημαντικές ιδιότητες δεδομένου ότι συμπεριφέρονται με ένα συγκεκριμένο και προβλέψιμο τρόπο. Είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε τυχαίες βλάβες αλλά και εξαιρετικά επιρρεπή σε οργανωμένες επιθέσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι *Jeong* και *Albert* έδειξαν ότι η κατανομή του αριθμού των συνδέσεων κάθε κόμβου ακολουθεί νόμο δύναμης: η πιθανότητα ένας οποιοσδήποτε κόμβος να συνδέεται με  $k$  άλλους είναι ανάλογη του  $\frac{1}{k^n}$ , με τον αριθμό  $n$  για τις εισερχόμενες συνδέσεις να προσεγγίζει το 2. Οι νόμοι δύναμης διαφέρουν σε σχέση με την κατανομή-καμπάνα που χαρακτηρίζει τα τυχαία δίκτυα. Πρόκειται για μία μονότονα φθίνουσα συνάρτηση χωρίς κορυφή, σε αντίθεση με την καμπύλη σχήματος καμπάνας. Συνεπώς, η κατανομή των συνδέσεων δεν είναι ‘δημοκρατική’, κάτι που δε συμβαίνει στα τυχαία δίκτυα. Υπάρχουν δηλαδή λίγοι κόμβοι με μεγάλο αριθμό συνδέσεων, οι οποίοι κυριαρχούν στο δίκτυο, και πολλοί άλλοι κόμβοι με μικρό αριθμό συνδέσεων.

Σύμφωνα με το μοντέλο τυχαίων γράφων των Erdős and Rényi [ER model], ξεκινώντας με  $N$  κόμβους, και συνδέοντας κάθε ζευγάρι κορυφών με πιθανότητα  $p$ , η πιθανότητα μία κορυφή να έχει  $k$  ακμές ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή. Μία προσέγγιση αυτής είναι η κατανομή *Poisson* όπου  $P(k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}$  και  $\lambda = N * \binom{(N-1)}{k} * p^k (1-p)^{N-1-k}$ . Ωστόσο, το μοντέλο αυτό δεν λαμβάνει υπόψη δύο γενικούς μηχανισμούς. Ο πρώτος είναι η

επέκταση του δικτύου, εφόσον ο τρόπος με τον οποίο εξελίσσεται ένα δίκτυο αποδεικνύει ότι οι νέοι κόμβοι τείνουν να συνδεθούν με τους υπάρχοντες. Ο δεύτερος είναι η επιλεκτική επικόλληση, όπως ονομάζεται, δηλαδή το γεγονός ότι κάποιοι κόμβοι προτιμώνται έναντι των υπολοίπων για διάφορους λόγους. Αυτός ο μηχανισμός τείνει να είναι γραμμικός. Για παράδειγμα, ένας νέος κόμβος είναι δύο φορές πιθανότερο να συνδεθεί με έναν υπάρχοντα κόμβο  $2 * n$  συνδέσεων παρά με έναν άλλο με  $n$  συνδέσεις. Στην περίπτωση που ο μηχανισμός της επέκτασης είναι γρηγορότερος από το γραμμικό, καταλήγουμε σε μία τοπολογία αστέρα με έναν κεντρικό κόμβο. Κατά συνέπεια, η πιθανότητα ένας νέος κόμβος να συνδεθεί με έναν υπάρχοντα δεν είναι ομοιόμορφη αλλά αντιθέτως, είναι υψηλότερη όταν ο υπάρχων κόμβος έχει μεγαλύτερη συνδεσιμότητα, γεγονός που οδηγεί στην εμφάνιση κόμβων - *hubs*. Συμπεραίνουμε ότι τα δίκτυα μεγάλης κλίμακας αυτο-οργανώνονται σε μία δομή χωρίς κλίμακα και η πιθανότητα ένας κόμβος που αλληλεπιδρά με  $k$  άλλους μειώνεται ακολουθώντας ένα νόμο δύναμης όπου  $P(k) \sim k^\gamma$ , με τον εκθέτη  $\gamma$  ανάμεσα στο 2.1 και το 4. Αυτό μπορεί να απλοποιήσει σημαντικά την ανάλυση μεγάλων και σύνθετων δικτύων με τυχαία δομή και τοπολογία. Η παράμετρος  $\gamma$  έχει υπολογιστεί και ισούται με 3.

*Απόδειξη.* : Ο ρυθμός εισαγωγής ακμών για μία κορυφή είναι:

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{k_i}{2t} \Rightarrow k_i(t) = m \left( \frac{t}{t_i} \right)^{0.5}$$

Η πιθανότητα μία κορυφή  $i$  να έχει συνδεσιμότητα μικρότερη από  $k$ ,  $P(k_i(t) < k)$ , γράφεται ως  $P(t_i > \frac{m^2 t}{k^2})$ .

Υποθέτωντας ότι προσθέτουμε τις κορυφές σε ίσα χρονικά διαστήματα, ισχύει ότι:

$$P(t_i > \frac{m^2 t}{k^2}) = 1 - P(t_i \leq \frac{m^2 t}{k^2}) = 1 - \frac{m^2 t}{k^2} (t + m_0)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $P(k)$  είναι

$$P(k) = \frac{dP(k_i(t) < k)}{dk} = \frac{2m^2}{k^3} \sim k^{-\gamma}$$

'Ετσι,  $\gamma = 3$

□

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στην κατεύθυνση της μελέτης και των δύο αυτών μηχανισμών, οι οποίοι συμβάλλουν στην εμφάνιση της κατανομής που ακολουθεί ένα νόμο δύναμης, κατά την ανάλυση των *scale-free* δικτύων. Έχει αποδειχθεί ότι μοντέλα που έλαβαν υπόψη μόνο έναν από τους δύο μηχανισμούς απέτυχαν στην ανάδειξη του βασικού γνωρίσματος που χαρακτηρίζει τα δίκτυα αυτού του τύπου [8]. Προκειμένου να ενσωματωθεί ο επεκτατικός χαρακτήρας του δικτύου, τοποθετείται αρχικά ένας μικρός αριθμός  $m_0$  κόμβων, και σε κάθε βήμα προστίθεται ένας νέος κόμβος με  $t < m_0$  ακμές που τον συνδέουν με  $t$  διαφορετικούς προϋπάρχοντες κόμβους. Προκειμένου να ενσωματωθεί η επιλεκτική επικόλληση, υποθέτουμε ότι η πιθανότητα  $\Pi$  ένας νέος κόμβος να συνδεθεί με έναν κόμβο  $i$  εξαρτάται από τη συνδεσιμότητα  $k_i$  του συγκεκριμένου κόμβου, έτσι ώστε  $\Pi(k_i) = \sum_j^{k_i} \frac{1}{k_j}$ . Μετά από  $t$  χρονικές στιγμές το μοντέλο οδηγεί σε ένα τυχαίο δίκτυο με  $t+m_0$  κορυφές και  $m_t$  ακμές. Ακόμα, ένα σωστό μοντέλο πρέπει να εξασφαλίζει μία χρονικά ανεξάρτητη κατανομή οδηγώντας σε ανεξαρτησία από το μέγεθος, δεδομένου ότι αυτό είναι ίσο με  $m_0 + t$ . Συνεπώς, γίνεται εμφανές το χαρακτηριστικό της αυτό-οργάνωσης.

Ανάμεσα στους παράγοντες που ενδεχομένως να οδηγούσαν σε ένα ελαφρώς διαφοροποιημένο αποτέλεσμα είναι ο μη-γραμμικός χαρακτήρας της επιλεκτικής

επικόλλησης, η ύπαρξη κατευθυνόμενων ακμών και οι αλλαγές της τοπολογίας πέρα από την εισαγωγή νέων κόμβων όπως η αναδιάταξη και/ή αφαίρεση των κόμβων.

Παραδείγματα *scale-free* και μη *scale-free* δικτύων παρατιθενται στους πίνακες 2.7 και 2.8 αντίστοιχα.

Πίνακας 2.7: Δίκτυα *scale-free*

ΔΙΚΤΥΑ	ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ
Κυτταρικός Μεταβολισμός	Μόρια που εμπλέκονται στη μετατροπή φαγητού σε ενέργεια	Συμμετοχή στην ίδια βιοχημική αντίδραση
Hollywood	Ηθοποιοί	Εμφάνιση στην ίδια ταινία
Παγκόσμιος Ιστός	Ιστοσελίδες	Σύνδεσμοι ( <i>Urls</i> )
Αναφορές	Επιστημονικές Διατριβές	Συνδέσεις με άλλα άρθρα που αναφέρονται σε μία διατριβή
Συμμαχίες	Εταιρίες	Συνεργασίες
Διαδίκτυο	Δρομολογητές	Οπτικές και φυσικές συνδέσεις

Πίνακας 2.8: Μη *scale-free* δίκτυα

ΔΙΚΤΥΑ	ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ
Οδικό Δίκτυο στις ΗΠΑ	Αυτοκινητόδρομοι	Διασταυρώσεις
Επιστήμη Τλικών	Άτομα	Συνδέσεις με άλλα άτομα

## Η κύρια αδυναμία

Ένα σημαντικό ζήτημα ανακύπτει σε σχέση με την αξιοπιστία του δικτύου. Σε αντίθεση με τους τυχαίους γράφους, τα *scale-free* δίκτυα είναι ανθεκτικά στις τυχαίες βλάβες. Αυτό οφείλεται στην ανομοιογένεια τους, καθώς η πιθανότητα να αφαιρεθεί ή να τεθεί εκτός λειτουργίας εξαιτίας κάποιας βλάβης ένας κόμβος - *hub* είναι πολύ μικρή, όταν η επιλογή του κόμβου είναι τυχαία. Από την άλλη, η πιθανότητα να αφαιρεθούν μικροί κόμβοι, με λιγότερες συνδέσεις, είναι υψηλότερη, γεγονός που εγγυάται τη συνεκτικότητα του δικτύου και την αποφυγή του φαινομένου της τμηματοποίησης<sup>7</sup>. Ωστόσο, γίνεται ξεκάθαρο

<sup>7</sup> όταν το δίκτυο σχηματίζει μικρότερες νησίδες χωρίς δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους.

ότι η κατάργηση μεγάλου αριθμού κεντρικών κόμβων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαταράξεις, θέτοντας το σύστημα σε κίνδυνο και αυξάνοντας την ευαισθησία του σε επιθέσεις.

Η Αχίλλειος Πτέρνα των *scale – free* δίκτυων θέτει το ερώτημα για τον αριθμό των κεντρικών κόμβων που είναι απαραίτητοι. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, η ταυτόχρονη καταστροφή του 5% εώς 15% των κεντρικών κόμβων είναι ικανή να οδηγήσει σε κατάρρευση του συστήματος. Ανάλογα με το σκοπό που επιτελείται κάθε φορά, υπάρχουν δίκτυα που ευνοούνται από την ύπαρξη κεντρικών κόμβων, ενώ σε άλλα αυτού του είδους οι κόμβοι είναι ανεπιθύμητοι.

### *Scale – Free Epidemics*

Σύμφωνα με τη θεωρία της διάχυσης, υπάρχει μία κρίσιμη τιμή κατωφλίου όσον αφορά την εξάπλωση ενός ιού σε έναν πληθυσμό. Τα *Scale – free* δίκτυα παρουσιάζουν μηδενικό επιδημικό κατώφλι [9] που σημαίνει ότι οποιοσδήποτε ιός, τελικά θα εξαπλωθεί στα δίκτυα αυτά. Η εξήγηση που δίνεται στηρίζεται στο ότι τουλάχιστον ένας κεντρικός κόμβος τείνει να μολυνθεί εξαιτίας των πολλών συνδέσεών του, μεταδίδοντας με τον τρόπο αυτό τον ιό σε πολλούς κόμβους και μολύνοντας έτσι ολόκληρο το δίκτυο. Κατά συνέπεια, η αποτελεσματική προστασία επιτυγχάνεται με την ανοσοποίηση όλων των κόμβων ανεξαιρέτως. Η ιδέα της ανοσοποίησης ενός μικρού τμήματος του πληθυσμού προϋποθέτει την αναγνώριση των κεντρικών κόμβων, γεγονός που αποτελεί δύσκολο έργο όταν πρόκειται για σύνθετα δίκτυα. Επίσης, είναι επιτακτικό να γίνεται έλεγχος τόσο του αριθμού των συνδέσεων όσο και της χρονικής διάρκειας επαφής μεταξύ τους. Από την άλλη μεριά, η εξάπλωση επιδημιών στοχεύοντας κεντρικούς κόμβους θα μπορούσε να αποβεί μια ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος στον επιχειρησιακό τομέα. Δεν είναι δυνατόν να μετατραπεί ένα οποιοδήποτε δίκτυο σε δίκτυο *scale – free*. Κατά την εξέταση ενός δικτύου είναι σημαντική η

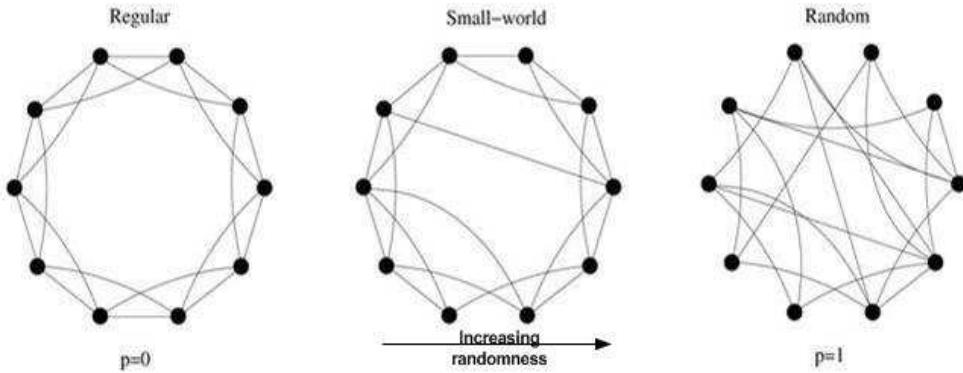
μελέτη των συνδέσεων και των κόμβων ξεχωριστά αλλά και των χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο πιθανώς να είναι ταυτόχρονα συνεκτικό και άνευ κλίμακας όταν μικρές, διασυνδεδεμένες ομάδες κόμβων συνδέονται με μεγαλύτερες, λιγότερο συνεκτικές ομάδες, όπως συμβαίνει με τον Παγκόσμιο Ιστό.

## 2.4 Δίκτυα Τύπου Μικρού Κόσμου

‘*Small – world*’ ή αλλιώς ‘*Δίκτυα Τύπου Μικρού κόσμου*’ - όπως πρόσφατα εισηγήθηκαν οι *Watts and Strogatz* [10] - είναι μία ονομασία που προέρχεται από το φαινόμενο μικρού-κόσμου και χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει δίκτυα που δεν είναι ούτε κανονικά ούτε τυχαία καθώς μπορεί να είναι σε μεγάλο βαθμό ομαδοποιημένα, όπως τα κανονικά πλέγματα, αλλά ταυτόχρονα έχουν και μικρό χαρακτηριστικό μέσο μήκος μονοπατιού, όπως οι τυχαίοι γράφοι. Επομένως τα δίκτυα μικρού-κόσμου μπορούν να τοποθετηθούν κάπου ανάμεσα στις δύο παραπάνω ακραίες περιπτώσεις. Το φαινόμενο μικρού-κόσμου αναφέρεται συχνά στο φαινόμενο των έξι βαθμών διαχωρισμού (‘six degrees of separation’) [11] καθώς το μέσο μήκος μονοπατιού μεταξύ των κόμβων των δικτύων αυτών είναι περίπου έξι βήματα.

Η μετάβαση σε ένα δίκτυο μικρού-κόσμου είναι δυνατή αν ξεκινήσουμε από ένα κυκλικό πλέγμα με  $n$  κορυφές και  $k$  ακμές σε κάθε κορυφή αντίστοιχα και επανασυνδέσουμε κάθε ακμή τυχαία με πιθανότητα  $p$  δημιουργώντας συντομεύσεις (Σχήμα 2.1). Γνωρίζοντας ότι οι τιμές  $p = 0$  και  $p = 1$  αντανακλούν την κανονικότητα και την τυχαιότητα αντίστοιχα, συμπεραίνουμε ότι η περιοχή τιμών  $0 < p < 1$  αντιστοιχεί σε μία μέση κατάσταση μεταξύ κανονικότητας και τυχαιότητας.

Η διαδικασία μετάβασης σε ένα δίκτυο μικρού-κόσμου εκτιμάται με βάση



$\Sigma\chi\nu\mu\alpha\ 2.1:$  Μετάβαση από κανονικό πλέγμα σε ‘small – world’ και ‘random graph’

τους παρακάτω δείκτες :

1. **Χαρακτηριστικό μήκος μονοπατιού**  $L(p)$  ως ο αριθμός των ακμών στο συντομότερο μονοπάτι μεταξύ δύο κορυφών (γενική ιδιότητα του δικτύου).
2. **Συντελεστής ομαδοποίησης**  $C(p)$  ως ο αριθμός των ακμών μεταξύ μίας κορυφής και των γειτόνων της (τοπική ιδιότητα του δικτύου).

Η μόνη απαίτηση για την επίτευξη της μετατροπής είναι ότι οι συντομεύσεις πρέπει τυπικά να συνδέουν κορυφές οι οποίες διαφορετικά θα βρίσκονταν σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση (η απόσταση μετριέται σε βήματα) από το μέσο μήκος μονοπατιού τυχαίου γράφου  $L_{random}$ . Το κανονικό πλέγμα ( $p = 0$ ) είναι ισχυρά ομαδοποιημένο, σχηματίζοντας ένα δίκτυο μεγάλου κόσμου όπου το  $L$  αυξάνεται γραμμικά με το  $n$ , ενώ το τυχαίο δίκτυο για  $p = 1$  είναι ασθενώς ομαδοποιημένο, όπως ένα δίκτυο μικρού-κόσμου όπου το  $L$  αυξάνεται μόνο λογαριθμικά με το  $n$ . Ωστόσο, υπάρχει ένα μεγάλο διάστημα τιμών της πιθανότητας  $p$ , στο οποίο το μήκος  $L(p)$  είναι σχέδόν τόσο μικρό όσο το χαρακτηριστικό μήκος ενός τυχαίου γράφου  $L_{random}$  και για το συντελεστή ομαδοποίησης

ισχύει  $C(p) >> C_{random}$ , και επομένως το δίκτυο παρουσιάζει ομαδοποίηση. Τα παραπάνω είναι αποτελέσματα της εισαγωγής ακμών - συντομεύσεων - μεγάλου εύρους που οδηγούν σε άμεση μείωση του  $L(p)$ . Οι νέες ακμές συνδέουν κορυφές του γράφου που διαφορετικά θα απείχαν πολύ περισσότερο από  $L_{random}$ . Για μικρές τιμές  $p$ , κάθε συντόμευση έχει ισχυρά μη γραμμική επίδραση στο  $L$ , συστέλλοντας την απόσταση όχι μόνο μεταξύ των κορυφών που συνδέει, αλλά και μεταξύ των γειτόνων τους, ενώ έχει γραμμική επίδραση στο συντελεστή  $C$  εξαιτίας των ακμών που αποσπώνται από την ομάδα για να πραγματοποιηθούν οι συντομεύσεις. Επομένως, το  $C(p)$  παραμένει πρακτικά αμετάβλητο ακόμα και αν το χαρακτηριστικό μήκος  $L(p)$  μειωθεί απότομα.

Εργασία πάνω στην εξάπλωση των μολυσματικών ασθενειών - προκειμένου να ταυτοποιηθεί η λειτουργική σημασία της συνδεσιμότητας των δικτύων μικρού-κόσμου για τα δυναμικά συστήματα - απέδειξε ότι η χρήσιμη μολυσματικότητα  $r_{half}$ , στην οποία η ασθένεια μολύνει το μισό πληθυσμό, μειώνεται απότομα για μικρές πιθανότητες  $p$ , ενώ για μία ασθένεια ικανή να μολύνει ολόκληρο τον πληθυσμό ανεξάρτητα από τη δομή του, ο χρόνος  $T(p)$  που απαιτείται για συνολική μόλυνση προσεγγίζει την καμπύλη του  $L(p)$  [10]. Έτσι, η συνδεσιμότητα (μικρού μέσου μήκους μονοπατιού μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων) των δικτύων μικρού-κόσμου ευθύνεται για τη γρήγορη και εύκολη ανάπτυξη των μολυσματικών ασθενειών σε δίκτυα τέτοιου τύπου.

Ένα ανησυχητικό και λιγότερο προφανές ζήτημα είναι ο αριθμός των συντομεύσεων που χρειάζονται για τη μετατροπή του γράφου σε τύπου μικρού-κόσμου.

Το παραπάνω μοντέλο μικρού-κόσμου αποκλείει την εμφάνιση κορυφών με υψηλή συνδεσιμότητα, καθώς η πιθανότητα να βρεθεί μία ισχυρά συνδεδεμένη κορυφή μειώνεται εκθετικά με το  $k$ , αποτυγχάνοντας επομένως να εξηγήσει τα δίκτυα χωρίς κλίμακα. Το μοντέλο μικρού-κόσμου δεν ενσωματώνει τους δύο μηχανισμούς που αναφέρονται παραπάνω (2.3) και αφορούν στα πραγματικά δίκτυα. Καταρχάς, υποθέτουμε σταθερό αριθμό κόμβων. Η πλειοψηφία των πραγματικών δικτύων, ωστόσο, επεκτείνεται με το χρόνο με την προσθήκη νέων κόμβων, γεγονός το οποίο μπορεί εύκολα να επαληθευτεί αν θεωρηθούν παραδείγματα όπως το *World Wide Web* στο οποίο προστίθενται συνεχώς νέες σελίδες - κόμβοι. Επιπρόσθετα, η υπόθεση ότι η πιθανότητα σύνδεσης μεταξύ δύο κορυφών είναι τυχαία ή ομοιόμορφη δεν ισχύει για πραγματικά δίκτυα εξαιτίας του φαινομένου της κατά προτίμησης σύνδεσης σε κόμβους όπως περιγράφεται στο προηγούμενο τμήμα 2.3.

## 2.5 Θεωρία Συνέχειας - *Continuum Theory*

### Βασικό Μοντέλο [12]

Το παρακάτω αναλυτικό μοντέλο όπως δόθηκε από τους *Papavassiliou* και *Zhu* περιγράφει τις ποικίλες διεργασίες και τις επιδράσεις τους κατά τη διάρκεια της εξέλιξης ενός κινητού δικτύου αισθητήρων συμπεριλαμβάνοντας την άθροιση ή τον επαναπροσδιορισμό συνδέσεων. Στην ανάπτυξη του μοντέλου θεωρούμε ότι έχουμε σταθερό αριθμό κόμβων αισθητήρων  $N$  κατά τη διάρκεια του χρόνου - επομένως δεν υπάρχουν κόμβοι που εγκαταλείπουν το δίκτυο ή άλλοι που προστίθενται στο δίκτυο. Σε κάθε βήμα χρόνου θεωρούμε ότι μία από τις παρακάτω ενέργειες μπορεί να συμβεί:

- $p_1$ : Με πιθανότητα  $p$  ( $0 \leq p < 1$ ),  $m_1$  νέες συνδέσεις προστίθενται ( $m_1 < N$ ). Η προσθήκη νέων συνδέσεων συμβαίνει όταν ένας κόμβος

συνδέεται με άλλους κόμβους του δικτύου επιθυμώντας να αυξήσει τις επαφές του ή όταν βρεθεί στην περιοχή κάλυψης ενός άλλου κόμβου και συνδέθει σε αυτόν. Ο κόμβος - αρχή της ζεύξης που προστίθεται επιλέγεται τυχαία ενώ ο κόμβος - τέλος επιλέγεται με πιθανότητα  $Q_1(k_i)$ , όπου η  $Q_1(k_i)$  δηλώνει την πιθανότητα ώστε να επιλεγεί ένας κόμβος  $i$  στον οποίο πρόσφατα αντιστοιχούν  $k_i$  σύνδεσμοι.

- $p_2$ : Με πιθανότητα  $q$  ( $0 \leq q < 1$ ),  $m_2$  συνδέσεις επαναπροσδιορίζονται ( $m_2 < m_1$ ). Ένας κόμβος είναι δυνατόν να επιλέξει διαφορετικό κόμβο τέλους (προορισμό) σε μία σύνδεση του αν διαπιστώσει ότι η νέα σύνδεση που δημιουργείται έχει μεγαλύτερη χρησιμότητα, οδηγεί για παράδειγμα σε μικρότερο μέσο μήκος διαδρομής. Επιλέγουμε τυχαία ένα κόμβο  $i$ , και μία σύνδεση του  $l_{ij}$  μεταξύ των κόμβων  $i$  και  $j$ , και αλλάζουμε τον κόμβο τέλους  $j$  σε  $j'$ , όπου ο  $j'$  επιλέγεται με πιθανότητα  $Q_2(k_i)$ . Η  $Q_2(k_i)$  έχει ταυτόσημη σημασία με την πιθανότητα  $Q_1(k_i)$ .
- $p_3$ : Με πιθανότητα  $r$  ( $0 \leq r < 1$ ),  $m_3$  υπάρχοντες σύνδεσμοι διαγράφονται ( $m_3 < m_2$ ). Η διαγραφή ενός αριθμού συνδέσεων από κάποιο κόμβο μπορεί να αποσκοπεί σε εξοικονόμηση ενέργειας καθώς αποφασίζεται η διακοπή της επικοινωνίας του κόμβου με κάποιους γείτονές του, επειδή πιθανόν δεν κρίνεται απαραίτητη, με αποτέλεσμα την αποφυγή της σπατάλης ενέργειας για αποστολή πληροφοριών άσκοπα. Ένας κόμβος  $i$  με πιθανότητα  $Q_3(k_i)$  επιλέγεται, και τυχαία ένας από τους συνδέσμους του απελευθερώνεται. Η πιθανότητα  $Q_3(k_i)$  έχει ταυτόσημη σημασία με την πιθανότητα  $Q_1(k_i)$ .
- $p_4$ : Με πιθανότητα  $(1 - p - q - r)$ , δε συμβαίνει καμία αλλαγή.

Οι πιθανότητες  $Q_1(k_i)$ ,  $Q_2(k_i)$  και  $Q_3(k_i)$  εξαρτώνται μόνο από το  $k_i$  που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των συνδέσεων του κόμβου  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ .

Επομένως, η πιθανότητα ώστε ένας κόμβος  $i$  να αλλάξει τη συνδεσιμότητά του εξαρτάται από το  $k_i$  καθώς και τις χαρακτηριστικές ποσότητες όλου του δικτύου:  $p, q, r, N, m_1, m_2, m_3$ . Το  $k_i$  αλλάζει συνεχώς και κάθε μία από τις πιθανότητες  $Q_1(k_i), Q_2(k_i)$  και  $Q_3(k_i)$  μπορεί να θεωρηθεί ως ο ρυθμός όπου το  $k_i$  αλλάζει ανάλογα με μία συγκεκριμένη διαδικασία. Για να καθοριστεί ο ρυθμός μεταβολής του  $k_i$  ακολουθούμε τη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω υπολογίζοντας πρώτα τους ρυθμούς  $r_1, r_2, r_3$ :

- $r_1$ : αναφέρεται στην πρόσθεση  $m_1$  νέων συνδέσμων με πιθανότητα  $p$  και εκφράζεται με τον τύπο

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{p * m_1}{N} + pm_1 Q_1(k_i) \quad (2.1)$$

Ο πρώτος όρος προκύπτει ως τομή (δηλαδή γινόμενο πιθανοτήτων των ενδεχομένων) της τυχαίας επιλογής του αρχικού κόμβου με πιθανότητα  $\frac{1}{N}$  και της προσθήκης σε αυτόν  $m_1$  συνδέσεων με πιθανότητα  $p$ . Ο δεύτερος όρος προκύπτει ως τομή της επιλογής του κόμβου τέλους με πιθανότητα  $Q_1(k_i)$  και της προσθήκης σε αυτόν  $m_1$  συνδέσεων με πιθανότητα  $p$ . Οι δύο όροι αθροίζονται για να εκφράσουν την ένωση των ενδεχομένων που οδηγούν σε αύξηση του μέσου αριθμού των συνδέσεων (προσθήκη συνδέσμων) ενός κόμβου.

- $r_2$ : αναφέρεται στον επαναπροσδιορισμό  $m_2$  συνδέσμων σε έναν κόμβο, που γίνεται με πιθανότητα  $q$  και εκφράζεται με τον τύπο

$$\frac{dk_i}{dt} = -\frac{qm_2}{N} + qm_2 Q_2(k_i) \quad (2.2)$$

Ο πρώτος όρος εκφράζει την τομή (γινόμενο πιθανοτήτων ενδεχομένων) της τυχαίας επιλογής του αρχικού κόμβου με πιθανότητα  $\frac{1}{N}$  και

της αφαίρεσης (πρόσημο '-') από αυτόν  $m_2$  συνδέσεων με πιθανότητα  $q$ . Ο δεύτερος όρος προκύπτει ως τομή της επιλογής του κόμβου τέλους με πιθανότητα  $Q_2(k_i)$  και της προσθήκης σε αυτόν  $m_2$  συνδέσεων με πιθανότητα  $q$ . Επομένως ο πρώτος όρος δείχνει τη μείωση της συνδεσιμότητας του κόμβου από τον οποίο αφαιρούνται συνδέσεις και ο δεύτερος την αύξηση της συνδεσιμότητας στον κόμβο όπου προστίθενται οι συνδέσεις. Οι δύο όροι αθροίζονται για να εκφράσουν την ένωση των ενδεχομένων επαναπροσδιορισμού μίας σύνδεσης.

- $r_3$ : αναφέρεται στη αφαίρεση  $m_3$  υπαρχουσών συνδέσεων με πιθανότητα  $r$  και εκφράζεται με τον τύπο

$$\frac{dk_i}{dt} = -rm_3Q_3(k_i) - rm_3A_i \quad (2.3)$$

όπου

$$A_i = \sum_{\text{all links i}} \frac{Q_3(k_j)}{k_j}$$

Το πρόσημο '-' και στους δύο όρους δηλώνει τη μείωση των συνδέσεων. Ο πρώτος όρος αντικατοπτρίζει την τομή της επιλογής ενός κόμβου με πιθανότητα  $Q_3(k_i)$  και την αφαίρεση από αυτόν (πρόσημο '-')  $m_3$  συνδέσεων με πιθανότητα  $r$ . Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει τις συνδέσεις που χάνει ένας κόμβος εξαιτίας γειτονικών του κόμβων που διέγραψαν έναν αριθμό συνδέσεών τους. Οι δύο όροι αθροίζονται για να εκφράσουν την ένωση των ενδεχομένων απώλειας συνδέσεων από ένα κόμβο.

Η διαδικασία  $p_4$  δεν συνεισφέρει στο ρυθμό μεταβολής του  $k_i$ .

Αθροίζοντας τις τρεις παραπάνω συνεισφορές προκύπτει ο συνολικός ρυθμός μεταβολής του  $k_i$  λόγω πρόσθεσης ή αφαίρεσης ή επαναπροσδιορισμού

μίας σύνδεσης (ένωση ενδεχομένων):

$$\frac{dk_i}{dt} = pm_1 \left[ \frac{1}{N} + Q_1(k_i) \right] + qm_2 \left[ Q_2(k_i) - \frac{1}{N} \right] - rm_3 \left[ Q_3(k_i) + A_i \right] \quad (2.4)$$

Οι τύποι για τις πιθανότητες  $Q_1(k_i)$ ,  $Q_2(k_i)$  και  $Q_3(k_i)$  βασίζονται σε τρία σενάρια που περιγράφονται παρακάτω:

**Σενάριο 1:** Στην περίπτωση αυτή υποθέτουμε προσάρτηση κατά προτίμηση σε κόμβους με μεγαλύτερο αριθμό συνδέσεων. Η αφαίρεση συνδέσεων γίνεται επίσης από τους κόμβους με το μεγαλύτερο αριθμό συνδέσεων, επομένως οι πιο δημοφιλείς κόμβοι είναι πιο πιθανόν να χάσουν συνδέσεις. Οι εξισώσεις του σεναρίου διαμορφώνονται ως εξής:

1.

$$Q_1(k_i) = Q_2(k_i) = \frac{k_i + 1}{\sum_{\text{all nodes } j} (k_j + 1)}$$

αντικατοπτρίζει την προσάρτηση κατά προτίμηση σε κόμβους με υψηλή συνδεσιμότητα.

2.

$$Q_3(k_i) = \frac{k_i}{\sum_{\text{all nodes } j} k_j}$$

αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι οι κόμβοι με υψηλότερη συνδεσιμότητα είναι πιο πιθανό να αποβάλλουν έναν ή περισσότερους συνδέσμους τους.

3.

$$A_i = Q_3(k_i)$$

4. Ο συνολικός αριθμός των συνδέσμων είναι

$$|E|_t = \frac{1}{2} \sum_{\text{all nodes}_j} k_j = (pm_1 - rm_3)t \quad (2.5)$$

Η σχέση (2.5) προκύπτει αν θεωρήσουμε ότι αρχικά έχουμε μηδενικές συνδέσεις και αυθοίσουμε όλες τις συνδέσεις που προστίθενται μέχρι την εξεταζόμενη στιγμή  $t$  (ο αριθμός τους είναι  $pm_1 t$  αφού σε κάθε βήμα προστίθενται  $m_1$  συνδέσεις με πιθανότητα  $p$ ) και αφαιρέσουμε από το προηγούμενο άθροισμα τον αριθμό των συνδέσεων που χάνονται μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ , (ο αριθμός τους είναι  $rm_3 t$  αφού σε κάθε βήμα αφαιρούνται  $m_3$  συνδέσεις με πιθανότητα  $r$ ). Μόνο οι διαδικασίες  $p_1$  και  $p_3$  συνεισφέρουν στη μεταβολή του αριθμού των συνδέσεων του δικτύου. Ο επαναπροσδιορισμός συνδέσεων αφήνει αμετάβλητο το συνολικό πλήθος των συνδέσεων.

Σε ένα πραγματικό σύστημα  $k_i(t) > 0$  και  $E(t) > 0$ , επομένως  $pm_1 > rm_3$  - για να υπάρχουν συνδέσεις στο δίκτυο πρέπει να προστίθενται περισσότερες συνδέσεις από όσες αφαιρούνται.

Τελικά

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{pm_1 + qm_2}{2(pm_1 - rm_3)t + N}(k_i + 1) - \frac{rm_3}{pm_1 - rm_3} \frac{1}{t} k_i + \frac{pm_1 - qm_2}{N} \quad (2.6)$$

με την αρχική συνθήκη  $k_i(1) = 0$  που αντιστοιχεί σε ένα αρχικά απομονωμένο σύστημα. Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (2.6) δίνει τη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου. Με επίλυση της (2.6) και θεωρώντας το όριο για μεγάλο  $t$  αποδεικνύεται ότι η μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου  $k_i(t)$ , όπου  $k_i(t) < N$  αυξάνει περίπου γραμμικά με το χρόνο  $t$ , όταν ο χρόνος είναι πολύ μεγάλος

$t >> a_1$  και τείνει στην τιμή  $\frac{t}{a_1}$  με

$$a_1 = \frac{N}{2(pm_1 - rm_3)}$$

**Σενάριο 2:** Σε αυτήν την περίπτωση υποθέτουμε την προνομιακή σύνδεση στους κόμβους με τη μικρή συνδεσιμότητα, ενώ όσους περισσότερους συνδέσμους διαθέτει ένας κόμβος (όσο πιο δημοφιλής είναι), τόσο υψηλότερη η πιθανότητα ο κόμβος να αφαιρέσει μια υπάρχουσα σύνδεση. Οι συνδέσεις ορίζονται πιό δίκαια και όλοι οι κόμβοι θα πλησιάσουν τον ίδιο μέσο αριθμό συνδέσεων στη μόνιμη κατάσταση. Κατά συνέπεια, οι εξισώσεις που απαιτούνται είναι:

1.

$$Q_1(k_i) = Q_2(k_i) = \frac{\frac{1}{k_i+1}}{\sum_{\text{all nodes j}} \frac{1}{k_j + 1}}$$

αντικατοπτρίζει την προνομιακή προσάρτηση σε κόμβους με μικρή συνδεσιμότητα προκειμένου να μεγιστοποιήσει την ελάχιστη διάρκεια ζωής μεταξύ όλων των κόμβων

2.

$$Q_3(k_i) = \frac{k_i}{\sum_{\text{all nodes j}} k_j}$$

αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι οι κόμβοι με μεγαλύτερη συνδεσιμότητα είναι πιο πιθανόν να αφαιρέσουν έναν ή περισσότερους συνδέσμους τους.

Τελικά

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{(pm_1 + qm_2)(N + 2(pm_1 - rm_3)t)}{(k_i + 1)N^2} - \frac{rm_3}{pm_1 - rm_3} \frac{k_i}{t} + \frac{pm_1 - qm_2}{N} \quad (2.7)$$

Η αντίστοιχη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου για μεγάλες τιμές του χρόνου  $t$  καθορίζεται από την ποσότητα  $\frac{t}{a_1}$  όπου  $a_1 = \frac{N}{2(pm_1 - rm_3)}$ . Ωστόσο, οι μεταβλητές τους είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες του σεναρίου 1.

**Σενάριο 3:** Στην περίπτωση αυτή διαφοροποιείται η πιθανότητα αφαίρεσης συνδέσμων ώστε να εξαρτάται από τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Επομένως, οι εξισώσεις που χρειάζονται διαμορφώνονται ως εξής:

1.

$$Q_1(k_i) = Q_2(k_i) = \frac{k_i + 1}{\sum_{\text{all nodes j}} (k_j + 1)}$$

αντικατοπτρίζει την προνομιακή προσάρτηση σε κόμβους με υψηλή συνδεσιμότητα.

2.

$$Q_3(k_i) = \frac{k_i}{\mu N + \sum_{\text{all nodes j}} k_j} = \frac{k_i}{\mu N + 2E(t)}$$

όπου  $\mu > 0$  και  $E(t)$  ο συνολικός αριθμός των συνδέσμων τη χρονική στιγμή  $t$ .

Η αντίστοιχη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου για μεγάλες τιμές του χρόνου  $t$  (μέση τιμή της κατανομής συνδεσιμότητας)  $\frac{\mu}{\nu-1}$  στη μόνιμη κατάσταση μετά το πέρας της μεταβατικής περιόδου. Είναι φανερό ότι η κατανομή προσεγγίζει ένα σημείο ισορροπίας (μέση τιμή 10) και δεν υφίσταται περαιτέρω αλλαγή.

### Εκτεταμένο Μοντέλο Συνέχειας [13]

Αρχίζουμε με  $m_0$  απομονωμένους κόμβους και σε κάθε χρονικό βήμα, μπορεί να πραγματοποιηθεί μία από τις παρακάτω ενέργειες:

1. Με πιθανότητα  $p$  προσθέτουμε  $m < m_0$  νέες συνδέσεις επιλέγοντας

τυχαία ένα κόμβο ως τον αρχικό κόμβο της νέας σύνδεσης, ενώ το άλλο άκρο της σύνδεσης επιλέγεται με πιθανότητα

$$\prod_i(k_i) = \frac{k_i + 1}{\sum_j(k_j + 1)}$$

που αντικατοπτρίζει την προνομιακή προσάρτηση σε κόμβους με υψηλή συνδεσιμότητα.

2. Με πιθανότητα  $q$  επανασυνδέουμε  $m$  συνδέσεις.
3. Με πιθανότητα  $1 - p - q$  προσθέτουμε έναν καινούριο κόμβο ο οποίος συνδέεται με  $m$  συνδέσμους σε κόμβους  $i$  που προϋπάρχουν στο σύστημα με πιθανότητα  $\prod_i(k_i)$ .

Μερικές παρατηρήσεις ακολουθούν παρακάτω:

- $0 < p < 1$  και  $0 < q < 1 - p$
- Οι απομονωμένοι κόμβοι χωρίς συνδέσεις ( $k_i = 0$ ) έχουν μη μηδενική πιθανότητα να αποκτήσουν νέους συνδέσμους.
- Αν  $p = q = 0$ , το μοντέλο καταλήγει σε μοντέλο δικτύου χωρίς κλίμακα (*scale-free*) όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 2.3.

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες συνεισφέρουν στο ρυθμό με τον οποίο το  $k_i$  μεταβάλλεται. Προκειμένου να προσδιοριστεί ο συνολικός ρυθμός μεταβολής του  $k_i$  σε ένα σύστημα μεγέθους  $N$ , ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία για να υπολογίσουμε τους ενδιάμεσους απαραίτητους ρυθμούς:

- $r_1$ : προσθήκη  $m$  νέων συνδέσεων με πιθανότητα  $p$

$$\frac{dk_i}{dt} = pA \frac{1}{N} + pA \frac{k_i + 1}{\sum_j(k_j + 1)} \quad (2.8)$$

όπου  $A = m$  καθώς η συνολική μεταβολή στη συνδεσιμότητα θα είναι  $2m$  αν οι συνδέσεις θεωρηθούν αμφίδρομες.

- $r_2$ : επανασύνδεση  $m$  συνδέσεων με πιθανότητα  $q$

$$\frac{dk_i}{dt} = -qB \frac{1}{N} + qB \sum_j \frac{k_i + 1}{(k_j + 1)} \quad (2.9)$$

όπου  $B = m$  και δεν υπάρχει μεταβολή στη συνδεσιμότητα του δικτύου.

- $r_3$ : προσθήκη ενός νέου κόμβου με πιθανότητα  $1 - p - q$

$$\frac{dk_i}{dt} = (1 - p - q)C \sum_j \frac{k_i + 1}{(k_j + 1)} \quad (2.10)$$

όπου  $C = m$  καθώς όπως υπαγορεύεται από το ρυθμό  $r_1$  γιατί προστίθενται  $m$  συνδέσεις σε κάθε βήμα και επομένως κάθε νέος κόμβους θα δημιουργεί  $m$  συνδέσεις με τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου.

Τελικά, ανθροίζοντας τις παραπάνω συνεισφορές καταλήγουμε στον εξής νόμο για το ρυθμό μεταβολής της συνδεσιμότητας ενός κόμβου:

$$\frac{dk_i}{dt} = (p - q)m \frac{1}{N} + m \sum_j \frac{k_i + 1}{(k_j + 1)} \quad (2.11)$$

Αν  $k_i(t) = m$  τη χρονική στιγμή  $t_i$  τότε η επίλυση της παραπάνω διαφορικής δίνει:

$$K_i = [A + m + 1] \left( \frac{t}{t_i} \right)^{\frac{i}{B}} - A - 1; A(p, q, m), B(p, q, m)$$

Η πιθανότητα  $P[k_i(t) < k]$  μπορεί να γραφεί ως

$$P[k_i(t) < k] = P[t_i > C(p, q, m)t]$$

$$C(p, q, m) = \left( \frac{m + A + 1}{k + A + 1} \right)^B$$

Η συνθήκη  $0 \leq t_i \leq t$  πρέπει να ικανοποιείται και στην περίπτωση που ισχύει και  $0 < C < 1$  τότε η κατανομή της συνδεσιμότητας  $P(k)$  έχει αναλυτική έκφραση που αντιπροσωπεύεται από μία γενικευμένη έκφραση δύναμης

$$P(k) \sim [k + \kappa(p, q, m)]^{-\gamma(p, q, m)}$$

όπου

$$\kappa(p, q, m) = A(p, q, m) + 1, \gamma(p, q, m) = B(p, q, m) + 1.$$

## 2.6 Έλεγχος Τοπολογίας

Τα περισσότερα *ad hoc* δίκτυα αντιμετωπίζουν προβλήματα όσον αφορά τη συνδεσιμότητά τους, την κατανάλωση ενέργειας των ασύρματων κόμβων και τον ανταγωνισμό του μέσου, όπου το τελευταίο περιλαμβάνει τα προβλήματα κρυμμένου τερματικού και εκτεθειμένου τερματικού. Στην προσπάθεια αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις, όπως δρομολόγηση με έλεγχο ισχύος, προσεγγίσεις στο επίπεδο *MAC* και ο έλεγχος τοπολογίας (*TC*) που περιγράφεται εδώ και είναι μία ελπιδοφόρος προσέγγιση, καθώς κατορθώνει να εξετάσει όλα τα προβλήματα σε ένα ενοποιημένο πλαίσιο. Είναι επίσης δυναμικός, και επομένως κατάλληλος να προσαρμοστεί στην τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου.

Ο έλεγχος τοπολογίας είναι ένας μηχανισμός που ελέγχει την ισχύ μετάδοσης κάθε κόμβου με σκοπό τη μετατροπή του αρχικού γράφου δικτύου - όπου κάθε κόμβος έχει τη μέγιστη ακτίνα μετάδοσης - σε ένα παραγόμενο γράφο με επιθυμητές ιδιότητες συνδεσιμότητας και καλύτερη χρησιμοποίηση των πόρων του, κυρίως της ενέργειας. Επομένως ο έλεγχος τοπολογίας είναι μέθοδος συνεργασίας των κόμβων, ώστε να πάρουν αποφάσεις σχετικά με τις ακτίνες μετάδοσής τους, με σκοπό να παραχθεί ένα δίκτυο με επιθυμητές ιδιότητες. Οι κύριοι στόχοι του ελέγχου τοπολογίας είναι η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου (με την αύξηση της χωρικής επαναχρησιμοποίησης) και της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, διατηρώντας ταυτόχρονα τη συνδεσιμότητα και την πιθανότητα γρήγορης προσαρμογής σε μεταβολές της τοπολογίας. Κατά συνέπεια, εμφανίζεται ο εξής συμβιβασμός: από τη μία μεριά βρίσκονται η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των παρεμβολών μεταξύ των κόμβων, ενώ από την άλλη είναι η συνδεσιμότητα του δικτύου. Όσον αφορά τη σχέση ανάμεσα στην ισχύ μετάδοσης και την ακτίνα μετάδοσης, σε ένα ντετερμινιστικό περιβάλλον διάδοσης, η ισχύς μετάδοσης είναι ανάλογη της ακτίνας μετάδοσης, η ισχύς είναι αντίστροφα ανάλογη της απόστασης, ενώ δύο κόμβοι θεωρούνται γείτονες μόνο αν καθένας από τους δύο ανήκει στην ακτίνα κάλυψης του άλλου. Ωστόσο, στο πραγματικό περιβάλλον διάδοσης, όχι πρέπει στον καθορισμό της γειτονιάς των κόμβων να ληφθεί υπόψη η λογαριθμοκανονική σκίαση και η συνολική κάλυψη. Επομένως, στην πράξη η μείωση της ισχύος δεν αποτελεί ντετερμινιστική συνάρτηση της απόστασης και οι γείτονες ενός κόμβου μπορεί να βρίσκονται ή όχι μέσα στην περιοχή που υπαγορεύεται από το ντετερμινιστικό μοντέλο διάδοσης.

Ο μηχανισμός ελέγχου τοπολογίας απαιτεί συνεργασία μεταξύ των κόμβων,

καθώς μειώνει την ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου σε μία τιμή μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή, διακόπτοντας την απευθείας σύνδεση του εξεταζόμενου κόμβου με κάποιους μακρινούς γείτονες. Επομένως, κάθε κόμβος βασίζεται στη συνεργασία του με τους εναπομείναντες γείτονές του ενός βήματος προκειμένου να εκτελέσει κάποιες δραστηριότητες, ειδικά την προώθηση και δρομολόγηση των πακέτων. Άρα, για την εφαρμογή των πρωτοκόλλων ελέγχου τοπολογίας, πρέπει οι μηχανισμοί συνεργασίας να εξασφαλίζουν την επικοινωνία μεταξύ όλων των κόμβων στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, η μείωση της ακτίνας ενός κόμβου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μέσου μήκους μονοπατιού, επομένως το δίκτυο πρέπει να συμβιβάζει την καθυστέρηση διάδοσης με τη χρησιμοποίηση ενέργειας και το αυξημένο εύρος. Ωστόσο η ανεκτική στην καθυστέρηση φύση των σημερινών ασύρματων δικτύων μπορεί να πετύχει αυτή την ισορροπία.

Ο έλεγχος τοπολογίας είναι μία προσέγγιση διαστρωματικής σχεδίασης δικτύων και βασίζεται στην αλληλεπίδραση του φυσικού επιπέδου με το επίπεδο δικτύου. Οι αποφάσεις του ελέγχου τοπολογίας προβλέπουν την ανατροφοδότηση από το στρώμα *MAC* και έχουν επιπτώσεις στη λειτουργία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Την πάροχουν διάφοροι μηχανισμοί ελέγχου τοπολογίας που μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες, που φαίνονται στον Πίνακα 2.9 ανάλογα με το περιβάλλον, τη χρησιμοποιούμενη πληροφορία ή το επίπεδο πρωτοκόλλου.

**Πίνακας 2.9: Κατηγορίες πρωτοκόλλων ελέγχου τοπολογίας**  
**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Ομογενές	Όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια μέγιστη
Ετερογενές	ισχύ μετάδοσης Κάθε κόμβος έχει ξεχωριστή μέγιστη ισχύ μετάδοσης

**ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ**

Κεντροποιημένο	Ένας κόμβος καθορίζει την τελική
Κατανεμημένο	τοπολογία και το γράφο του δικτύου Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί τοπική πληροφορία

**ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ**

Επίπεδο πρόσβασης στο μέσο (*MAC*)  
Επίπεδο δικτύου

# Κεφάλαιο 3

## Μοντέλο Μετατροπής Αυτοργανούμενου Δικτύου βασιζόμενο σε Τοπική Επιλεκτική Επικόλληση

### 3.1 Γενική Περιγραφή και Παραδοχές

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε ένα μοντέλο βασισμένο στη Θεωρία Συνέχειας (*Continuum Theory*) που περιγράφηκε αναλυτικά στη σχετική ενότητα του προηγούμενου κεφαλαίου [2.5]. Οι παραδοχές που έγιναν στο μοντέλο σχετίζονται άμεσα με τις ιδιότητες των δικτύων αισθητήρων. Το μοντέλο στηρίζεται στη Θεωρία Συνέχειας ωστόσο οι εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες της πρόσθεσης, τροποποίησης και διαγραφής των συνδέσεων διαφοροποιούνται με βάση τις παραδοχές που περιγράφονται παρακάτω, σε σχέση με τις αντίστοιχες εξισώσεις των *Zhu* και *Papavasileiou*. Με άλλα λόγια, η Θεωρία Συνέχειας των *Zhu* και *Papavasileiou* επικεντρώνεται στη μελέτη και

την ανάλυση των ιδιοτήτων ενός τυχαίου γράφου που αντιπροσωπεύει ένα αυτοργανούμενο δίκτυο στη γενική περίπτωση. Η προσέγγιση που γίνεται εδώ, ωστόσο, έχει κύριο στόχο τη μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών ενός δικτύου στην περίπτωση τυχαίου γεωμετρικού γράφου όπως ένα δίκτυο αισθητήρων, καθώς προσδιδονται σε αυτό ιδιότητες ‘*small – world*’. Όλες οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα αποσκοπούν στην προσθήκη νέων ιδιοτήτων στο αρχικό δίκτυο, ώστε αφενός να παραμένει ένα ασύρματο δίκτυο τυχαίου γεωμετρικού γράφου, αλλά αφετέρου να παρουσιάζει βελτιωμένη συμπεριφορά ως προς τη μέση απόσταση δύο κόμβων, πράγμα το οποίο το διαφοροποιεί από τα τυπικά δίκτυα ίδιου μοντέλου.

Σκοπός είναι η μείωση του μέσου μήκους της απόστασης μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων (ιδιότητα *small – world*) διατηρώντας ταυτόχρονα την ομαδοποίηση του τυχαίου γεωμετρικού γράφου όπως αυτή υπαγορεύεται από τη δημιουργία ομάδων μεταξύ των κόμβων που βρίσκονται σε μία συγκεκριμένη ακτίνα μετάδοσης και το περιορισμένο εύρος μετάδοσης των ασύρματων κόμβων. Το αρχικό μοντέλο του δικτύου αισθητήρων μπορεί να προσομοιωθεί με έναν τυχαίο γεωμετρικό γράφο όπου κάθε κόμβος συνδέεται τυχαία με γείτονες σε μία συγκεκριμένη χωρική περιοχή (συγκεκριμένη ακτίνα μετάδοσης). Ένας τυχαίος γεωμετρικός γράφος (με παραμέτρους  $n, r$ ) κατασκευάζεται διαθέτοντας  $n$  σημεία ομοιόμορφα και τυχαία και ενώνοντας δύο σημεία μεταξύ τους αν και μόνο αν απέχουν απόσταση το πολύ  $r$ . Η μοντελοποίηση των ασύρματων δικτύων κατά αυτό τον τρόπο είναι πιο ρεαλιστική από τη μοντελοποίηση με τη χρήση του τυχαίου γράφου από τους Erdős-Rényi - η οποία χρησιμοποιήθηκε κυριώς στο παρελθόν - καθώς κάθε κόμβος δεν μπορεί να συνδέεται τυχαία με οποιονδήποτε άλλο, αν λάβουμε υπόψη τις περιορισμένες δυνατότητες μετάδο-

σης των ασύρματων κόμβων, όπως συμβαίνει σε ένα τυχαίο γράφο. Επομένως ένας τυχαίος γεωμετρικός γράφος παρουσιάζει στοιχεία ομαδοποίησης ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους, αλλά εφόσον υπάρχει ομογένεια στην ακτίνα μετάδοσης το μέσο μήκος μονοπατιού έχει μεγάλη τιμή, ειδικά στην περίπτωση όπου η ακτίνα μετάδοσης έχει μικρή τιμή.

Πρόκειται επομένως για μία ειδική περίπτωση, κατά τη μελέτη της οποίας λαμβάνεται ειδική μέριμνα προκειμένου να μην αλλοιωθούν τα κύρια γνωρίσματα ενός δικτύου τυχαίου γεωμετρικού γράφου. Για το λόγο αυτό και προτού περιγραφεί το βασικό μοντέλο αναφέρονται οι κύριες προϋποθέσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψην και συγχρόνως αποτελούν περιορισμούς στην ανάλυση.

- Πρώτον, η ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου δεν μπορεί να αυξάνεται απεριόριστα εξαιτίας της περιορισμένης διαθέσιμης ενέργειας κάθε κόμβου.
- Δεύτερον, το δίκτυο οφείλει να παραμένει συνεκτικό σε κάθε χρονική στιγμή ώστε να αποφεύγονται οι απομονωμένοι κόμβοι, οι οποίοι είναι αδύνατο να επικοινωνήσουν με το υπόλοιπο δίκτυο. Εδώ υπεισέρχεται και η έννοια του ελέγχου τοπολογίας (υποκεφάλαιο 2.6) που εξασφαλίζει μία σχετική ισορροπία ανάμεσα στη συνεκτικότητα και την κατανάλωση ενέργειας διατηρώντας τις τιμές της ακτίνας όσον το δυνατόν μικρότερες και το δίκτυο πλήρως συνδεδεμένο.
- Τρίτον, η γειτονιά κάθε κόμβου αποτελείται από τους κόμβους που βρίσκονται εντός της εμβέλειας του πρώτου. Ωστόσο, αποδεχόμαστε την ύπαρξη τόσο μονόδρομων όσο και αμφιδρομων συνδέσεων καθώς η αποκοπή της σύνδεσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ανώτερα στρώματα (επίπεδο δρομολόγησης), όταν θεωρήσουμε, για παράδειγμα, ότι ο κόμβος - προορισμός

δεν είναι διαθέσιμος για αποστολή δεδομένων επομένως η σύνδεση καθίσταται μη αφοιβαία. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν να σταλούν δεδομένα προς τον κόμβο-γείτονα χωρίς όμως να δίνεται η δυνατότητα λήψης πληροφοριών από το συγκεκριμένο κόμβο. Ένας λόγος για την παραπάνω θεώρηση αποτελεί η εξοικονόμηση ενέργειας σε περίπτωση που δεν χρειαζόμαστε απάντηση από τον κόμβο προορισμό. Επιπρόσθετα κατά την αύξηση της ακτίνας ενός κόμβου σε μία νέα τιμή είναι αποδεκτή και η μη σύνδεση ενός κόμβου με επιλεγμένους κόμβους εντός της νέας εμβέλειάς του, για λόγους όμοιους με τους παραπάνω.

- Θεωρούμε ότι οι κόμβοι είναι ακίνητοι και ο αριθμός τους παραμένει σταθερός στο χρόνο και ίσος με  $N$ .

### 3.2 Ανάλυση Μοντέλου Τροποποίησης Επιλεκτικής Επικόλλησης

Το ακόλουθο μοντέλο περιγράφει τις διαφορετικές διαδικασίες καθώς και την επιδραση τους στη συνολική συμπεριφορά του δικτύου και την εξέλιξή του. Αρχικά έχουμε ένα ομογενές δίκτυο καθώς όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια ακτίνα μετάδοσης και επομένως όλες οι αρχικές συνδέσεις είναι αμφίδρομες. Δεν επιχειρούμε διαγραφή συνδέσεων καθώς η αφαίρεση σύνδεσης από ένα κόμβο με κάποιο γειτονικό του οδηγεί σε αύξηση της μεταξύ τους απόστασης σε αριθμό αλμάτων και αντιβαίνει στην επίτευξη του αρχικού μας στόχου που είναι η μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού.

Καταρχάς, τοποθετούμε σταθερό αριθμό  $N$  κόμβων σε μία οριοθετημένη τετραγωνική περιοχή εμβαδού  $A = L^2$ , σε τυχαίες θέσεις. Οι κόμβοι θεωρούνται ομοιόμορφα τοποθετημένοι στην περιοχή  $L^2$ . Η συνάρτηση πυκνότητας

πιθανότητας  $P_r(\text{κόμβος } x \in A) = f(x)$  δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{L^2} & x \in A \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.1)$$

Η πιθανότητα ο κόμβος  $x$  να ανήκει σε μία περιοχή εμβαδού  $B$  μέσα στην περιοχή  $A = L^2$  είναι:

$$P_r(x_i \in B) = \int_B f(x) dx = \frac{|B|}{L^2} \quad (3.2)$$

Τέλος, η κατανομή του πλήθους των κόμβων στην περιοχή  $B$  είναι διωνυμική με παράμετρο:

$$p = \frac{|B|}{L^2}$$

Αρχίκα, πριν την εφαρμογή του μοντέλου μετατροπής, κάθε κόμβος συνδέεται με όλους τους κόμβους που βρίσκονται στην περιοχή μετάδοσης του η οποία εκτείνεται σε μία κυκλική περιοχή με ακτίνα  $R_{first}$ , όπως υπαγορεύεται από το μοντέλο του τυχαίου γεωμετρικού γράφου με ομοιόμορφη ακτίνα.

Σε κάθε βήμα προστίθενται  $m_1(t)$  νέες συνδέσεις στο δίκτυο καθώς η ακτίνα σε επιλεγμένους κόμβους αυξάνεται από μία τιμή  $R_{min}$  σε μία τιμή  $R_{max}$ . Σε κάθε βήμα η τιμή  $R_{min}$  γίνεται ίση με την τιμή της  $R_{max}$  του προηγούμενου βήματος ενώ η  $R_{max}$  αυξάνεται κατά μία επιλεγμένη τιμή. Η αύξηση της ακτίνας κατά μία μικρή τιμή σε κάθε βήμα για πολλά βήματα και η επανάληψη της εφαρμογής του μοντέλου για πολλά βήματα οδηγούν στη θεώρηση των διακριτών βημάτων ως συνέχη χρόνο και κατ' επέκταση, ενός μοντέλου συνεχούς χρόνου.

Οι επιλεγμένοι κόμβοι συνδέονται με κόμβους του δικτύου που βρίσκονται στην περιοχή δακτυλίου που εκτείνεται σε ακτίνα  $R_{min}$  έως  $R_{max}$  της εμβέλειάς τους. Οι συνδέσεις που προστίθενται θεωρούνται μονόδρομες καθώς μόνο για

τον κόμβο αρχή της σύνδεσης αυξάνεται η ακτίνα μετάδοσης, με αποτέλεσμα η δυνατότητα αποστολής δεδομένων να περιορίζεται μόνο από τον κόμβο αρχή προς τον κόμβο τέλος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν ένας κόμβος δεν έχει επιλεγεί σε προηγούμενο βήμα τότε συνδέεται μόνο με τους γείτονες εντός του παραπάνω δακτυλίου και όχι με όλους τους νέους του γείτονες μέσα στη νέα εμβέλεια του  $R_{max}$ . Δεν δίνεται η δυνατότητα επαναπροσδιορισμού των συνδέσεων γιατί δεν έχει νόημα να αφαιρεθεί σύνδεση από κάποιον γείτονα αλλά και να επιχειρηθεί σύνδεση με κάποιον κόμβο εκτός του εύρους μετάδοσης.

Σε κάθε χρονική στιγμή - βήμα επανάληψης  $t$  - συμβαίνει ένα από τα παρακάτω:

- **Διαδικασία  $p_1$ :** Με πιθανότητα  $p$  ( $0 \leq p < 1$ ), προστίθενται  $m_1(t)$ , ( $m_1 < N$ ) νέες συνδέσεις σε επιλεγμένους κόμβους  $H$ . Το ένα άκρο της σύνδεσης επιλέγεται με πιθανότητα  $Q_1(k_i)$  - δηλαδή η πιθανότητα να επιλεχθεί ο κόμβος  $i$  δεδομένου ότι ο βαθμός του είναι ίσος με  $k_i$  - ενώ η επιλογή του άλλου άκρου είναι ένας από τους κόμβους στη γειτονιά του κόμβου - αρχή που έχει επιλεχθεί. Η πιθανότητα να επιλεχθεί ένας κόμβος ως τέλος της σύνδεσης είναι ίση με την πιθανότητα ο κόμβος να βρίσκεται στην περιοχή εμβέλειας από  $R_{min}$  μέχρι  $R_{max}$  του επιλεγμένου κόμβου η οποία με βάση την εξίσωση 3.2 ισούται με

$$\frac{|B|}{L^2} = \frac{\pi * (R_{max}^2 - R_{min}^2)}{L^2}$$

αφού η  $B$  είναι περιοχή δακτυλίου με εμβαδό  $\pi * (R_{max}^2 - R_{min}^2)$

- **Διαδικασία  $p_2$ :** Με πιθανότητα  $(1 - p)$ , δε συμβαίνει καμία αλλαγή.

Η προσθήκη των συνδέσεων οδηγεί σε ένα ετερογενές δίκτυο καθώς η ακτίνα δεν αυξάνεται ομοιόμορφα σε όλους τους κόμβους, αλλά επιλεκτικά ανάλογα με το βαθμό του κόμβου. Η ανάγκη για επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας οδηγεί

στην προσπάθεια μείωσης του μέσου μήκους μονοπατιού αυξάνοντας την ακτίνα ενός κλάσματος των κόμβων και δημιουργώντας μονόδρομες συνδέσεις. Οι μονόδρομες συνδέσεις εξυπηρετούν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αποτρέποντας την αύξηση της ακτίνας μετάδοσης σε πολλούς κόμβους του δικτύου.

Η πιθανότητα  $Q_1(k_i)$  εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των συνδέσεων του κόμβου (ή βαθμό του κόμβου  $i$ )  $k_i$  σε μία δεδομένη χρονική στιγμή. Το  $k_i$  αποτελεί τη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου στο δίκτυο σε μία χρονική στιγμή. Κατά συνέπεια, η πιθανότητα ενός κόμβου να μεταβάλλει τον αριθμό των συνδέσεων του εξαρτάται από το βαθμό του αλλά και τις συνολικές παραμέτρους του δικτύου:  $N, m_1(t), p$ . Δεδομένου ότι ο αριθμός  $k_i$  των συνδέσεων αλλάζει συνεχώς λόγω προσθήκης συνδέσμων σε κάθε βήμα, η επιμέρους πιθανότητα  $Q_1(k_i)$  μπορεί να θεωρηθεί ως ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται ο αριθμός  $k_i$  των συνδέσεων. Προκειμένου να καθορίσουμε το ρυθμό μεταβολής του  $k_i$  ξεκινάμε ορίζοντας το ρυθμό εισαγωγής  $r_1$ :

- $r_1$ : αναφέρεται στην πρόσθεση  $m_1(t)$ , νέων συνδέσεων σε  $H$  επιλεγμένους κόμβους με πιθανότητα  $p$  και εκφράζεται ως

$$\frac{dk_i}{dt} = pm_1(t) * H * Q_1(k_i) \quad (3.3)$$

Η διαδικασία  $p_2$  δε συνεισφέρει στο  $k_i$ .

Ο ρυθμός μεταβολής  $k_i$  εξαρτάται μόνο από τις πιθανότητες που εμπλέκονται στη διαδικασία της πρόσθεσης συνδέσεων:

$$\frac{dk_i}{dt} = pm_1(t) * H * Q_1(k_i)$$

Το δεξιό μέρος της σχέσης προκύπτει ως η τομή (γινόμενο πιθανοτήτων των

αντίστοιχων ενδεχομένων) των ανεξάρτητων ενδεχομένων:

1. της επιλογής  $H$  κόμβων με πιθανότητα  $Q_1(k_i)$
2. της προσθήκης σε αυτούς  $m_1(t)$  συνδέσεων με πιθανότητα  $p$ .

Ωστόσο, η παραπάνω σχέση αναφέρεται στην περίπτωση όπου ένας κόμβος μπορεί να επιλεχθεί από οποιοδήποτε σημείο της περιοχής  $L^2$ . Στην περίπτωση που εξετάζουμε, προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα άκρων, η δυνατότητα επιλογής περιορίζεται μόνο στους κόμβους μίας μικρότερης τετραγωνικής περιοχής  $W$  μέσα στην αρχική περιοχή και πλευράς  $L - 2R_{max}$  όπου  $R_{max}$  είναι η τιμή της νέας μέγιστης ακτίνας σε κάθε βήμα. Τα φαινόμενα άκρων (*edge effect*) αναφέρονται στο εξής γεγονός: Σε κάθε κόμβο που επιλέγεται με βάση την υπόθεση προστίθενται οι συνδέσεις που βρίσκονται σε ένα δακτύλιο που εκτείνεται από  $R_{min}$  έως  $R_{max}$ . Όμως αν ο επιλεγμένος κόμβος βρίσκεται κοντά στα άκρα της περιοχής  $A = L^2$ , τμήμα του δακτυλίου θα είναι πιθανόν έξω από την εξεταζόμενη περιοχή όπου στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν κόμβοι οι οποίοι όμως θα έχουν ληφθεί υπόψη για τη δημιουργία συνδέσεων στους θεωρητικούς υπολογισμούς. Κατά συνέπεια αν οι κόμβοι επιλέγονται στην μικρότερη περιοχή  $W$  εξασφαλίζεται ότι οι γείτονες στη νέα περιοχή εμβέλειας του επιλεγμένου κόμβου θα βρίσκονται στην περιοχή  $A = L^2$  και κατά συνέπεια μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των νέων συνδέσεων που προστίθενται στον επιλεγμένο κόμβο πιθανοτικά. Για να ληφθεί υπόψη η προσέγγιση για την επίλυση του φαινομένου των άκρων το δεύτερο μέλος της παραπάνω σχέσης πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί την πιθανότητα ο κόμβος να βρίσκεται στην περιοχή  $W = (L - 2 * R_{max})^2$  που από τη σχέση (3.2) είναι

$$P_r(x \in W) = \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2}$$

και η σχέση (3.3) γράφεται ως εξής:

$$\frac{dk_i}{dt} = pm_1(t) * H * Q_1(k_i) * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} \quad (3.4)$$

Το  $m_1(t)$  όπως και οι τιμές των ακτινών  $R_{max}$  και  $R_{min}$  του δακτυλίου που προστίθεται, εξαρτώνται από το βήμα όρα και από το χρόνο  $t$ . Έστω ότι  $R_{first}$  η αρχική ομοιόμορφη ακτίνα του δικτύου και  $A$  η αύξηση της ακτίνας σε κάθε βήμα, τότε  $R_{max} = R_{first} + At$  και  $R_{min} = (\text{τιμή του } R_{max} \text{ στο προηγούμενο βήμα}) = R_{max} - A = R_{first} - A + At$ . Βέβαια οι προηγούμενες σχέσεις για τα  $R_{min}, R_{max}$  ισχύουν για χρόνο  $t \geq 1$  καθώς η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων στο δίκτυο τη χρονική στιγμή  $t = 0$  είναι ομοιόμορφη.

Το  $m_1(t)$  προκύπτει ως εξής:

$m_1(t) = (\pi \text{ιθανότητα ύνας κόμβος να βρίσκεται από } R_{min} \text{ μέχρι } R_{max})^* \pi \lambda \theta$

κόμβων στο δίκτυο

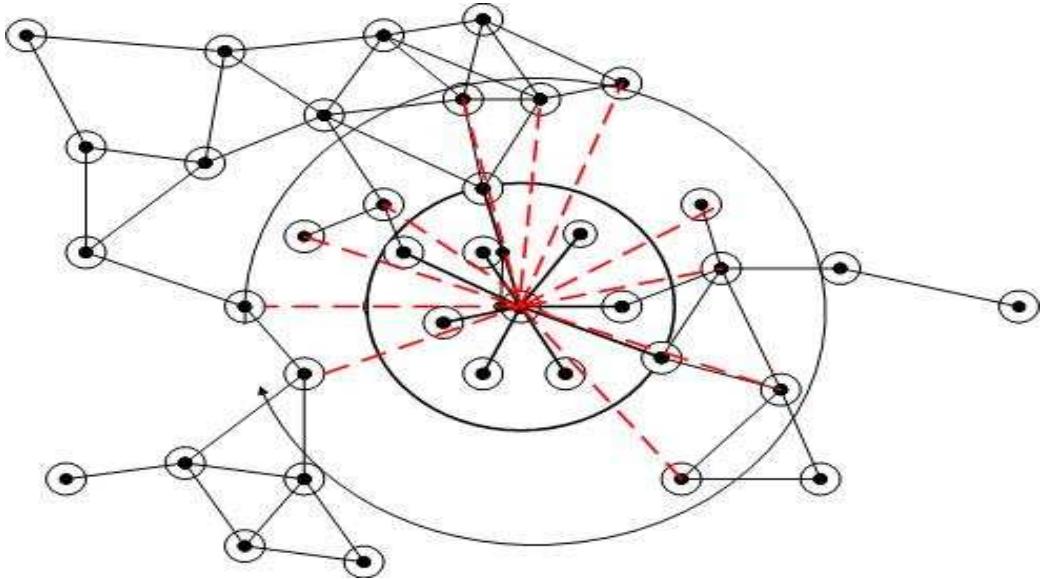
$$m_1(t) = \frac{\pi * (R_{max}^2 - R_{min}^2)}{L^2} * N = \frac{\pi * ((R_{first} + At)^2 - (R_{first} - A + At)^2)}{L^2} * N \quad (3.5)$$

Σε κάθε βήμα η τιμή του  $m_1(t)$  μεταβάλλεται γιατί ο αριθμός των συνδέσεων αλλάζει ανάλογα με το εμβαδόν της περιοχής που προστίθεται.

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας επιλογής του κόμβου του οποίου θα αυξηθεί η ακτίνα,  $Q_1(k_i)$  θεωρούμε δύο διαφορετικά σενάρια εκ των οποίων το πρώτο (3.2.1) είναι πιο απλό αλλά όπως θα φανεί και στις προσομοιώσεις δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις και επομένως θεωρείται ως βασικό και περιγράφεται εκτενέστερα.

### 3.2.1 Σενάριο 1 - Βασικό Σενάριο

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας επιλογής του κόμβου του οποίου θα αυξηθεί η ακτίνα,  $Q_1(k_i)$ , υποθέτουμε ότι το αρχικό σημείο της σύνδεσης που



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα προσθήκης συνδέσμων σε κόμβο με μεγάλο βαθμό

επιλέγεται είναι ένας από τους κόμβους με το μεγαλύτερο βαθμό, με αποτέλεσμα τελικά την εμφάνιση κόμβων - *hubs* που συνδέονται με πολλούς κόμβους στο δίκτυο, στο βαθμό που το επιτρέπει η αρχιτεκτονική του δικτύου αισθητήρων. Για μία νέα σύνδεση, το αρχικό της σημείο επιλέγεται ώστε να έχει μεγάλο βαθμό, ενώ το τελικό της σημείο επιλέγεται να είναι ένας από τους κόμβους που βρίσκονται στο δακτύλιο που εκτείνεται εντός ακτίνας από  $R_{min}$  μέχρι  $R_{max}$  του αρχικού σημείου.

Στο Σχήμα (3.1) φαίνονται με διακεκομμένη γραμμή οι συνδέσεις που προστίθενται σε έναν κόμβο με μεγάλο βαθμό - με πολλούς γείτονες - λόγω άνεξησης της ακτίνας μετάδοσής του. Με όμοιο τρόπο λειτουργεί και το μοντέλο.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι:

1.  $Q_1(k_i) = \frac{\sum_{\text{all nodes } j}^{k_i+1}}{(k_j + 1)}$  αντικατοπτρίζει τον τρόπο επιλογής του αρχικού κόμβου, που γίνεται με κριτήριο το βαθμό του και σκοπό την επιλογή δημοφιλών κόμβων με μεγάλο αριθμό συνδέσεων. Η εμφάνιση

δημοφιλών κόμβων αποτελεί ιδιότητα των *scale-free* δικτύων στα οποία όπως προαναφέρθηκε (2.3) ο μεγαλύτερος αριθμός κόμβων έχουν μικρό πλήθος συνδέσεων, ενώ υπάρχουν λίγοι κόμβοι με αρκετά περισσότερες συνδέσεις. Επιπλέον παρατηρούμε από τον τύπο για το  $Q_1(k_i)$  ότι ένας κόμβος με μηδενικό βαθμό έχει ακόμα τη δυνατότητα να επιλεχθεί. Άρα ο ρυθμός μεταβολής της μέσης συνδεσιμότητας ενός κόμβου (3.4), με χρήση και της (3.5), γράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{dk_i}{dt} &= pm_1(t) * H * Q_1(k_i) * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} = \\ &= p * H * \frac{\pi * (R_{max}^2 - R_{min}^2)}{L^2} * N * \sum_{\text{all nodes j}} \frac{k_i + 1}{(k_j + 1)} * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

2. Το άθροισμα των βαθμών των κόμβων είναι

$$Q(t) = \sum_{\text{all nodes } j} k_j = C + (pm_1(t) * H)t$$

όπου  $t$  είναι το κάθε βήμα και  $C = 2 * |E|$  το αρχικό πλήθος  $|E|$  των συνδέσεων επί τον παράγοντα 2 γιατί οι συνδέσεις είναι αμφίδρομες και επομένως κάθε μία προσμετράται στο βαθμό 2 κόμβων του δικτύου. Ο συνολικός αριθμός των συνδέσεων ισούται με το άθροισμα των παλιών και νέων συνδέσεων

$$|E_{new}| = |E| + (pm_1(t) * H)t$$

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (3.6) έχει ως εξής:

$$\frac{dk_i}{dt} = p * m_1(t) * H * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} * \frac{k_i + 1}{\sum_{\text{all nodes j}} (k_j + 1)} \Rightarrow$$

$$\frac{dk_i}{k_i + 1} = p * m_1(t) * H * \frac{dt}{\sum_{\text{all nodes j}} (k_j + 1)} * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} \Rightarrow$$

$$R_{max} = R_{first} + At$$

$$\frac{dk_i}{k_i + 1} = p * m_1(t) * H * \frac{(L - 2 * R_{first} - 2 * At)^2}{L^2} * \frac{dt}{C + N + (pm_1(t) * H)t} \Rightarrow$$

$$\frac{dk_i}{k_i + 1} = p * H * \left( \frac{\pi * ((R_{first} + At)^2 - (R_{first} - A + At)^2)}{L^2} * N \right) * \frac{(L - 2 * R_{first} - 2 * At)^2}{L^2} * \frac{dt}{2 * |E| + N + (p(\frac{\pi * ((R_{first} + At)^2 - (R_{first} - A + At)^2)}{L^2} * N) * H)t}$$

Η επίλυση της παραπάνω διαφορικής με το μαθηματικό εργαλείο *Mathematica* δίνει το παρακάτω αποτέλεσμα για τη μέση συνδεσιμότητα:

$$\begin{aligned} \ln(K_i + 1) &= \frac{1}{2 * H * L^2 * N * p * \pi} * [H * N * p * \pi * (2 * R_{first} - L + 2At)^2 + 4 * H * (2R_{first} - L) * N * p * \pi * (2R_{first} - L + 2At) \\ &\quad - (2\sqrt{H} * \sqrt{N} * \sqrt{p} * \sqrt{\pi}) * \frac{\left( A \left( 4 * H * N * p * \pi * R_{first}^2 - 4 * H * L * N * p * \pi * R_{first} + L^2 * (H * p * \pi * N + 2N + 4E) \right) \right)}{\sqrt{8 * L^2 * (N + 2 * E) - (A - 2 * R_{first})^2 H * N * p * \pi}} + \\ &\quad - 2 \left( 4 * H * N * p * \pi * R_{first}^3 - 4 * H * L * N * p * \pi * R_{first}^2 + L^2 * (H * p * \pi * N - 6 * N - 12 * E) * R_{first} + 4 * L^3 * (N + 2E) \right) * \frac{\sqrt{8 * L^2 * (N + 2 * E) - (A - 2 * R_{first})^2 H * N * p * \pi}}{\sqrt{8 * L^2 * (N + 2 * E) - (A - 2 * R_{first})^2 H * N * p * \pi}}] * \\ &\quad \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{H} * \sqrt{N} * \sqrt{p} * \sqrt{\pi} * (2 * R_{first} + A * (4 * t - 1))}{\sqrt{8 * L^2 * (N + 2 * E) - (A - 2 * R_{first})^2 H * N * p * \pi}} \right) * \\ &\quad + \left( 4 * H * N * p * \pi * R_{first}^2 - 4 * H * L * N * p * \pi * R_{first} + L^2 * (N * (H * p * \pi - 2) - 4 * E) \right) * \\ &\quad \log \left( (N + 2 * E) * 2 * L^2 + 2A * H * N * p * \pi * t * (2 * R_{first} + A * (2 * t - 1)) \right) ] + M = f(t) + M \end{aligned}$$

$$\ln(K_i + 1) = f(t) + M \quad (3.7)$$

$$K_i = -1 + e^{(f(t)+M)} = -1 + Be^{f(t)} \quad (3.8)$$

όπου το  $B$  καθορίζεται από την αρχική συνθήκη  $K_i(0) = C$ , και το  $K_i$  αποτελεί τη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου σε κάθε βήμα.

Στο Σενάριο 1 προσπαθούμε να επιτύχουμε μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού συνδέοντας κόμβους μεγάλου βαθμού με ακόμη περισσότερους κόμβους, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι όταν το μέσο μήκος διαδρομής για έναν κόμβο μειώνεται, μειώνεται και το μέσο μήκος διαδρομής για τους γείτονές του αντίστοιχα. Επομένως όσους περισσότερους γείτονες έχει ο επιλεγόμενος κόμβος, η μείωση της μέσης διαδρομής θα αφορά ακόμη περισσότερους κόμβους του δικτύου οδηγώντας σε μικρότερες τιμές μέσου μήκους διαδρομής δικτύου.

### 3.2.2 Σενάριο 2

Στο δεύτερο σενάριο υποθέτουμε ότι για την επιλογή του αρχικού σημείου της σύνδεσης λαμβάνεται υπόψη τόσο ο βαθμός του κόμβου δηλαδή το πλήθος των γειτόνων του όσο και η απόστασή του από το κέντρο της περιοχής που εξετάζουμε. Επιθυμούμε ο κόμβος να έχει μέγιστο βαθμό αλλά και μικρή απόσταση από το κέντρο. Επομένως ένας κόμβος έχει περισσότερες πιθανότητες να επιλεγεί ως αρχικό σημείο μιας σύνδεσης αν για αυτόν το γινόμενο βαθμός \* (1/απόσταση από το κέντρο) έχει μεγάλη τιμή. Τα παραπάνω κριτήρια στηρίζονται στο γεγονός ότι είναι λογικό κάποιος κόμβος που βρίσκεται κοντά στο κέντρο της εξεταζόμενης περιοχής να βρίσκεται στο μονοπάτι σύνδεσης πολλών ζευγών κόμβων με αποτέλεσμα η αύξηση της εμβέλειάς του να οδηγήσει στη μείωση αρκετών μονοπατιών που διασυνδέουν δύο κόμβους του δικτύου, άρα

και του μέσου μήκους διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου. Το τελικό σημείο της σύνδεσης επιλέγεται να είναι ένας από τους κόμβους που βρίσκονται στο δακτύλιο που εκτείνεται εντός ακτίνας από  $R_{min}$  μέχρι  $R_{max}$  του αρχικού σημείου.

Η απόσταση ενός κόμβου από το κέντρο με συντεταγμένες -  $(\frac{L}{2}, \frac{L}{2})$  - της περιοχής που εξετάζεται δίνεται από τον τύπο  $d = \sqrt{(x - \frac{L}{2})^2 + (y - \frac{L}{2})^2}$  όπου  $(x, y)$  οι συντεταγμένες του κόμβου. Η απόσταση  $d$  γίνεται ελάχιστη όταν το αντίστροφό της  $\frac{1}{d}$  μεγιστοποιείται. Επειδή πρόκειται για πιθανότητες θεωρούμε το κανονικοποιημένο μέγεθος  $\sum_{\text{all nodes } j}^{\frac{1}{d_j}}$  στους υπολογισμούς ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο να προκύψει πιθανότητα μεγαλύτερη της μονάδας αν η απόσταση του κόμβου από το κέντρο της περιοχής είναι μικρότερη της μονάδας.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι:

$$1. Q_1(k_i) = \sum_{\text{all nodes } j}^{k_i+1} (k_j + 1) * \sum_{\text{all nodes } j}^{\frac{1}{d_j}} \quad \text{που αντικατοπτρίζει τον τρόπο επιλογής του αρχικού κόμβου, που γίνεται με συνδυασμό δύο κριτηρίων, αφενός του βαθμού του κόμβου (είναι επιθυμητός ο μέγιστος δυνατός) και αφετέρου την απόσταση του από το κέντρο της περιοχής που εξετάζεται (είναι επιθυμητή η ελάχιστη δυνατή).}$$

Άρα ο ρυθμός μεταβολής της μέσης συνδεσιμότητας ενός κόμβου (3.4) γράφεται ως εξής (με χρήση της 3.5):

$$\frac{dk_i}{dt} = p * H * m_1(t) * Q_1(k_i) * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2}$$

$$\frac{dk_i}{dt} = p * H * \frac{\pi * ((R_{first} + At)^2 - (R_{first} - A + At)^2)}{L^2} * N * \sum_{\text{all nodes j}} \frac{k_i + 1}{(k_j + 1)} * \sum_{\text{all nodes j}} \frac{\frac{1}{d_i}}{\left(\frac{1}{d_j}\right)} * \frac{(L - 2 * R_{first} - 2 * At)^2}{L^2}$$

2. Το άθροισμα των βαθμών των κόμβων είναι:

$$Q(t) = \sum_{\text{all nodes j}} k_j = C + pm_1(t) * H * t$$

όπου  $t$  είναι το κάθε βήμα και  $C = 2 * |E|$  το αρχικό πλήθος των συνδέσεων  $|E|$  επί των παράγοντα 2 γιατί είναι αμφιδρομες και επομένως κάθε μία προσμετράται στο βαθμό 2 κόμβων του δικτύου. Ο συνολικός αριθμός των συνδέσεων ίσουται με το άθροισμα των παλιών και νέων συνδέσεων

$$|E_{new}| = |E| + (pm_1(t) * H)t$$

Η επίλυση της διαφορικής έχει ως εξής:

$$\frac{dk_i}{dt} = p * m_1(t) * H * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} * \sum_{\text{all nodes j}} \frac{k_i + 1}{(k_j + 1)} * \sum_{\text{all nodes j}} \frac{\frac{1}{d_i}}{\left(\frac{1}{d_j}\right)} \Rightarrow$$

$$\frac{dk_i}{k_i + 1} = p * m_1(t) * H * \sum_{\text{all nodes j}} \frac{dt}{(k_j + 1)} * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} * \sum_{\text{all nodes j}} \frac{\frac{1}{d_i}}{\left(\frac{1}{d_j}\right)} \Rightarrow$$

$$R_{max} = R_{first} + At$$

$$\frac{dk_i}{k_i + 1} = p * m_1(t) * H * \frac{(L - 2 * R_{first} - 2 * At)^2}{L^2} * \frac{dt}{2 * |E| + N + (pm_1(t) * H)t} * \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{\text{all nodes } j} (\frac{1}{d_j})} \Rightarrow$$

$$\frac{dk_i}{k_i + 1} = p * H * \left( \frac{\pi * ((R_{first} + At)^2 - (R_{first} - A + At)^2)}{L^2} * N \right) * \frac{(L - 2 * R_{first} - 2 * At)^2}{L^2} * \frac{dt}{2 * |E| + N + (p(\frac{\pi * ((R_{first} + At)^2 - (R_{first} - A + At)^2)}{L^2} * N) * H)t} * \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{\text{all nodes } j} (\frac{1}{d_j})}$$

Η επίλυση της παραπάνω διαφορικής με το μαθηματικό εργαλείο *Mathematica* δίνει το παρακάτω αποτέλεσμα για τη μέση συνδεσιμότητα:

$$\begin{aligned} \ln(K_i + 1) &= \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{\text{all nodes } j} (\frac{1}{d_j})} * \\ &\frac{1}{2 * H * L^2 * N * p * \pi} * [H * N * p * \pi * (2R_{first} - L + 2At)^2 + 2 * H * (2R_{first} - L) * N * p * \pi * (2R_{first} - L + 2At) \\ &- (2\sqrt{H} * \sqrt{N} * \sqrt{p} * \sqrt{\pi}) * [\frac{(A (4 * H * N * p * \pi * R_{first}^2 - 4 * H * L * N * p * \pi * R_{first} + L^2 * (H * p * \pi * N + 2N + 4E)))}{\sqrt{8 * L^2 * (N + 2 * E) - (A - 2 * R_{first})^2 H * N * p * \pi}} + \\ &- 2 (4 * H * N * p * \pi * R_{first}^2 - 4 * H * L * N * p * \pi * R_{first}^2 + L^2 * (H * p * \pi * N - 6 * N - 12 * E) * R_{first} + 4 * L^3 * (N + 2E)) * \\ &\sqrt{8 * L^2 * (N + 2 * E) - (A - 2 * R_{first})^2 H * N * p * \pi}] * \\ &\tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{H} * \sqrt{N} * \sqrt{p} * \sqrt{\pi} * (2 * R_{first} + A * (4 * t - 1))}{\sqrt{8 * L^2 * (N + 2 * E) - (A - 2 * R_{first})^2 H * N * p * \pi}} \right) * \\ &+ (4 * H * N * p * \pi * R_{first}^2 - 4 * H * L * N * p * \pi * R_{first} + L^2 * (N * (H * p * \pi - 2) - 4 * E)) * \\ &\log((N + 2 * E) * 2 * L^2 + 2 * A * H * N * p * \pi * t * (2 * R_{first} + A * (2 * t - 1))) * V] + V = z(t) + V \end{aligned}$$

$$\ln(K_i + 1) = z(t) + V \quad (3.9)$$

$$K_i = -1 + e^{(z(t)+V)} = -1 + D e^{z(t)} \quad (3.10)$$

όπου η συνδεσιμότητα ενός κόμβου εξαρτάται από την απόστασή του από το κέντρο. Το  $D$  καθόριζεται από την αρχική συνθήκη  $K_i(0) = C$  ενώ το  $K_i$  αποτελεί τη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου σε κάθε βήμα αν θεωρηθεί ο μέσος όρος του για όλα τα  $d_i$  δηλαδή

$$E_{d_i}(k_i) = \sum_i p_{d_i} * K_i(d_i)$$

όπου  $p_{d_i}$  η πιθανότητα ο κόμβος  $i$  να απέχει από το κέντρο απόσταση  $d_i$ .

Στο Σενάριο 2 όπως και στο Σενάριο 1 προσπαθούμε να επιτύχουμε μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού συνδέοντας κόμβους μεγάλου βαθμού με ακόμη περισσότερους κόμβους εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι όταν το μέσο μήκος διαδρομής για έναν κόμβο μειώνεται, μειώνεται και το μέσο μήκος διαδρομής για τους γείτονές του αντίστοιχα. Ταυτόχρονα επιθυμούμε οι κόμβοι να βρίσκονται κοντά στο κέντρο της εξεταζόμενης περιοχής, ώστε να αποτελούν ενδιάμεσο βήμα στα μονοπάτια σύνδεσης πολλών κόμβων και επομένως η αύξηση της εμβέλειας τους να οδηγήσει σε συντομεύσεις πολλών μονοπατιών.

### 3.3 Διαφοροποίηση της υπόθεσης προσθήκης μονόδρομων ζεύξεων

Στην περίπτωση αυτή οι νέες συνδέσεις που προστίθενται θεωρούνται αμφίδρομες - επομένως η ακτίνα μετάδοσης δεν αυξάνεται μόνο στον επιλεγμένο κόμβο αλλά και στους κόμβους με τους οποίους συνδέεται. Το γεγονός αυτό αποτελεί και την κύρια διαφορά με την προηγούμενη εκδοχή του μοντέλου και το ενδιαφέρον του έγκειται στο ότι πόσο μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένα αποτελέσματα. Η μαθηματική του ανάλυση είναι πιο δύσκολη ωστόσο οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στο μέσο μήκος μονοπατιού, όπως θα φανεί και στις

προσομοιώσεις. Επιπλέον η αύξηση της ακτίνας μετάδοσης σε πολλούς κόμβους παρόλο που δεν πραγματοποιείται σύνδεση τους με όλους τους γείτονες στην περιοχή εμβέλειας συνιστά μη οικονομική μέθοδο καθώς η ενεργειακή κατανάλωση κάθε ασύρματου κόμβου αυξάνεται. Η αύξηση της ακτίνας μετάδοσης ενός κόμβου ισοδυναμεί με απευθείας σύνδεση (αμφίδρομη) του κόμβου με έναν επιλεγμένο αριθμό κόμβων στην επιπλέον περιοχή δακτυλίου που προστίθεται.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με την προηγούμενη και γι' αυτό δεν περιγράφεται εκ νέου με τη διαφορά ότι κάθε σύνδεση ψεωρείται αμφίδρομη και επομένως οι δύο κόμβοι που συνδέονται μπορούν αμοιβαία να στείλουν και να λάβουν δεδομένα. Οι αμφίδρομες συνδέσεις οδηγούν σε μεγάλη κατανάλωση ενέργειας συνολικά από το δίκτυο καθώς όλο και περισσότεροι κόμβοι χρειάζεται να αυξήσουν την ακτίνα τους. Όμως λογικά οδηγούν σε καλύτερο αποτέλεσμα όσον αφορά τη μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού.

Προκειμένου να καθορίσουμε το ρυθμό μεταβολής του  $k_i$  ξεκινάμε ορίζοντας το ρυθμό εισαγωγής  $r_1$ :

$r_1$ : αναφέρεται στην πρόσθεση  $m_1(t)$ , νέων συνδέσεων με πιθανότητα  $p$  και εκφράζεται ως

$$\frac{dk_i}{dt} = p * H * m_1(t) * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} * Q_1(k_i) + p * \frac{m_1(t)}{N} * (H)$$

όπου  $H$  είναι ο αριθμός των κόμβων που επιλέγονται ως αρχικοί των συνδέσεων και από την (3.5) ο παράγοντας  $\frac{m_1(t)}{N}$  προέκυψε ως:

$$\frac{m_1(t)}{N} = \frac{\frac{\pi * (R_{max}^2 - R_{min}^2)}{L^2} * N}{N} = \frac{\pi * (R_{max}^2 - R_{min}^2)}{L^2} = \frac{|B|}{L^2}$$

η πιθανότητα να επιλεγεί ένας από τους κόμβους που βρίσκονται στην περιοχή δακτυλίου  $B$  που προστίθεται στο εύρος του εξεταζόμενου κόμβου.

Το δεύτερο μέρος προκύπτει ως ένωση (άθροισμα πιθανοτήτων των αντίστοιχων ανεξάρτητων ενδεχομένων) του ενδεχομένου να επιλεγεί ένας κόμβος ως αρχή της σύνδεσης (πρώτος όρος) και του ενδεχομένου να επιλεγεί ο κόμβος ως τέλος της σύνδεσης (δεύτερος όρος). Η πιθανότητα να επιλεγεί ο κόμβος ως αρχή είναι η τομή (γινόμενο πιθανοτήτων των αντίστοιχων ανεξάρτητων ενδεχομένων) της επιλογής ενός κόμβου με πιθανότητα  $Q_1(k_i)$  και της προσθήκης σε αυτόν  $m_1(t)$  συνδέσεων με πιθανότητα  $p$  και του ενδεχομένου να βρίσκεται στην περιοχή  $W = (L - R_{max})^2$ . Η πιθανότητα να επιλεγεί ο κόμβος ως τέλος της σύνδεσης ισούται με την πιθανότητα να βρίσκεται ο κόμβος στην περιοχή εμβέλειας από  $R_{min}$  μέχρι  $R_{max}$  του επιλεγμένου κόμβου για καθέναν από τους  $H$  επιλεγμένους κόμβους, ώστε να προστεθεί σε αυτόν μία σύνδεση με πιθανότητα  $p$ .

Η διαδικασία  $p_2$  δε συνεισφέρει στο  $k_i$ .

Επομένως συνολικά ο ρυθμός μεταβολής  $k_i$  προκύπτει ως εξής:

$$\frac{dk_i}{dt} = p * H * m_1(t) * \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} Q_1(k_i) + p * \frac{m_1(t)}{N} * (H) \quad (3.11)$$

Η πιθανότητα επιλογής του κόμβου του οποίου θα αυξηθεί η ακτίνα,  $Q_1(k_i)$ , καθορίζεται όπως στην προηγούμενη εκδοχή για το μοντέλο (3.2.1). Για μία νέα σύνδεση το αρχικό της σημείο επιλέγεται ώστε να έχει μεγάλο βαθμό ενώ το τελικό της σημείο επιλέγεται να είναι στον κυκλικό δακτύλιο που εκτείνεται εντός ακτίνας από  $R_{min}$  μέχρι  $R_{max}$  του αρχικού σημείου.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι:

1.  $Q_1(k_i) = \sum_{\text{all nodes j}}^{\text{k}_i+1} \frac{1}{(k_j + 1)}$  που αντικατοπτρίζει τον τρόπο επιλογής του αρχικού κόμβου, που γίνεται με κριτήριο το βαθμό του και σκοπό την τελική εμφάνιση δημοφιλών κόμβων με μεγάλο αριθμό συνδέσεων.

'Αρρα

$$\frac{dk_i}{dt} = p * H * m_1(t) \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} \sum_{\text{all nodes } j} \frac{k_i + 1}{(k_j + 1)} + p * \frac{m_1(t)}{N} * (H)$$

2. Ο συνολικός αριθμός συνδέσεων προκύπτει ως άθροισμα των παλιών και νέων συνδέσεων και έχει ως εξής:

$$|E_{new}| = \frac{1}{2} * \sum_{\text{all nodes } j} k_j = C + (pm_1(t) * (H))t \Rightarrow$$

$$\sum_{\text{all nodes } j} k_j = 2 * C + 2 * (pm_1(t) * (H))t$$

όπου  $t$  είναι το κάθε βήμα και  $C = |E|$  το αρχικό πλήθος των συνδέσεων.

Ο παράγοντας  $\frac{1}{2}$  προκύπτει εξαιτίας των αμφιδρομων συνδέσεων.

Επομένως

$$\sum_{\text{all nodes } j} (k_j + 1) = 2 * |E| + 2 * (pm_1(t) * (H))t + N$$

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση γράφεται επίσης

$$\frac{dk_i}{dt} = p * H * m_1(t) \frac{(L - 2 * R_{max})^2}{L^2} \frac{k_i + 1}{2 * |E| + 2 * (pm_1(t) * (H))t + N} + p * \frac{m_1(t)}{N} * (H)$$

Όμως όπως αναφέρθηκε  $R_{max} = H + At$  και  $R_{min} = H - A + At$ .

Επιπλέον από την εξίσωση (3.5) ισχύει

$$m_1(t) = \frac{\pi * (R_{max}^2 - R_{min}^2)}{L^2} * N = \frac{\pi * ((H + At)^2 - (H - A + At)^2)}{L^2} * N$$

Κατά συνέπεια:

$$\frac{\frac{dk_i}{dt} = p * H * \left( \frac{\pi * ((R_{first} + At)^2 - (R_{first} - A + At)^2)}{L^2} * N \right) \frac{(L - 2 * R_{first} - 2 * A * t)^2}{L^2} * \\ \frac{k_i + 1}{2 * |E| + 2 * (p(\frac{\pi * ((R_{first} + At)^2 - (R_{first} - A + At)^2)}{L^2} * H * N))t + N} + p * \frac{\frac{\pi * ((R_{first} + At)^2 - (R_{first} - A + At)^2)}{L^2} * N}{N} * (H)}$$

Η επίλυση της διαφορικής με τη βοήθεια του *Mathematica* οδηγεί στο παρακάτω αποτέλεσμα:

$$J = \left[ 4HNp\pi R_{first}^2 - 4HLNp\pi R_{first} + L^2(N(Hp\pi - 1) - 2|E|) \right] \log \left[ (N + 2|E|)L^2 + 2AHNp\pi t(2R_{first} + A(2t - 1)) \right]$$

$$P = \left[ 4HNp\pi R_{first}^2 - 4HLNp\pi R_{first} + L^2(N(Hp\pi - 1) - 2|E|) \right] \log \left[ (N + 2|E|)L^2 + 2AHk_i(2R_{first} + A(2k_i - 1))Np\pi \right]$$

$$k_i(t) = e^{\frac{HNp\pi(-2R_{first}+L-2At)^2+2H(2R_{first}-L)Np\pi(2R_{first}-L+2At)-R+J}{4HL^2Np\pi}} * c_1 + \\ e^{\frac{HNp\pi(-2R_{first}+L-2At)^2+2H(2R_{first}-L)Np\pi(2R_{first}-L+2At)-R+J}{4HL^2Np\pi}} *$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{H N p \pi (-2 R_{first} - 2 A k_i + L)^2 - R + P + 2 H (2 R_{first} - L) (2 R_{first} + 2 A k_i - L) N p \pi}{4 H L^2 N p \pi} * \\
& I_1^t \left( \frac{e^{- \frac{H N p \pi (-2 R_{first} - 2 A k_i + L)^2 - R + P + 2 H (2 R_{first} - L) (2 R_{first} + 2 A k_i - L) N p \pi}{4 H L^2 N p \pi}}}{L^2 (4 H k_i^2 N p \pi A^2 - 2 H k_i N p \pi A^2 + 4 R_{first} H k_i N p \pi A + L^2 N + 2 L^2 |E|)} * \right. \\
& (8 H^2 k_i^3 N p^2 \pi^2 A^4 - 8 H^2 k_i^2 N p^2 \pi^2 A^4 + 2 H^2 k_i N p^2 \pi^2 A^4 + 8 H k_i^3 N p \pi A^4 - 4 H k_i^2 N p \pi A^4 \\
& + 16 R_{first} H^2 k_i^2 N p^2 \pi^2 A^3 - 8 R_{first} H^2 k_i N p^2 \pi^2 A^3 + 24 R_{first} H k_i^2 N p \pi A^3 \\
& - 8 R_{first} H k_i N p \pi A^3 - 8 H k_i^2 L N p \pi A^3 + 4 H k_i L N p \pi A^3 - 2 H L^2 p \pi |E| A^2 + 4 H k_i L^2 p \pi |E| A^2 \\
& + 8 R_{first}^2 H^2 k_i N p^2 \pi^2 A^2 - 2 H L^2 N p \pi A^2 + 4 H k_i L^2 N p \pi A^2 \\
& - 4 R_{first}^2 H N p \pi A^2 + 24 R_{first}^2 H k_i N p \pi A^2 + 4 R_{first} H L N p \pi A^2 - 16 R_{first} H k_i L N p \pi A^2 + \\
& \left. 4 R_{first} H L^2 p \pi |E| A + 4 R_{first} H L^2 N p \pi A + 8 R_{first}^3 H N p \pi A - 8 R_{first}^2 H L N p \pi * A \right) d k_i
\end{aligned}$$

To  $K_i$  αποτελεί τη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου σε κάθε βήμα.

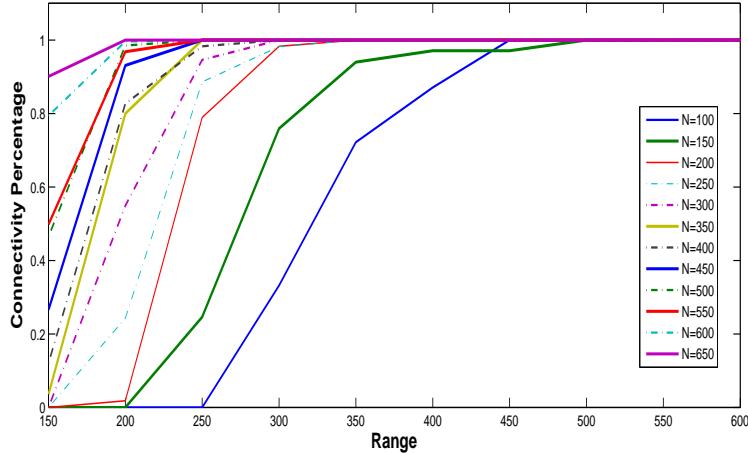
## Κεφάλαιο 4

# Προσομοίωση Μοντέλου Μετατροπής Δικτύων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα μοντέλα που αναλύθηκαν προηγουμένως. Τα προγράμματα που προσομοιώνουν τα μοντέλα αναπτύχθηκαν σε γλώσσα Matlab και εξετάστηκαν διάφορες τιμές παραμέτρων για να καταλήξουμε στις πιο αντιπροσωπευτικές. Αρχικά εξετάζεται ο τρόπος που επηρεάζει η επιλογή των τιμών των παραμέτρων τη συμπεριφορά των δικτύων με χρήση κατάλληλων διαγραμμάτων, στη συνέχεια επιλέγονται κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους και τέλος παρουσιάζονται τα μοντέλα και τα αποτελέσματά τους.

### 4.1 Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων του δικτύου

Στο τμήμα αυτό μελετάμε την επίδραση των παραμέτρων του δικτύου στη συνδεσιμότητα του, δεδομένου ότι θέλουμε να επιλέξουμε κατάλληλες τιμές παραμέτρων ώστε να μην αποτελούν εμπόδιο στην επίτευξη αποδεκτής συνδεσιμότητας στο δίκτυο. Οι παράμετροι αυτοί είναι:



Σχήμα 4.1: Συνδεσιμότητα σε σχέση με την ακτίνα μετάδοσης για δεδομένο πλήθος κόμβων

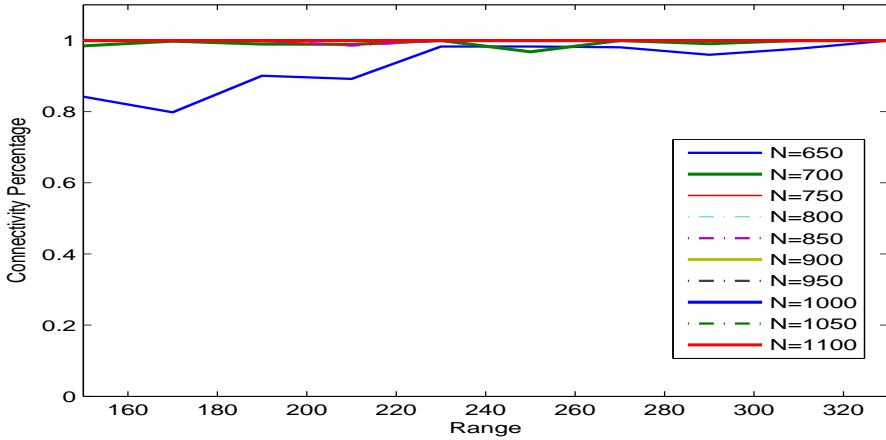
- (α) το πλήθος κόμβων  $N$
- (β) η ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου  $R$
- (γ) η πυκνότητα κόμβων στο δίκτυο  $\frac{N}{L^2}$  και το ποσοστό της περιοχής κάλυψης ενός κόμβου ως προς τη συνολική περιοχή  $\frac{\pi * R^2}{L^2}$
- (δ) το απαιτούμενο πλήθος διαφορετικών τοπολογιών που πρέπει να εξεταστούν ώστε να εξαχθούν μέσοι όροι αποτελεσμάτων εξασφαλίζοντας τη γενικότητα σε όλα τα δίκτυα. Παρακάτω παρουσιάζονται κατάλληλα διαγράμματα που επιτρέπουν την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

#### 4.1.1 Συνδεσιμότητα δικτύου ως συνάρτηση του εύρους μετάδοσης κάθε κόμβου

Από το Σχήμα 4.1 παρατηρούμε ότι για σταθερό πλήθος κόμβων  $N$ , η συνδεσιμότητα του δικτύου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα καθορισμένο κατώφλι ακτίνας μετάδοσης,

πάνω από την τιμή του οποίου κάθε γράφος που δημιουργείται είναι συνδεδεμένος. Το παραπάνω κατώφλι κυμαίνεται μεταξύ  $R = 200m$  και  $R = 250m$  για γράφους μεσαίου μεγέθους ( $N = 250 : 500$  κόμβοι). Όταν η ακτίνα μετάδοσης μειωθεί κάτω από  $R = 170m$  περίπου, η συνδεσιμότητα είναι ανέφικτη για την πλειοψηφία των γράφων. Από την άλλη μεριά, όταν η ακτίνα μετάδοσης αυξηθεί αρκετά, και γίνει συγκρίσιμη με τις διαστάσεις της περιοχής η οποία έχει πλευρά  $L = 2000m$  μέτρα στην περίπτωση των διαγραμμάτων που εξετάζουμε, δεν υπάρχει αβεβαιότητα όσον αφορά τη συνδεσιμότητα του γράφου. Αντιθέτως, είναι εμφανές ότι σχεδόν κάθε γράφος είναι συνδεδεμένος και το μέσο ποσοστό συνδεσιμότητας τείνει στη μονάδα. Μπορούμε ακόμη να παρατηρήσουμε, ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν είναι αντιπροσωπευτικά της συνολικής συμπεριφοράς του δικτύου όταν ο αριθμός των κόμβων είναι πολύ μικρός. Το ίδιο ισχύει και για γράφους με μεγάλο αριθμό κόμβων, γεγονός το οποίο συνεπάγεται υψηλή πυκνότητα, και κατά συνέπεια, χαμηλή πιθανότητα μη συνδεσιμότητας. Για γράφους μεσαίου μεγέθους, η μετάβαση από το μη συνδεδεμένο γράφο στο συνδεδεμένο δεν είναι γρήγορη, αλλά αντιθέτως, το ποσοστό συνδεσιμότητας μεταβάλλεται λίγο πιο απότομα από γραμμικά σε σχέση με την ακτίνα μετάδοσης.

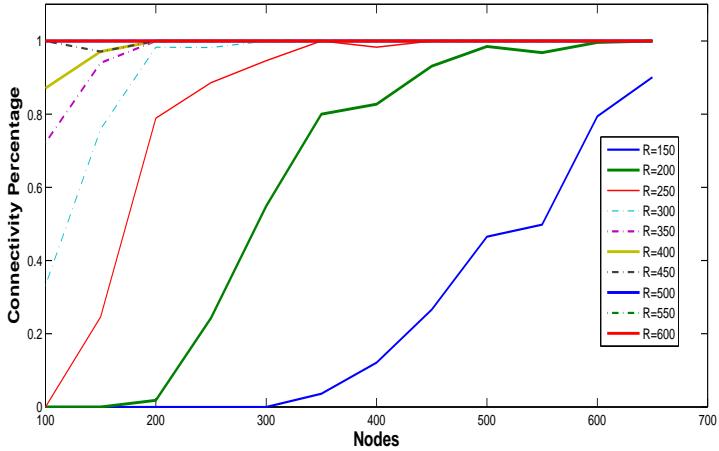
Στο Σχήμα 4.2 εξετάζονται πυκνά δίκτυα. Εξασφαλίζεται σε όλα ικανοποιητικό ποσοστό συνδεσιμότητας καθώς είναι όλα συνδεδεμένα σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% για ακτίνα μεγαλύτερη του  $R = 150m$ . Μάλιστα για πλήθος κόμβων  $N \geq 750$  το ποσοστό συνδεσιμότητας ισούται με τη μονάδα για όλες τις ακτίνες ενώ και για  $N = 700$  για μικρές ακτίνες, 9 στα 10 δίκτυα είναι συνδεδεμένα.



Σχήμα 4.2: Συνδεσιμότητα σε σχέση με την ακτίνα μετάδοσης για δεδομένο πλήθος κόμβων για πυκνά δίκτυα

#### 4.1.2 Συνδεσιμότητα διακτύου ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων

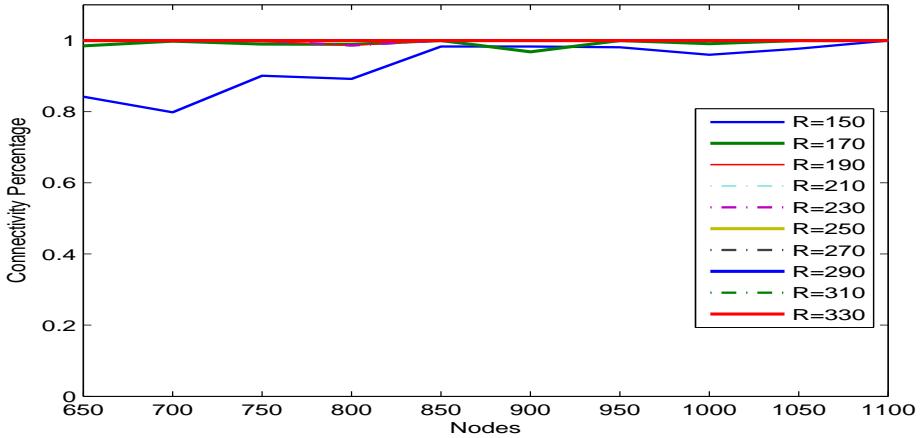
Από το Σχήμα 4.3 συμπεραίνουμε ότι αν θεωρήσουμε μία δισμένη ακτίνα μετάδοσης, το ποσοστό συνδεσιμότητας αυξάνεται καθώς προστίθενται κόμβοι στο δίκτυο. Το παραπάνω συμβαίνει εξαιτίας της αύξησης της πυκνότητας των κόμβων, οπότε με μία μεγάλη ακτίνα μετάδοσης τους επιτρέπεται να επικοινωνούν με περισσότερους κόμβους οι οποίοι θεωρούνται ως γείτονες. Επομένως, είναι πιθανόν ότι ο παραγόμενος γράφος θα είναι συνδεδεμένος και δεν θα υπάρχουν απομονωμένοι κόμβοι. Για πολύ μικρή ακτίνα μετάδοσης  $R = 150m$ ,  $R = 200m$ ,  $R = 250m$  απαιτείται μεγάλος αριθμός κόμβων για να επιτευχθεί συνδεσιμότητα,  $N = 600$  κόμβοι στις δύο πρώτες περιπτώσεις και  $N = 500$  περίπου στην τρίτη. Γενικά όσο η ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου αυξάνεται τόσο μειώνεται το κατώφλι του αριθμού των κόμβων ώστε να επιτευχθεί συνδεσιμότητα ίση με τη μονάδα. Ακτίνες μετάδοσης από  $R = 200m$  εως  $R = 500m$  απαιτούν ίσως και λιγότερους από  $N = 200$  κόμβους για επίτευ-



Σχήμα 4.3: Συνδεσιμότητα ως προς το πλήθος των κόμβων

ξη συνεκτικότητας στο γράφο στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Επιπλέον πολύ μεγάλες ακτίνες μετάδοσης εξασφαλίζουν τη συνδεσιμότητα σε δίκτυα οποιουδήποτε μεγέθους, ωστόσο μεγάλη ακτίνα μετάδοσης σημαίνει και υψηλή κατανάλωση ενέργειας, επομένως και κόστος, που πρέπει να αποφεύγεται λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των ασύρματων κόμβων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η πλευρά της εξεταζόμενης περιοχής είναι  $L = 2000m$ .

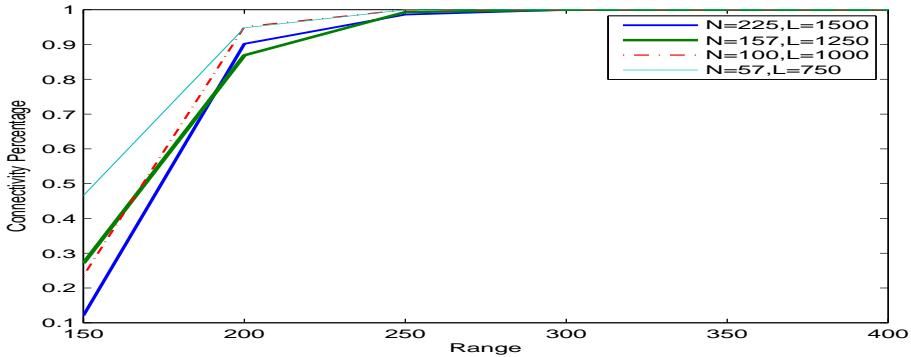
Εξετάζοντας και εδώ την περίπτωση των πυκνών δικτύων (Σχήμα 4.4) καθώς αυτά μας απασχολήσουν περισσότερο στην ανάλυση, παρατηρούμε ότι για ακτίνες  $R > 170m$  εξασφαλίζεται ποσοστό συνδεσιμότητας μεγαλύτερο του 95% σε όλες τις τοπολογίες δικτύων. Για  $R = 150m$  το ποσοστό συνδεσιμότητας για μικρές ακτίνες είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 0,8 και μπορεί να εκφραστεί ως ικανοποιητικό.



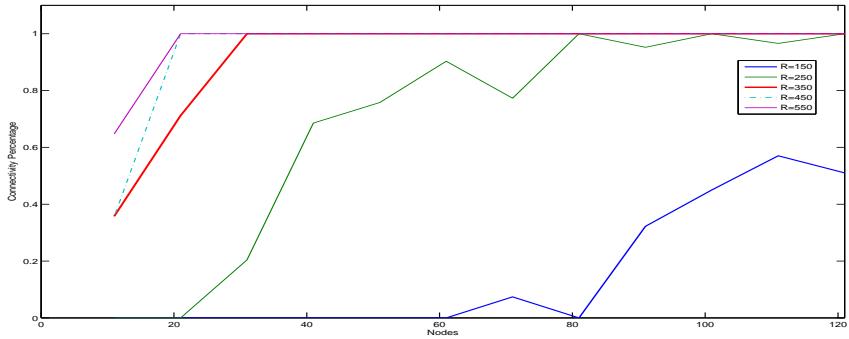
Σχήμα 4.4: Συνδεσιμότητα ως προς το πλήθος των κόμβων

#### 4.1.3 Σχέση συνδεσιμότητας σε δίκτυα σταθερής πυκνότητας $\frac{N}{L^2}$

Το Σχήμα 4.5 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο το ποσοστό συνδεσιμότητας μεταβάλλεται σε δίκτυα με σταθερή πυκνότητα αναφορικά με την ακτίνα μετάδοσης. Παρουσιάζουμε τέσσερα σενάρια, καθένα από τα οποία έχει παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά στη μορφή της καμπύλης. Επιπλέον οι τιμές της ακτίνας μετάδοσης έχουν προσαρμοστεί ώστε σε κάθε περίπτωση να εμπίπτουν σε μία εύλογη περιοχή λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι το κατώφλι για όλες τις περιπτώσεις είναι το ίδιο και ίσο με  $R = 250m$  περίπου. Οι γραφικές για όλες τις πυκνότητες παρουσιάζουν σημεία αλλαγής κλίσης σε ίδιες τιμές ακτίνας μετάδοσης αλλά οι κλίσεις τους στα επιμέρους τμήματα διαφοροποιούνται. Το σημαντικότερο είναι ότι αλλάζοντας την πυκνότητα δεν αλλάζει το κατώφλι, φυσικά εξετάζοντας πάντα περιοχές με ακμή αρκετά μεγαλύτερη της ακτίνας, ώστε να έχουν νόημα τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.5: Συνδεσιμότητα ως προς την ακτίνα μετάδοσης για πυκνότητα 100 κόμβους ανά  $km^2$

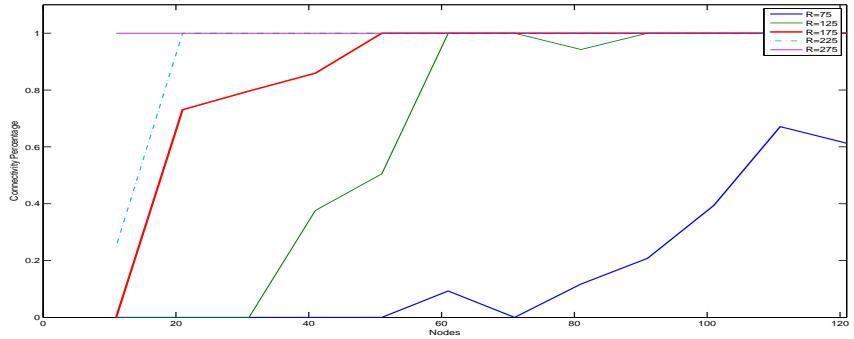


Σχήμα 4.6: Συνδεσιμότητα ως προς αριθμό κόμβων διατηρώντας σταθερή την περιοχή κάλυψης  $\frac{\pi R^2}{L^2}$ , ( $L = 1000m$ )

#### 4.1.4 Σχέση συνδεσιμότητας και πλήθους κόμβων με το ποσοστό της περιοχής κάλυψης κόμβου προς τη συνολική περιοχή δικτύου

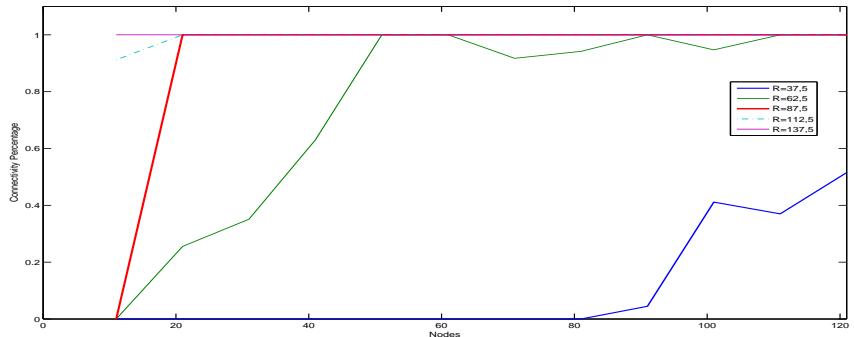
Η κανονικοποιημένη περιοχή κάλυψης κάθε κόμβου σε σχέση με την έκταση της περιοχής κάλυψης του δικτύου δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\pi R^2}{L^2}$$



Σχήμα 4.7: Συνδεσιμότητα ως προς αριθμό κόμβων διατηρώντας σταθερή την περιοχή κάλυψης  $\frac{\pi R^2}{L^2}$ , ( $L = 500m$ )

όπου το  $L$  αντιπροσωπεύει το μήκος πλευράς της τετραγωνικής περιοχής του δικτύου και το  $R$  αναπαριστά την ακτίνα μετάδοσης ενός κόμβου.



Σχήμα 4.8: Συνδεσιμότητα ως προς αριθμό κόμβων διατηρώντας σταθερή την περιοχή κάλυψης  $\frac{\pi R^2}{L^2}$ , ( $L = 250m$ )

Το Σχήμα 4.6 είναι για  $L = 1000m$ , το Σχήμα 4.7 για  $L = 500m$  ενώ το Σχήμα 4.8 αντιστοιχεί σε  $L = 250m$ .

Καθένα από τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζει το ποσοστό συνδεσιμότητας ως προς το μέγεθος του δικτύου, ενώ κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή της ακτίνας μετάδοσης  $R$ . Οι τιμές του  $R$  είναι επιλεγμένες ώστε η πυκνότητα για τις αντίστοιχες καμπύλες να είναι σταθερή και στα τρία

δίκτυα. Υποθέτουμε ότι σε κάθε δίκτυο όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια ακτίνα μετάδοσης. Για σταθερή πυκνότητα, η σχέση μεταξύ των ακτίνων μετάδοσης των κόμβων  $R, R_x$  που αντιστοιχούν σε περιοχές με μήκη πλευρών  $L, L_x$  πρέπει να είναι:

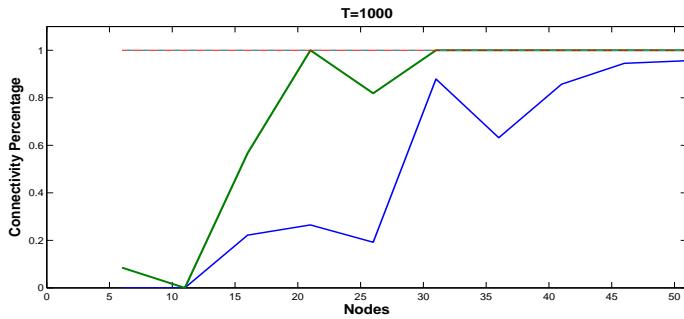
$$\frac{\pi R^2}{L^2} = \frac{\pi {R_x}^2}{L_x^2} \Rightarrow \frac{R}{R_x} = \frac{L}{L_x}$$

Για παράδειγμα ισχύει:  $\frac{R_1}{R_2} = 2$  όσον αφορά τα δύο πρώτα Σχήματα (4.6, 4.7) ενώ όσον αφορά το πρώτο και τρίτο Σχήμα (4.6, 4.8) πρέπει  $\frac{R_1}{R_3} = 4$ . Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες που αντιστοιχούν στην ίδια πυκνότητα (όσον αφορά την παράμετρο  $R$ ) έχουν περίπου την ίδια μορφή. Επιπρόσθετα οι προαναφερθείσες καμπύλες έχουν το ίδιο κατώφλι αριθμού κόμβων ώστε η συνδεσιμότητα του δικτύου να γίνει ίση με τη μονάδα και το δίκτυο να θεωρηθεί συνδεδεμένο. Η παραπάνω παρατήρηση είναι αναμενόμενη καθώς μειώνοντας την περιοχή στην οποία εκτείνεται το δίκτυο αναλογικά με την ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου, τότε το μέγεθος του δικτύου ή αλλιώς το πλήθος των απαιτούμενων κόμβων, ώστε να επιτευχθεί συνδεσιμότητα, παραμένει σταθερό.

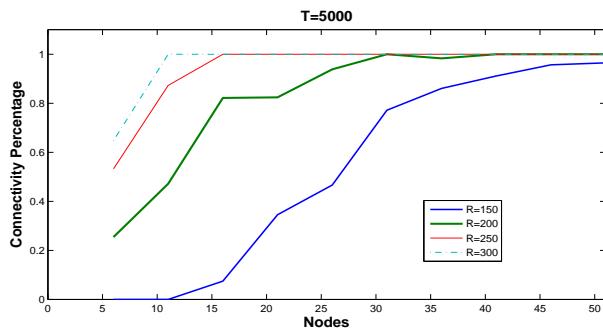
#### 4.1.5 Εξέταση του απαιτούμενου πλήθους των διαφορετικών τοπολογιών

Τέλος, είναι σημαντικός ο καθορισμός του πλήθους των τοπολογιών οι οποίες θα εξεταστούν για τον υπολογισμό του μέσου όρου των μελετώμενων μεγεθών έτσι ώστε να επιβεβαιώνεται κάθε φορά ότι τα αποτελέσματα είναι αντιπροσωπευτικά για κάθε δίκτυο.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές του  $T$ , το οποίο αντιπροσωπεύει το πλήθος των τοπολογιών που προσμετρούνται στο μέσο όρο και δίνουν κάθε σημείο της καμπύλης. Καταλήγουμε στην τιμή του  $T$  του οποίου κάθε επιπρόσθετη αύξηση δεν έχει εκτιμητέα



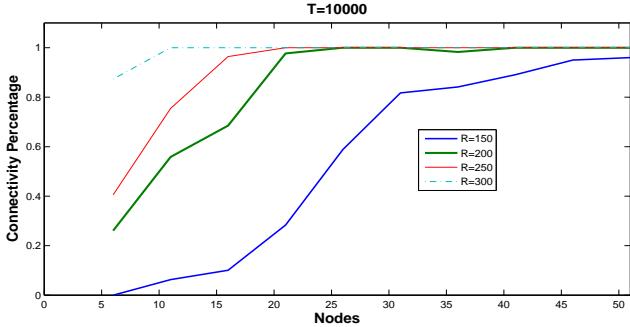
Σχήμα 4.9: Ποσοστό Συνδεσιμότητας ως προς το πλήθος των κόμβων και την ακτίνα μετάδοσης όταν οι μέσοι όροι υπολογίζονται για  $T=1000$  τοπολογίες



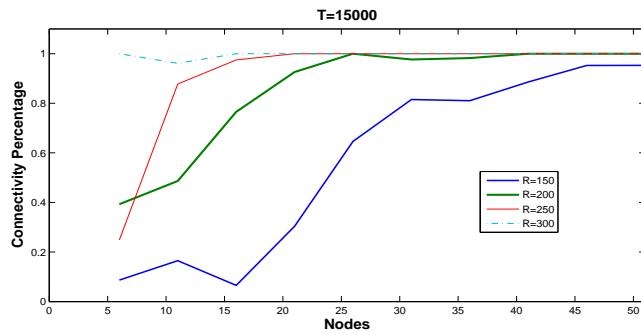
Σχήμα 4.10: Ποσοστό Συνδεσιμότητας ως προς το πλήθος των κόμβων και την ακτίνα μετάδοσης όταν οι μέσοι όροι υπολογίζονται για  $T=5000$  τοπολογίες

επίδραση στη μορφή των καμπυλών.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 αντικατοπτρίζουν όλα τα παραπάνω. Παρατηρούμε ότι η παράμετρος  $T$  πρέπει να τεθεί σε μία τιμή 1000-10000 ώστε να προκύψουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.11: Ποσοστό Συνδεσιμότητας ως προς το πλήθος των κόμβων και την ακτίνα μετάδοσης όταν οι μέσοι όροι υπολογίζονται για  $T=10000$  τοπολογίες



Σχήμα 4.12: Ποσοστό Συνδεσιμότητας ως προς το πλήθος των κόμβων και την ακτίνα μετάδοσης όταν οι μέσοι όροι υπολογίζονται για  $T=15000$  τοπολογίες

## 4.2 Συμπεράσματα για Συνεκτικότητα Τοπολογιών Προσομοίωσης

Συνοπτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω προσομοιώσεις είναι:

- (1) Για σταθερό πλήθος κόμβων η επίτευξη συνδεσιμότητας στο δίκτυο είναι ταχύτερη με αύξηση της ακτίνας μετάδοσης των κόμβων. Όσο μεγαλύτερο το πλήθος των κόμβων, δηλαδή όσο αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου τόσο μικρότερο είναι το κατώφλι της ακτίνας για την επίτευξη της συνδεσιμότητας.

- (2) Για σταθερή ακτίνα μετάδοσης (περιοχή ή εύρος μετάδοσης) η επίτευξη συνδεσιμότητας στο δίκτυο είναι ταχύτερη με αύξηση του πλήθους των κόμβων. Όσο μεγαλύτερη η ακτίνα τόσο μικρότερο είναι το πλήθος των κόμβων που απαιτούνται για να εξασφαλιστεί η συνεκτικότητα στο δίκτυο.
- (3) Δίκτυα με ίδιο ποσοστό εύρους κάλυψης ενός κόμβου και δίκτυα με την ίδια πυκνότητα παρουσιάζουν αρκετά όμοιες καμπύλες και περίπου ίσα κατώφλια για επίτευξη συνδεσιμότητας.
- (4) Πλήθος τοπολογιών 1000-10000 είναι ικανοποιητικό ώστε να υπολογιστούν μέσοι όροι χαρακτηριστικών τιμών του δικτύου.

### 4.3 Επιλογή των παραμέτρων

Η τοπολογία των ασύρματων κόμβων προκύπτει με τυχαία και ομοιόμορφη τοποθέτηση των κόμβων σε μία τετραγωνική περιοχή εμβαδού  $L^2$ , με χρήση της συνάρτησης '*rand*' στη *Matlab* για την παραγωγή τυχαίων συντεταγμένων των κόμβων.

Κάθε σημείο των καμπυλών, δηλαδή κάθε αποτέλεσμα, προκύπτει με εξεταση πολλών τοπολογιών πλήθους  $T$  και υπολογισμό του μέσου όρου των αποτελεσμάτων της κάθε τοπολογίας. Επιπλέον είναι απαραίτητο τα δίκτυα που εξετάζουμε να είναι συνδεδεμένα για την αρχική τιμή ακτίνας  $R_{first}$ . Συνεπώς αν μία τοπολογία δεν προκύψει συνδεδεμένη για την ακτίνα  $R_{first}$  δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του μέσου όρου.

Εξετάζεται η περίπτωση όπου η τετραγωνική περιοχή διατηρείται σταθερή σε εμβαδό, ενώ μεταβάλλεται το πλήθος των κόμβων, επομένως και η πυκνότητα των κόμβων. Τα δίκτυα που εξετάζονται είναι πυκνά. Για κάθε πλήθος κόμβων στην περιοχή συγχρίνεται το μέσο μήκος διαδρομής έτσι όπως προκύπτει από το μοντέλο για τον τυχαίο γεωμετρικό γράφο, τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και

το μοντέλο για το δίκτυο μικρού-κόσμου (*small – world*). Το δίκτυο τύπου μικρού-κόσμου κατασκευάζεται από έναν κανονικό γράφο όπου κάθε κόμβος έχει αρχικά  $k$  γείτονες, στον οποίο οι συνδέσεις επαναπροσδιορίζονται ώστε να προκύψουν συντομεύσεις. Επιπλέον εξετάζεται και η περίπτωση όπου η πυκνότητα του δικτύου παραμένει σταθερή και επομένως δεν μεταβάλλεται το πλήθος των κόμβων στην περιοχή, αλλά μεταβάλλεται η αρχική ομοιόμορφη ακτίνα μετάδοσης των κόμβων του δικτύου. Στη δεύτερη αυτή περίπτωση το *small – world* δίκτυο έχει πάντα το ίδιο μέσο μήκος διαδρομής καθώς αυτό εξαρτάται μόνο από το πλήθος των κόμβων και όχι από την ακτίνα μετάδοσης.

Εκτός από το μέσο μήκος διαδρομής εξετάζεται και ο συντελεστής ομαδοποίησης του δικτύου (*clustering coefficient*) με σύγκριση των μοντέλων όπως και για το μέσο μήκος διαδρομής. Ο συντελεστής ομαδοποίησης ισούται με το μέσο όρο για όλους τους κόμβους, του πλήθους των συνδέσεων καθενός ως προς τις συνδέσεις που θα είχε αν ο γράφος ήταν πλήρης - δηλαδή όλοι συνδέονται με όλους.

Στον Πίνακα 4.2 συνοψίζονται οι περιοχές τιμών των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν:

Πίνακας 4.1: Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν

	L(m)	$R_{first}$ (m)	N	H	T	p	$R_{max}$ (m)	k
Τιμές	2000	150	650-1050	15 σταθερό ή 10%*N μεταβλητό	25	1	150-570	6

Όσον αφορά στη μέγιστη ακτίνα έχει αρχική τιμή 150m, ώστε να εξασφαλίζεται σε ικανοποιητικό ποσοστό συνδεσιμότητα σε συνδυασμό με το πλήθος των κόμβων που χρησιμοποιούμε, και αυξάνεται σε κάθε βήμα μέχρι μία τιμή που θα προσδιορίζεται αλλά δεν ξεπερνά τα 570m. Το βήμα αύξησης της α-

κτίνας θα είναι είτε  $20m$  είτε  $35m$ , ενώ η παράμετρος που δηλώνει το πλήθος των βημάτων  $R_{times}$  προσδιορίζεται ανάλογα με την τελική επιθυμητή τιμή της ακτίνας. Οι κόμβοι που επιλέγονται για πρόσθεση συνδέσμων όπως προαναφέρθηκε βρίσκονται σε μία μικρότερη τετραγωνική περιοχή  $(L - 2 * R_{max})^2$  η οποία έχει μέγιστη τιμή  $(2000 - 2 * 170)^2 = 1660^2 = 2755600m^2$  και ελάχιστη τιμή  $(2000 - 2 * 570)^2 = 860^2 = 739600m^2$ . Η αύξηση της ακτίνας  $R_{max}$  από  $150m$  σε  $150 + 20 = 170m$  πραγματοποιείται ήδη από το πρώτο βήμα.

Κάθε δίκτυο πρέπει να είναι αρχικά συνδεδεμένο για ακτίνα  $R_{first} = 150m$ . Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από το Σχήμα 4.1 σε μία περιοχή  $L = 2000m$  η τοποθέτηση 650 κόμβων εμφανίζει ποσοστό συνδεσιμότητας μεγαλύτερο του 0.9 από τιμή ακτίνας ίση με  $R_{first} = 150m$  και πάνω. Επομένως οι τοπολογίες δικτύων που θα απορριφθούν θα είναι σε ποσοστό μικρότερο του 0.1%. Το ίδιο γεγονός γίνεται φανερό και από το Σχήμα 4.3 όπου για ακτίνα  $R = 150m$  η συνδεσιμότητα αγγίζει το 0.9% περίπου αν οι κόμβοι στο δίκτυο είναι 650 ή περισσότεροι. Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουμε ανατρέχοντας στα διαγράμματα για τα πυκνά δίκτυα (Σχήμα 4.2), όπου όπως προαναφέρθηκε όλα τα δίκτυα με περισσότερους από 650 κόμβους εμφανίζουν ποσοστό συνδεσιμότητας κοντά στη μονάδα. Άρα οι τοπολογίες που θα απορριφθούν κατά τον υπολογισμό του μέσου όρου για τα τελικά αποτελέσματα θα είναι λίγες σε σχέση με το πλήθος των τοπολογιών που θα εξεταστούν. Επομένως θα εξεταστούν όπως προαναφέρθηκε πυκνά δίκτυα με πλήθος κόμβων από  $N = 650$  έως  $N = 1050$ . Για δίκτυα με περισσότερους από 700 κόμβους όλες οι συνδεσμολογίες θα προκύπτουν συνδεδεμένες, ενώ για το δίκτυο με τους 650 κόμβους ενδέχεται ένα 10% των τοπολογιών να απορριφθεί από την εξέταση λόγω μη συνδεσιμότητας.

Η πιθανότητα πρόσθεσης συνδέσεων θεωρείται ίση με τη μονάδα στα προ-

γράμματα ( $p = 1$ ) και επομένως προστίθενται συνδέσεις σε όλους τους επιλεγμένους κόμβους.

Οι τοπολογίες που χρησιοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι  $T=25$ . Σύμφωνα με τα διαγράμματα της ενότητας 4.1.5 χρειάζονται πολύ περισσότερες ωστόσο παρατηρήσεις ότι οι 25 τοπολογίες έδιναν ικανοποιητικά αποτελέσματα και ομαλές καμπύλες εινώ απαιτούσαν πολύ λιγότερο χρόνο για την προσομοίωση.

Τέλος, επιλέγονται σε πρώτη φάση σε κάθε βήμα 15 κόμβοι,  $H = 15$ , σταθεροί σε πλήθος ανεξάρτητα από τον αριθμό των κόμβων του δικτύου για να αυξηθεί οι ακτίνα τους και να προστεθούν σε αυτούς νέες συνδέσεις με τα εξής χριτήρια:

1. Να έχουν μεγάλο αριθμό συνδέσεων σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου.
2. Να βρίσκονται στην κατάλληλη τετραγωνική περιοχή που επιλέγεται για αποφυγή των φαινομένων των άκρων. (Κεφάλαιο 3)

Ελέγχεται ακόμα η περίπτωση όπου οι επιλεγμένοι κόμβοι δεν είναι σταθεροί σε πλήθος αλλά ο αριθμός τους είναι ποσοστό του συνολικού πλήθους των κόμβων και συγκεκριμένα το 10% του συνολικού πλήθους των κόμβων.

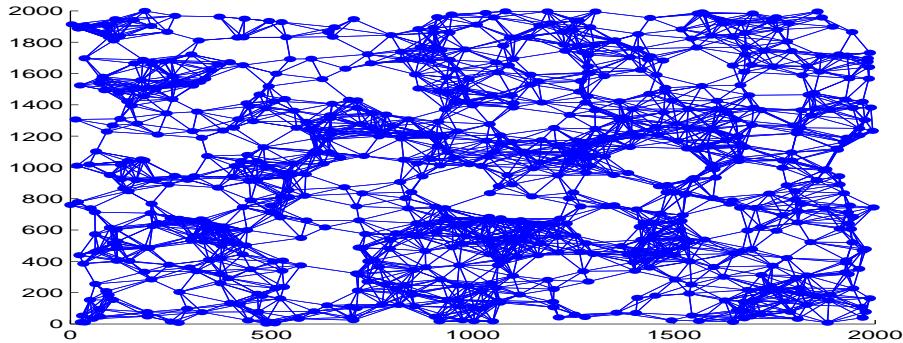
#### 4.4 Λειτουργία Μοντέλου Τροποποίησης Δικτύου

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος που λειτουργεί το πρώτο μοντέλο με τις μονόδρομες νέες συνδέσεις για μία τοπολογία με τα εξής χαρακτηριστικά:  $N = 750$  κόμβοι,  $R_{first} = 150m$  και 12 βήματα αύξησης ακτίνας. Δίνεται ουσιαστικά ένα παράδειγμα της λειτουργίας του βασικού μοντέλου που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.2.1. Με τον ίδιο τρόπο λειτουργούν και οι δύο επόμενες

τροποποιήσεις του βασικού μοντέλου καθώς και το ίδιο με οποιαδήποτε αλλαγή παραμέτρων.

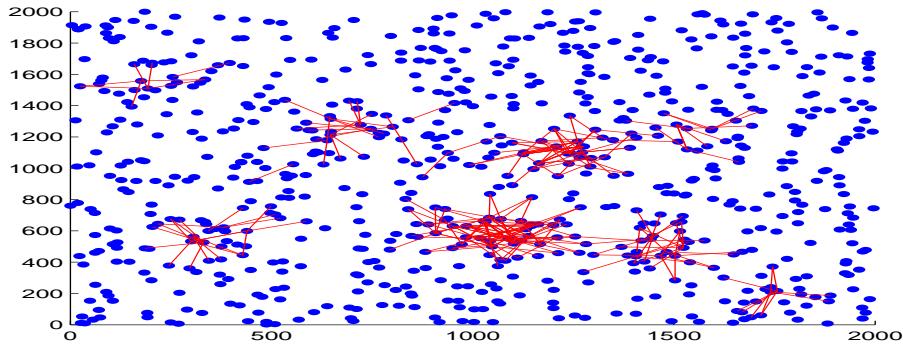
Η μέγιστη ακτίνα παίρνει τιμές από  $150m$  έως  $390m$  και αυξάνεται κάθε φορά κατά  $20m$  οπότε σε κάθε τοπολογία το μοντέλο εφαρμόζεται σε 12 βήματα ( $R_{times} = 12$ ) όπου στο καθένα το  $R_{max}$  αυξάνεται κατά 20 ενώ το  $R_{min}$  παίρνει την τιμή που είχε το  $R_{max}$  στο προηγούμενο βήμα. Οι κόμβοι που επιλέγονται για πρόσθεση συνδέσμων όπως προαναφέρθηκε βρίσκονται σε μία μικρότερη τετραγωνική περιοχή  $(L - 2R_{max})^2$  η οποία έχει μέγιστη τιμή  $(2000 - 2 * 170)^2 = 1660^2 = 2755600m^2$  και ελάχιστη τιμή  $(2000 - 2 * 390)^2 = 1220^2 = 1488400m^2$ . Οι επιλεγμένοι κόμβοι για προσθήκη συνδέσεων είναι το 10% των συνολικών δηλαδή  $H = 10\% * 750 = 75$ .

Το αρχικό μοντέλο τυχαίου γεωμετρικού γράφου έχει την τοπολογία που φαίνεται στο Σχήμα 4.13:



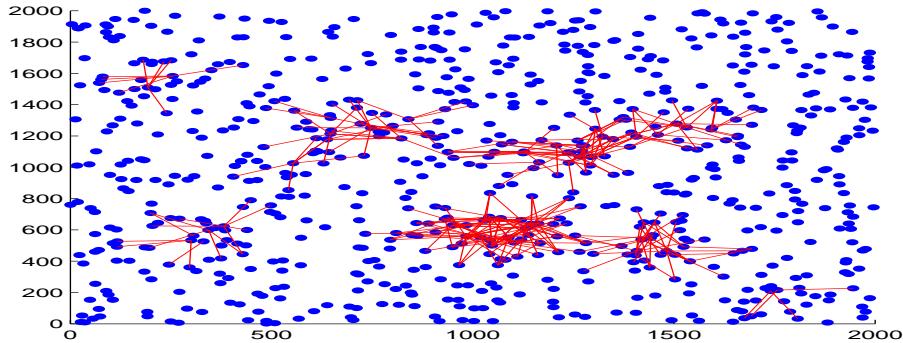
Σχήμα 4.13: Τοπολογία αρχικού δικτύου τυχαίου γεωμετρικού γράφου

Μετά το πρώτο βήμα προστίθενται θεωρητικά  $\frac{\pi*(R_{max}^2 - R_{min}^2)}{L^2} * N * H = \frac{\pi*(170^2 - 150^2)}{2000^2} * 750 * 75 = 282$  νέες συνδέσεις. Στο Σχήμα 4.14 φαίνονται οι συνδέσεις που προστέθηκαν στο πρώτο βήμα της προσομοίωσης που μπορεί να έχουν διαφορετικό πλήθος από το θεωρητικό.



$\Sigma\chi_4$ μα 4.14: Συνδέσεις που προστίθενται στο πρώτο βήμα της προσομοίωσης

Μετά το δεύτερο βήμα οι νέες συντομεύσεις είναι θεωρητικά  $\frac{\pi*(190^2-170^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 318$ . Όμοια στο αντίστοιχο  $\Sigma\chi_4$ μα 4.15 φαίνονται οι συνδέσεις που προστίθενται στην προσομοίωση.



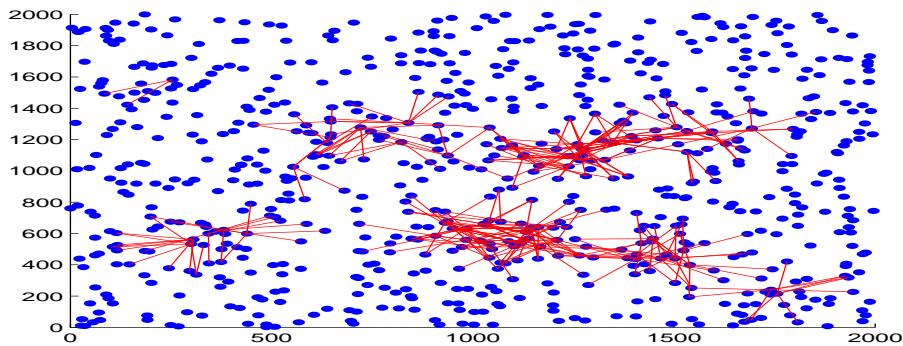
$\Sigma\chi_4$ μα 4.15: Συνδέσεις που προστίθενται στο δεύτερο βήμα της προσομοίωσης

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι θεωρητικές αυξήσεις για κάθε βήμα.  
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα  $\Sigma\chi_4$ ματα που δείχνουν τις συνδέσεις που προστίθενται σε μερικά από τα επόμενα βήματα.

Οι συνολικές νέες συνδέσεις φαίνονται στο  $\Sigma\chi_4$ μα 4.21.

Πίνακας 4.2: Θεωρητική αύξηση των συνδέσεων σε κάθε βήμα

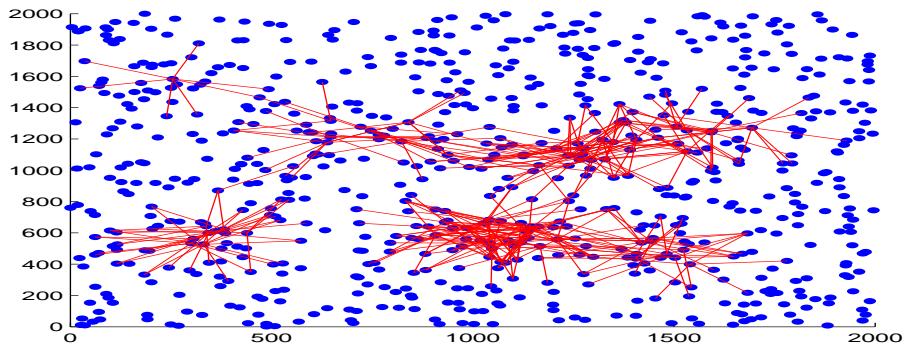
Βήματα	Θεωρητικό Πλήθος νέων συνδέσεων	Θεωρητική αύξηση στη μέση συνδεσιμότητα
Βήμα 1	$\frac{\pi*(170^2 - 150^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 282$	$282/750 = 0.376$
Βήμα 2	$\frac{\pi*(190^2 - 170^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 318$	$318/750 = 0.424$
Βήμα 3	$\frac{\pi*(210^2 - 190^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 353$	$353/750 = 0.47$
Βήμα 4	$\frac{\pi*(230^2 - 210^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 389$	$389/750 = 0.52$
Βήμα 5	$\frac{\pi*(250^2 - 230^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 424$	$424/750 = 0.57$
Βήμα 6	$\frac{\pi*(270^2 - 250^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 459$	$459/750 = 0.612$
Βήμα 7	$\frac{\pi*(290^2 - 270^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 495$	$495/750 = 0.66$
Βήμα 8	$\frac{\pi*(310^2 - 290^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 530$	$530/750 = 0.71$
Βήμα 9	$\frac{\pi*(330^2 - 310^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 565$	$565/750 = 0.75$
Βήμα 10	$\frac{\pi*(350^2 - 330^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 600$	$600/750 = 0.8$
Βήμα 11	$\frac{\pi*(370^2 - 350^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 636$	$636/750 = 0.848$
Βήμα 12	$\frac{\pi*(390^2 - 370^2)}{2000^2} * 750 * 75 \approx 672$	$672/750 = 0.896$



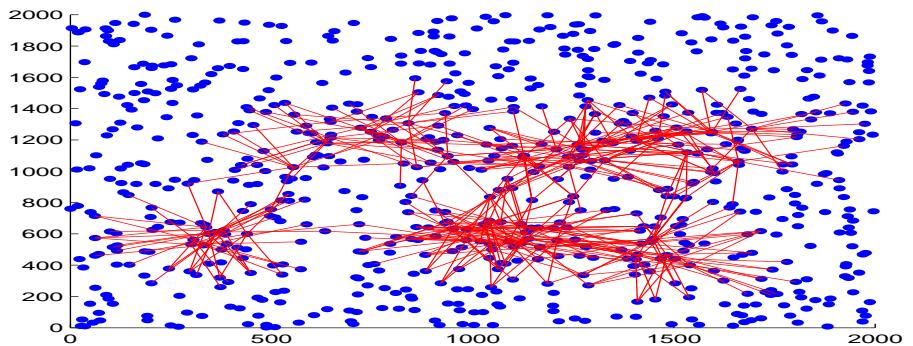
Σχήμα 4.16: Συνδέσεις που προστίθενται στο τρίτο βήμα της προσομοίωσης

Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού στο δίκτυο για κάθε βήμα εφαρμογής του Σεναρίου 1.

Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή ομαδοποίησης στο δίκτυο για κάθε βήμα εφαρμογής του Σεναρίου 1.



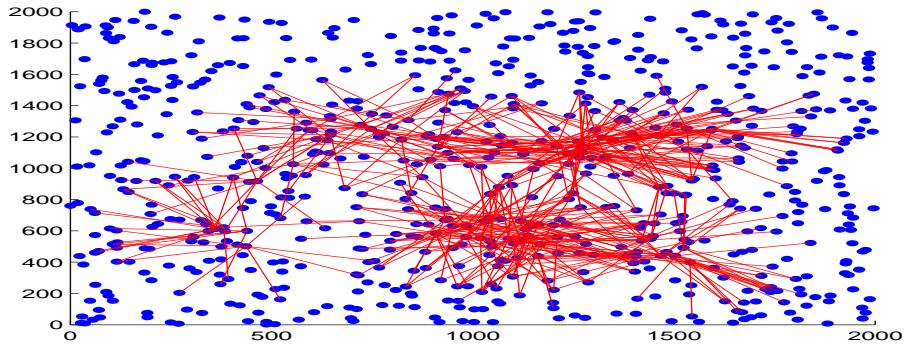
Σχήμα 4.17: Συνδέσεις που προστίθενται στο πέμπτο βήμα της προσομοίωσης



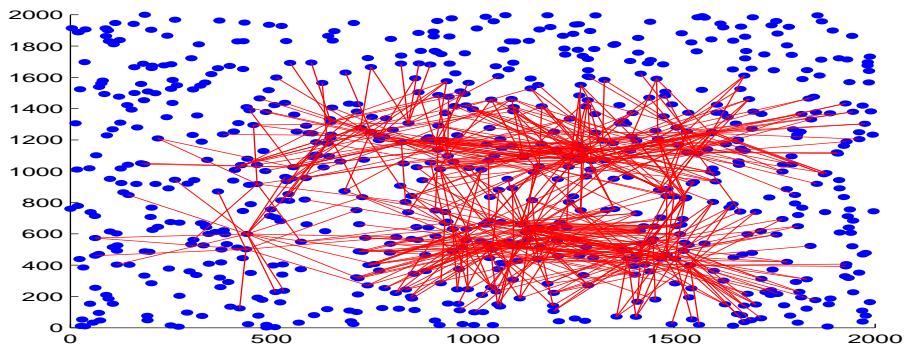
Σχήμα 4.18: Συνδέσεις που προστίθενται στο έβδομο βήμα της προσομοίωσης

Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζεται η διαφορά ανάμεσα στις αυξήσεις στις συνδέσεις που αναμένονται ψεωρητικά και σε εκείνες που προκύπτουν από την προσομοίωση.

Τέλος στο Σχήμα 4.25 φαίνεται σε κάθε βήμα εφαρμογής του Σεναρίου 1 η διαφορά ανάμεσα στον ψεωρητικό μέσο βαθμό κόμβου και σε εκείνον σε κάθε βήμα της προσομοίωσης.



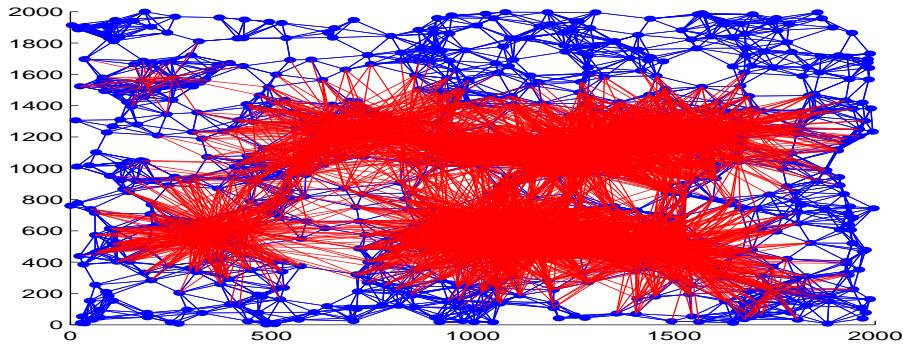
Σχήμα 4.19: Συνδέσεις που προστίθενται στο δέκατο βήμα της προσομοίωσης



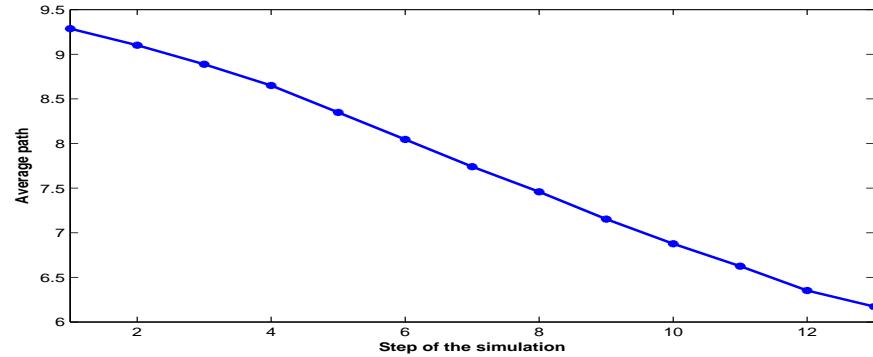
Σχήμα 4.20: Συνδέσεις που προστίθενται στο δωδέκατο βήμα της προσομοίωσης

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε τα εξής

1. Μείωση του μέσου μήκους διαδρομής όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της πρόσθεσης των συντομεύσεων (Σχήμα 4.22).
2. Αύξηση του συντελεστή ομαδοποίησης (Σχήμα 4.23) κάτι που είναι λογικό, αφού στους επιλεγμένους κόμβους οι γείτονες αυξάνονται. Συνεπώς δημιουργούνται ομάδες κόμβων με περισσότερα μέλη που οδηγούν σε αύξηση του συντελεστή ομαδοποίησης όπως προκύπτει από τον τύπο υπολογισμού του (4.3).
3. Στο Σχήμα 4.24 γίνεται φανερό ότι οι θεωρητικές αυξήσεις του μέσου βαθμού κόμβου με τις αυξήσεις όπως προκύπτουν από την προσομοίωση έχουν



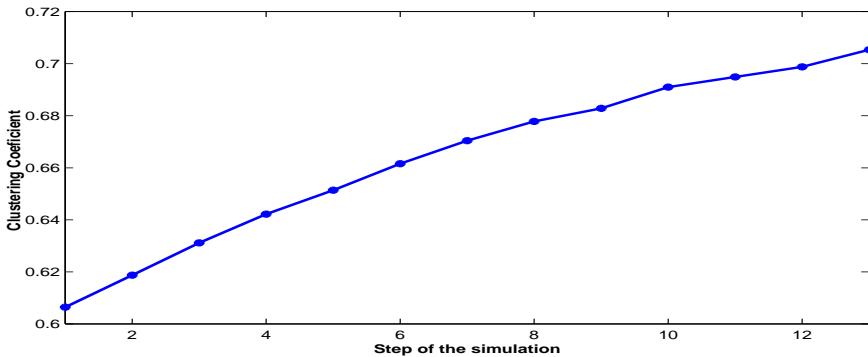
Σχήμα 4.21: Συνδέσεις που προστίθενται συνολικά



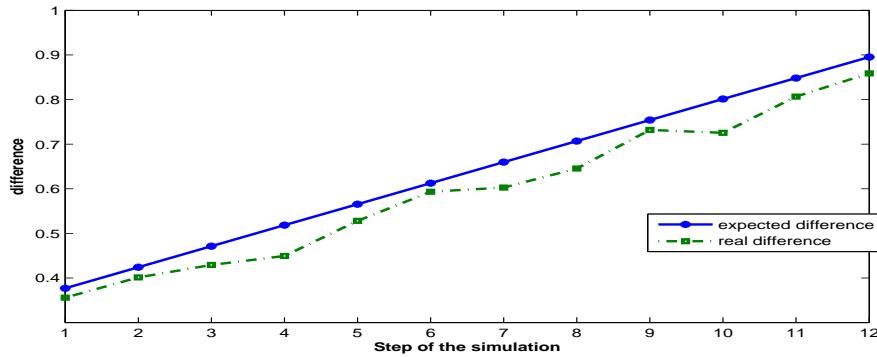
Σχήμα 4.22: Μείωση του Μέσου Μήκους Διαδρομής σε κάθε βήμα - Σενάριο 1

μικρή διαφορά και συνεπώς το σφάλμα του μοντέλου ως προς τη θεωρητική ανάλυση είναι μικρό. Οι θεωρητικές αυξήσεις έχουν υπολογιστεί και στον Πίνακα 4.2, όπου υπάρχει και η μέση αύξηση στη συνδεσιμότητα ενός κόμβου. Το σφάλμα που υπάρχει είναι της τάξεως του εκατοστού και οφείλεται στην ομοιόμορφη θεώρηση των κόμβων στην περιοχή, γεγόνος που μπορεί να διαφέρει από την πραγματική τοποθέτησή τους.

4. Ο μέσος βαθμός κόμβων όπως προκύπτει από την προσομοίωση υπολογίζεται σε κάθε βήμα ως ο μέσος όρος των πραγματικών βαθμών των κόμβων

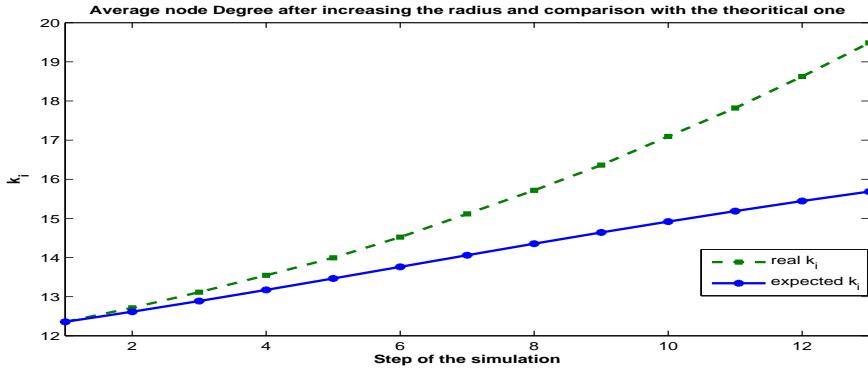


Σχήμα 4.23: Μεταβολή του Συντελεστή Ομαδοποίησης σε κάθε βήμα - Σενάριο 1



Σχήμα 4.24: Σύγκριση των θεωρητικών αυξήσεων και των αυξησεων από την προσομοίωση, στη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου - Σενάριο 1

της περιοχής. Ο θεωρητικός βαθμός κόμβων προκύπτει από τη σχέση (3.8) και υπολογίζεται σε κάθε βήμα. Παρατηρούμε στο Σχήμα 4.25 ότι ο πραγματικός μέσος βαθμός αυξάνεται σε κάθε βήμα, παρουσιάζοντας αύξηση της τάξεως του 0.5 όπως και ο θεωρητικός μέσος βαθμός, δηλαδή παρουσιάζουν και οι δύο αυξητική τάση με τη διαφορά ότι ο θεωρητικός βαθμός φαίνεται να αυξάνεται πιο συντηρητικά. Ωστόσο, στη θεωρητική ανάλυση υποθέτουμε ομοιόμορφη τοποθέτηση των κόμβων στην περιοχή γεγονός που μπορεί να μην ισχύει και οι συνδέσεις που υπολογίζονται μαθηματικά να είναι πολύ περισσότερες από

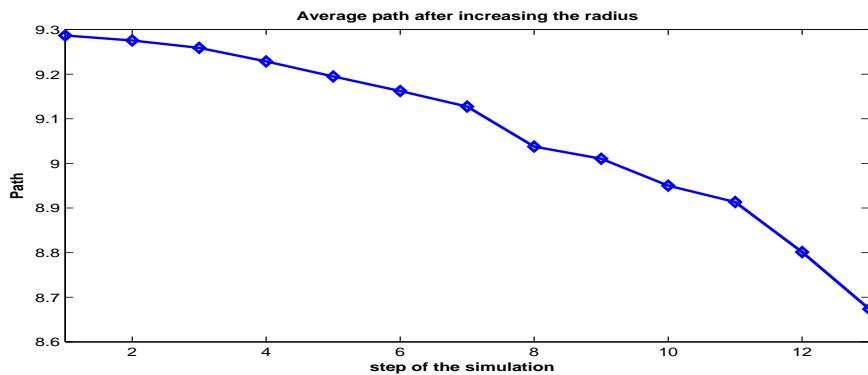


Σχήμα 4.25: Σύγκριση του θεωρητικού μέσου βαθμού κόμβου και του μέσου βαθμού που προκύπτει από την προσομοίωση - Σενάριο 1

εκείνες που προστίθενται στο αντίστροφο.

Για τις δύο επόμενες διαφοροποιήσεις (Σενάριο 2 και αμφίδρομες συνδέσεις) δεν παρουσιάζεται εκ νέου η λειτουργία του μοντέλου καθώς είναι όμοια με την προηγούμενη.

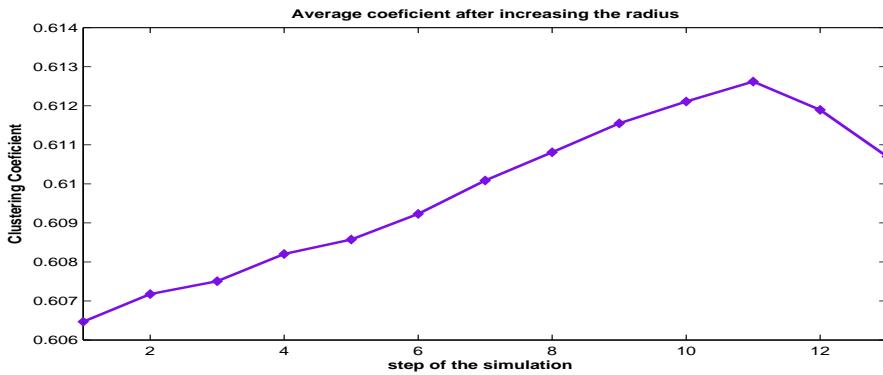
Αν χρησιμοποιηθεί το Σενάριο 2 με τις ίδιες παραμέτρους καταλήγουμε στα σχήματα 4.26, 4.27, 4.28.



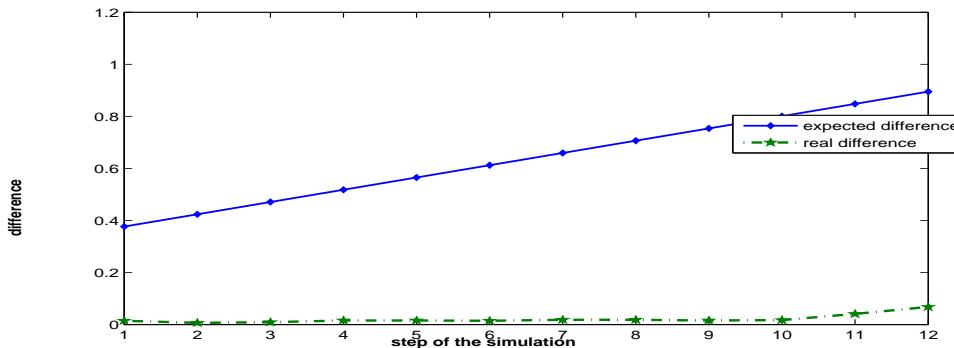
Σχήμα 4.26: Μείωση του Μέσου Μήκους Διαδρομής σε κάθε βήμα - Σενάριο 2

Παρατήρούμε τις εξής διαφορές σε σχέση με το Σενάριο 1:

- Καταρχάς, το μέσο μήκος μονοπατιού για τις ίδιες παραμέτρους προσο-



Σχήμα 4.27: Μεταβολή του Συντελεστή Ομαδοποίησης σε κάθε βήμα - Σενάριο 2



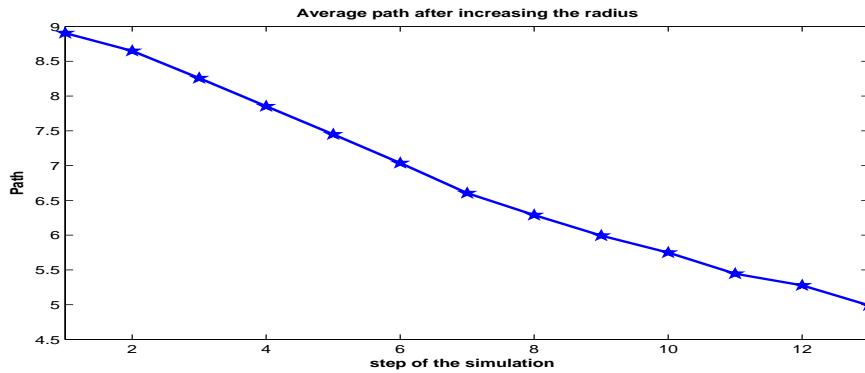
Σχήμα 4.28: Σύγκριση των θεωρητικών αυξήσεων και των αυξησεων από την προσομοίωση, στη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου - Σενάριο 2

μοίωσης με το Σενάριο 1 μειώνεται πολύ λιγότερο, γεγονός που αυτόματα καθιστά το εν λόγω σενάριο λιγότερο αποδοτικό σε σχέση με το Σενάριο 1.

- Επιπρόσθετα παρατηρείται πολυ μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις θεωρητικές και τις πραγματικές αύξησεις στη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στην υπόθεση ομοιόμορφης τοποθέτησης των κόμβων στην περιοχή στη θεωρητική ανάλυση, ωστόσο, η μεγάλη τιμή της διαφοράς συνιστά ένα ακόμη αρνητικό της μεθόδου.

Στο Σενάριο 2, όπως φαίνεται από την προσομοίωση υπερισχύει η απόσταση από το κέντρο για την επιλογή ενός κόμβου από το βαθμό του καθώς οι βαθμοί των κόμβων δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα την πιθανή επιλογή κόμβων με λίγους γείτονες και την προσθήκη λίγων συντομεύσεων. Κατά τα άλλα η συμπεριφορά των μεγεθών είναι όμοια με το Σενάριο 1.

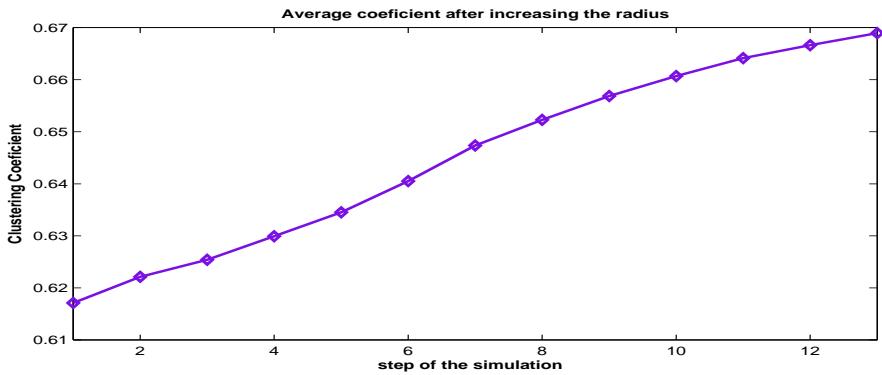
Αν στο μοντέλο χρησιμοποιηθεί το Σενάριο 1 με αμφίδρομες συνδέσεις, με τις ίδιες παραμέτρους καταλήγουμε στα Σχήματα 4.29, 4.30, 4.31:



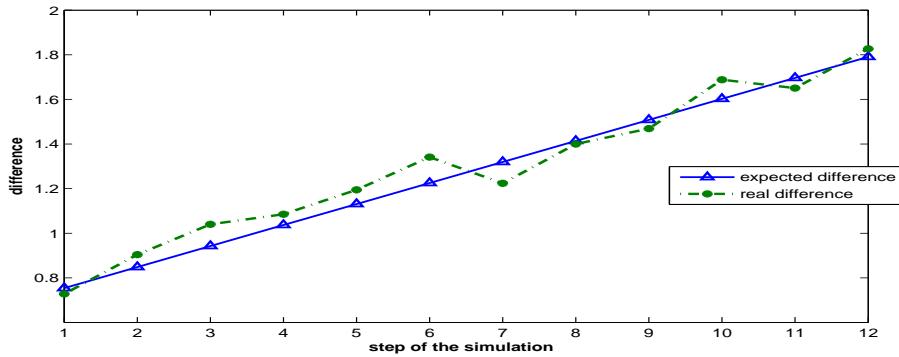
Σχήμα 4.29: Μείωση του Μέσου Μήκους Διαδρομής σε κάθε βήμα - Αμφίδρομες συνδέσεις στο Σενάριο 1

Στην περίπτωση των αμφίδρομων συνδέσεων άξιζει να σημειωθεί η πολύ μεγάλη μείωση του μέσου μήκους (Σχήμα 4.29) μονοπατιών για τις ίδιες παραμέτρους προσομοίωσεις με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις.

Γενικά άξιζει να παρατηρηθεί ότι η μέθοδος που ακολουθείται διατηρεί την ομαδοποίηση του τυχαίου γεωμετρικού γράφου, ενώ προσδίδει στο δίκτυο την ιδιότητα *small – world* μειώνοντας το μέσο μήκος μονοπατιού. Ως γενική παρατήρηση μπορεί να προκύψει ότι η μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού είναι μεγαλύτερη όταν οι κόμβοι που έχουν το μεγαλύτερο βαθμό βρίσκονται διάσπαρτοι μέσα στο δίκτυο παρά όταν είναι συγκεντρωμένοι σε μία περιοχή.



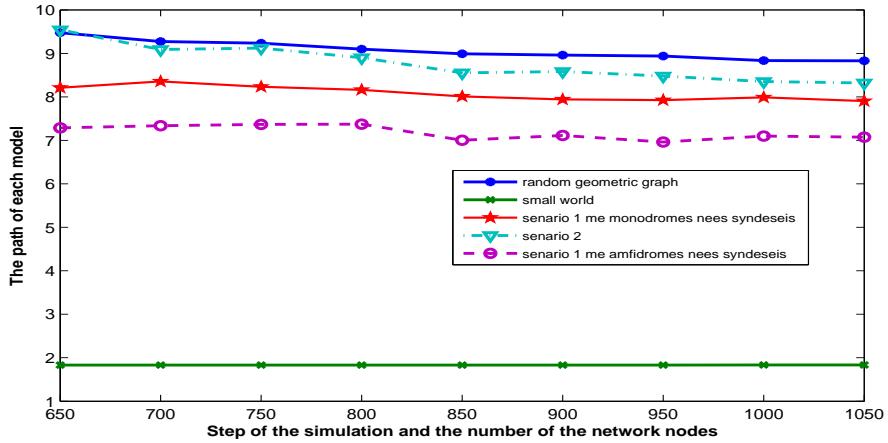
Σχήμα 4.30: Μεταβολή του Συντελεστή Ομαδοποίησης σε κάθε βήμα - Αμφιδρομες συνδέσεις στο Σενάριο 1



Σχήμα 4.31: Σύγκριση των θεωρητικών αυξήσεων και των αυξησεων από την προσομοίωση, στη μέση συνδεσιμότητα ενός κόμβου - Αμφιδρομες συνδέσεις στο Σενάριο 1

## 4.5 Σύγκριση του βασικού μοντέλων και των παραλλαγών του με τον τυχαίο γεωμετρικό γράφο και το δίκτυο μικρού-κόσμου

Στο Σχήμα 4.32 για κάθε πλήθος κόμβων στην περιοχή συγχρίνεται το μέσο μήκος διαδρομής έτσι όπως προκύπτει από το μοντέλο για τον τυχαίο γεωμετρικό γράφο, τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και το μοντέλο για το δίκτυο μικρού-κόσμου (*small – world*). Αναφέρεται στην προσθήκη συνδέσεων σε σταθερό

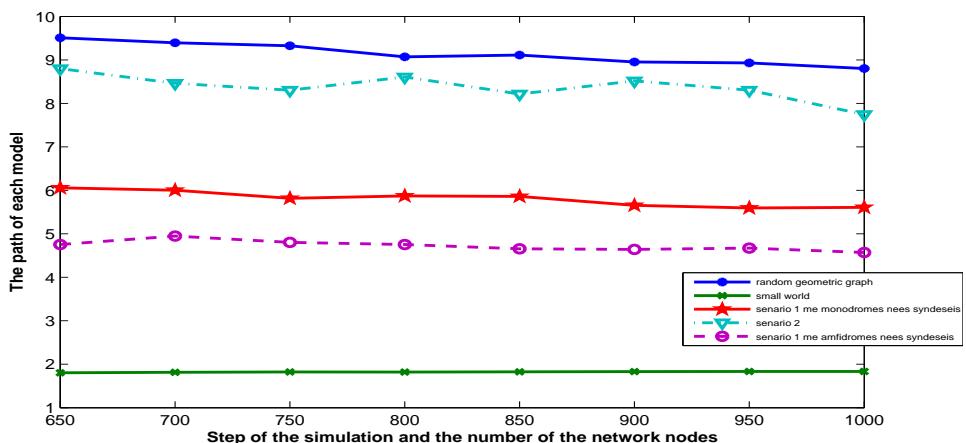


Σχήμα 4.32: Σύγκριση των μέσων μηκών διαδρομής των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με σταθερό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων  $H = 15$  και  $150m \leq R_{max} \leq 310m$

αριθμό κόμβων  $H = 15$  ανεξάρτητα από το πλήθος των κόμβων του δικτύου. Η μέγιστη ακτίνα  $R_{max}$  παίρνει τιμές από  $R_{max} = 150m$  έως  $R_{max} = 310m$ . Οι τιμές αυτές είναι λογικές για την περιοχή  $L^2 = 2000^2 m^2$  και οδηγούν σε βελτίωση του δικτύου με οικονομικό τρόπο. Ωστόσο το αποτέλεσμα που προκύπτει με αυτήν την επιλογή των παραμέτρων δεν είναι ικανοποιητικό γιατί το μέσο μήκος διαδρομής σε κάθε περίπτωση είναι πολύ μεγαλύτερο από εκείνο του δικτύου *small-world*. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο του τυχαίου γεωμετρικού γράφου δίνει το μεγαλύτερο μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε πλήθος κόμβων, ενώ αντίστοιχα το μοντέλο μικρού-κόσμου δίνει το μικρότερο μέσο μήκος μονοπατιού για κάθε αριθμό κόμβων. Από τις τρεις διαφοροποιήσεις του μοντέλου, σε κάθε πλήθος κόμβων, μικρότερο μήκος μονοπατιού παρουσιάζει το Σενάριο 1 με τις αμφίδρομες συνδέσεις, ακολουθεί το Σενάριο 1 με τις μονόδρομες συνδέσεις και τέλος χειρότερη απόδοση έχει το Σενάριο 2. Επομένως καλή επιλογή μοντέλου είναι το Σενάριο 1 με μονόδρομες συνδέσεις γιατί μειώνει αρκετά το μήκος μονοπατιού, ενώ δεν κοστίζει πολύ καθώς η ακτίνα μόνο ενός μικρού

ποσοστού των κόμβων αυξάνεται. Αν επιλεγούν αμφίδρομες συνδέσεις το κόστος αυξάνεται πολύ παρόλο που το μέσο μήκος μονοπατιού προσεγγίζει αυτό του δικτύου μικρού-κόσμου. Το κόστος οφείλεται στην αύξηση του εύρους μετάδοσης μεγάλου αριθμού κόμβων στο δίκτυο και την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας σε πολλούς κόμβους.

Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη μείωση στο μέσο μήκος διαδρομής αυξάνουμε λίγο τόσο την ακτίνα όσο και το πλήθος των κόμβων που επιλέγονται για την προσθήκη συνδέσεων καταλήγοντας στο επόμενο Σχήμα 4.33.

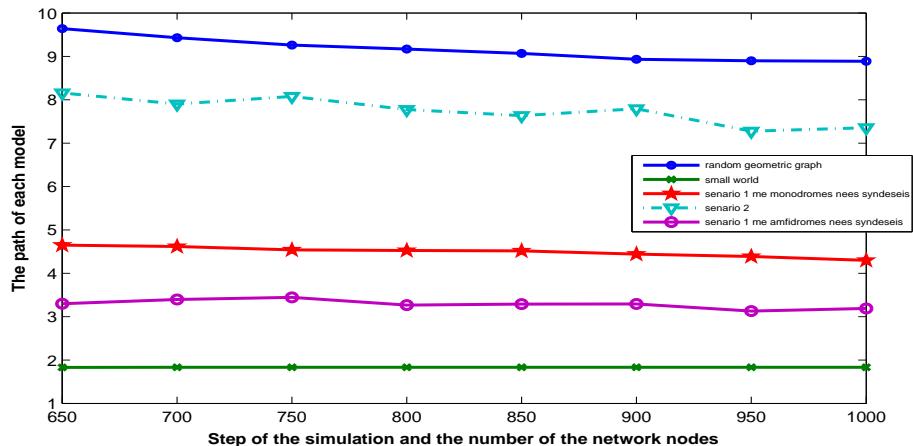


Σχήμα 4.33: Σύγκριση του μέσου μήκους διαδρομής των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με μεταβλητό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων  $H = 0.1N$  για προσθήκη συνδέσεων και  $150m \leq R_{max} \leq 390m$

Στο Σχήμα 4.33 για κάθε πλήθος κόμβων στην περιοχή συγκρίνεται το μέσο μήκος διαδρομής έτσι όπως προκύπτει από το μοντέλο για τον τυχαίο γεωμετρικό γράφο, τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και το μοντέλο για το δίκτυο μικρού-κόσμου (*small – world*). Αναφέρεται στην περίπτωση όπου οι κόμβοι που επιλέγονται στο μοντέλο για προσθήκη συνδέσεων δεν είναι σταθεροί σε αριθμό αλλά το πλήθος τους εκφράζεται ως ποσοστό του συνολικού αριθμού των κόμβων συγκεκριμένα επιλέγεται σε κάθε βήμα το 10% των συνολικών

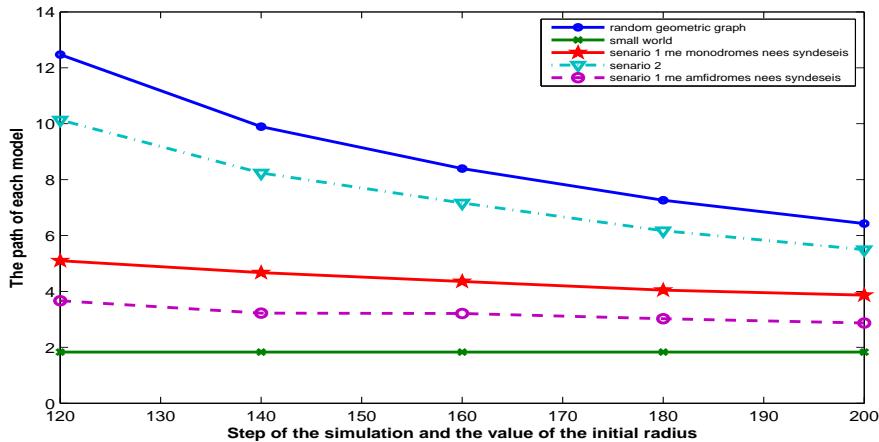
κόμβων για προσθήκη συντομεύσεων ( $H = 10\% * N$ ). Η μέγιστη ακτίνα  $R_{max}$  παίρνει τιμές από  $R_{max} = 150m$  έως  $R_{max} = 390m$ . Τα συμπεράσματα ως προς την αποτελεσματικότητα των μοντέλων είναι όμοια με προηγουμένως όμως παρατηρείται μία μεγαλύτερη μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού σε όλα τα μοντέλα σε σχέση με την προγούμενη περίπτωση που οφείλεται στο γεγονός ότι επιλέγονται περισσότεροι κόμβοι για προσθήκη συντομεύσεων αλλά και στη μικρή αύξηση της ακτίνας. Κατά συνέπεια το καλύτερο αποτέλεσμα συνεπάγεται και μεγαλύτερο κόστος.

Για μεγαλύτερη βελτίωση του αποτελέσματος αυξάνουμε ακόμη περισσότερο τη μέγιστη ακτίνα  $R_{max}$  και προκύπτει το Σχήμα 4.34.



Σχήμα 4.34: Σύγκριση του μέσου μήκους διαδρομής των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με μεταβλητό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων  $H = 0.1N$  για προσθήκη συνδέσεων και  $150m \leq R_{max} \leq 570m$

Οι τιμές της μέγιστης ακτίνας είναι από  $R_{max} = 150m$  έως  $R_{max} = 570m$ . Τα συμπεράσματα ως προς την αποτελεσματικότητα των μοντέλων είναι όμοια με προηγουμένως. Το τελικό μέσο μήκος μονοπατιού προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό εκείνο του δικτύου μικρού-κόσμου αν επιλεγεί το Σενάριο 1 με αμφίδρομες συνδέσεις.

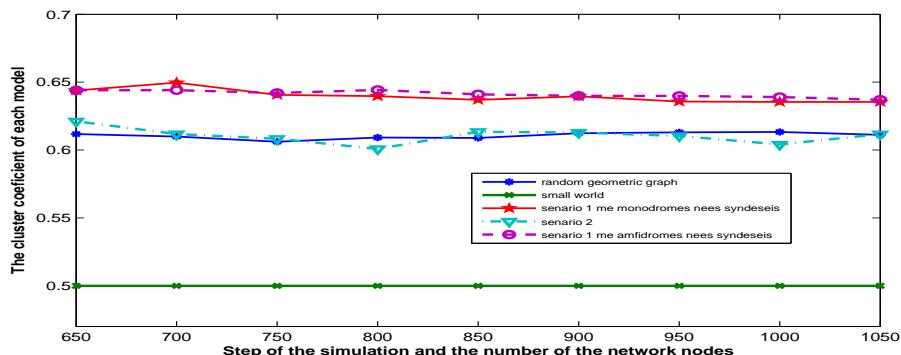


Σχήμα 4.35: Σύγκριση των μέσων μήκών διαδρομής των μοντέλων για διαφορετικές τιμές της αρχικής ακτίνας,  $H = 0.1N$  και  $150m \leq R_{max} \leq 570m$

Στο Σχήμα 4.35 απεικονίζεται η περίπτωση όπου η πυκνότητα του δικτύου παραμένει σταθερή και επομένως δεν μεταβάλλεται το πλήθος των κόμβων στην περιοχή, αλλά μεταβάλλεται η αρχική ομοιόμορφη ακτίνα μετάδοσης των κόμβων του δικτύου και συγχρίνεται το μέσο μήκος διαδρομής έτσι όπως προκύπτει από το μοντέλο για τον τυχαίο γεωμετρικό γράφο, τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και το μοντέλο για το δίκτυο μικρού-κόσμου (*small – world*). Όπως προαναφέρθηκε επειδή το δίκτυο μικρού-κόσμου κατασκευάζεται από ένα κανονικό γράφο χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ακτίνα μετάδοσης παραμόνο το πλήθος των κόμβων, στην περίπτωση αυτή το μέσο μήκος μονοπατιού του παραμένει σταθερό. Σε κάθε βήμα το 10% των συνολικών κόμβων επιλέγεται για προσθήκη συντομεύσεων. Η μέγιστη ακτίνα  $R_{max}$  παίρνει τιμές από  $R_{max} = 150m$  έως  $R_{max} = 570m$ . Τα συμπεράσματα είναι όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, το Σενάριο 1 με αμφίδρομες συνδέσεις παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά αλλά έχει μεγαλύτερο κόστος, ενώ οι μονοδρομες συνδέσεις στο Σενάριο 1 εξασφαλίζουν ισορροπία κόστους και ικανοποιητικής μείωσης του μέσου μήκους μονοπατιού.

Κάποια ακόμη συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

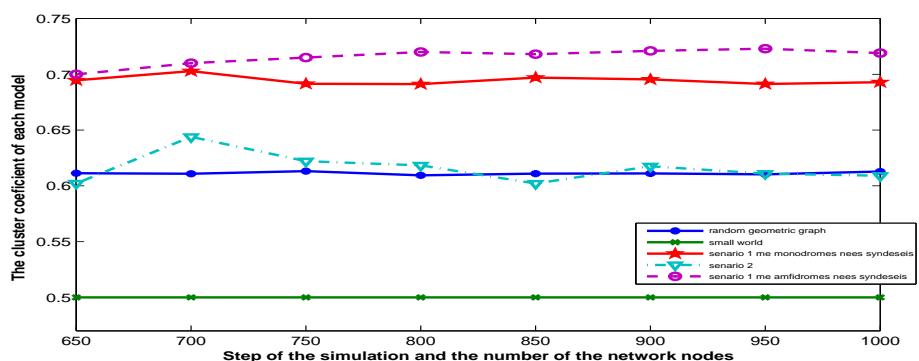
- 1) Όσο περισσότερο αυξάνεται η ακτίνα στους επιλεγμένους κόμβους (παράγοντας  $R_{times}$  στον Πίνακα 4.2), τόσο πιο πολύ μειώνεται το μέσο μήκος μονοπατιού και προσεγγίζει εκείνο του δικτύου μικρού-κόσμου. Ωστόσο πάντα θεωρούμε μία οικονομική μέθοδο και λογική για τις διαστάσεις τις περιοχής που επιλέγουμε και επομένως δεν αυξάνουμε απεριόριστα την ακτίνα.
- 2) Όσο περισσότερους κομβούς επιλέγουμε σε κάθε βήμα για να τους αυξήσουμε την ακτίνα (παράγοντας  $H$  στον Πίνακα 4.2), τόσο πιο πολύ μειώνεται το μέσο μήκος μονοπατιού και προσεγγίζει εκείνο του δικτύου μικρού-κόσμου. Εδώ πάλι υπάρχει ο περιορισμός της εξασφάλισης χαμηλού κόστους και μικρής κατανάλωσης ενέργειας από τους ασύρματους κόμβους.



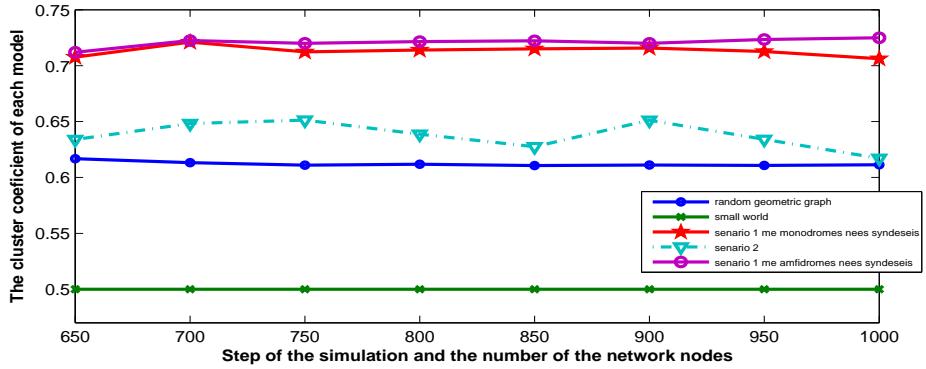
Σχήμα 4.36: Σύγκριση των συντελεστών ομαδοποίησης των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με σταθερό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων  $H = 15$  για προσθήκη συνδέσεων και  $150m \leq R_{max} \leq 310m$

Τέλος παρουσιάζονται τα σχήματα που συγχρινούν τις μεταβολές του συντελεστή ομαδοποίησης. Από τα σχήματα αυτά δεν προκύπτει κάποιο συμπέρασμα όσον αφορά στην καταλληλότητα του ενός ή του άλλου μοντέλου. Παρατηρείται γενικά μικρή μείωση του συντελεστή ομαδοποίησης με αύξηση του πλήθους των κόμβων του δικτύου. To *small – world* δίκτυο έχει το μικρότερο συντελεστή ομαδοποίησης όπως ήταν αναμενόμενο με βάση τη θεωρία. Παρατηρούμε ότι,

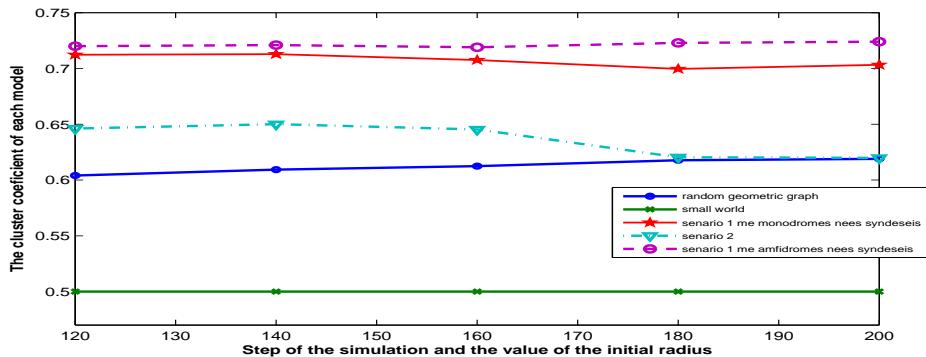
μετά την εφαρμογή των μοντέλων στον τυχαίο γεωμετρικό γράφο αυξάνεται ο συντελεστής ομαδοποίησης του δικτύου. Όσο αυξάνονται οι συνδέσεις που προσθέτουμε για παράδειγμα με αύξηση της ακτίνας ή του αριθμού των κόμβων στους οποίους προστίθενται συνδέσεις, τόσο αυξάνεται και ο συντελεστής ομαδοποίησης. Ωστόσο ο συντελεστής ομαδοποίησης εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως η τοπολογία του δικτύου και η συμπεριφορά του μοντέλου έχει βελτιστοποιηθεί ως προς το μέσο μήκος διαδρομής και όχι ως προς το συντελεστή ομαδοποίησης, λόγοι για τους οποίους δεν είναι αρκετά ομαλές οι καμπύλες στα σχήματα.



Σχήμα 4.37: Σύγκριση των συντελεστών ομαδοποίησης των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με μεταβλητό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων  $H = 0.1N$  για προσθήκη συνδέσεων και  $150m \leq R_{max} \leq 390m$



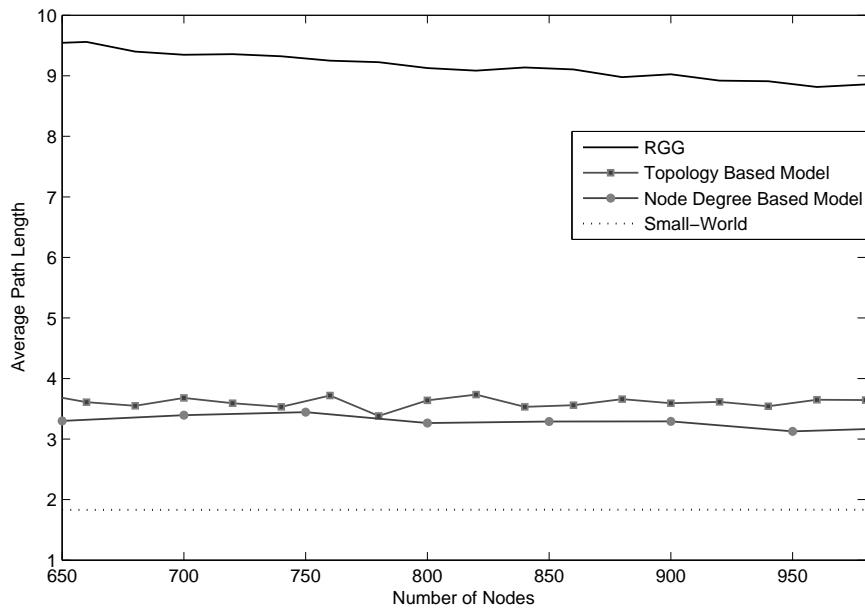
Σχήμα 4.38: Σύγκριση των συντελεστών ομαδοποίησης των μοντέλων για διαφορετικές πυκνότητες δικτύων με μεταβλητό αριθμό επιλεγόμενων κόμβων  $H = 0.1N$  για προσθήκη συνδέσεων και  $150m \leq R_{max} \leq 570m$



Σχήμα 4.39: Σύγκριση των συντελεστών ομαδοποίησης των μοντέλων για διαφορετικές τιμές αρχικής ακτίνας,  $H = 0.1N$  και  $150m \leq R_{max} \leq 570m$

## 4.6 Σύγκριση Μοντέλου που βασίζεται στο βαθμό κόμβου με το μοντέλο που βασίζεται στην τοπολογία [14]

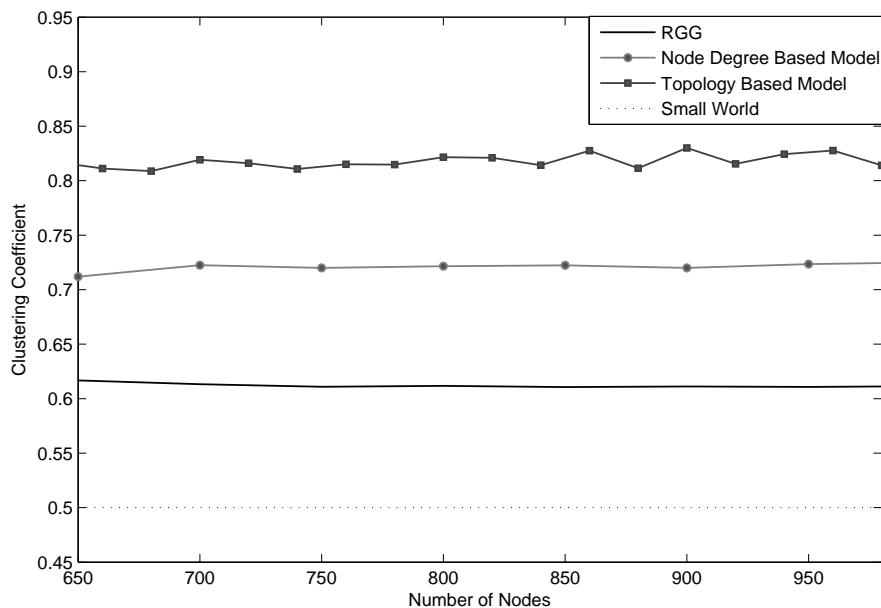
Όσον αφορά στη μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού, παρατηρείται στο Σχήμα 4.40 ότι τα δύο μοντέλα είναι εξίσου αποτελεσματικά. Οι τιμές που προκύπτουν για το μέσο μήκος μονοπατιού μετά την εφαρμογή κάθε μοντέλου βρισκόνται στο ίδιο επίπεδο, και προσεγγίζουν αυτές του *small-world* δικτύου.



Σχήμα 4.40: Μέσο Μήκος Μονοπατιού: Σύγκριση Μοντέλων

ου. Δεδομένου ότι τα τελικά αποτελέσματα ταυτίζονται για τις δύο μεθόδους, συμπεραίνουμε ότι η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου επαριέται στην προτίμηση του χρήστη. Ανάλογα δηλαδή με το σκοπό και τη λειτουργία που επιτελείται κάθε φορά, επιλέγεται το μοντέλο που βασίζεται στην τοπολογία ή το μοντέλο που βασίζεται στο βαθμό κόμβου.

Όσον αφορά στην αύξηση του παράγοντα ομαδοποίησης (Σχήμα 4.41), οι τιμές για τα δύο μοντέλα είναι μεν κοντά, παρουσιάζοντας δε μια μικρή απόκλιση που οφείλεται στην επιλογή των κόμβων, των οποίων η ακτίνα αυξάνεται. Παρόλο που ο παράγοντας ομαδοποίησης αυξάνεται και στα δύο μοντέλα, συγκριτικά με το αρχικό αλλά και το *small-world*, η αύξηση που επέρχεται για το πρώτο μοντέλο είναι λίγο μεγαλύτερη κυρίως εξαιτίας της επιλογής κόμβων βάσει τοπολογίας, που σημαίνει ότι η πλειοψηφία των επιλεγόμενων κόμβων βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις εντός μία σχεδόν οριοθετημένης περιοχής.



Σχήμα 4.41: Παράγοντας Ομαδοποίησης: Σύγκριση Μοντέλων

Από την άλλη, το μοντέλο που βασίζεται στο βαθμό κόμβου δε λαμβάνει υπόψη τη θέση κάθε κόμβου παρά μόνο το βαθμό του, γεγονός που εισάγει μεγαλύτερη τυχαιότητα όσον αφορά στην ομαδοποίηση του δικτύου.

Τελικά, η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από τους παράγοντες που ενδιαφέρουν τον χρήστη, όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι διαθέσιμοι πόροι κάθε μεμονωμένου κόμβου, η παρεμβολή που εισάγεται, κτλ. Το μοντέλο που βασίζεται στο βαθμό κόμβου ενδείκνυται στις περιπτώσεις που η γνώση του βαθμού των κόμβων παρέχεται εκ των προτέρων προκειμένου να μην επιβαρύνεται περαιτέρω το δίκτυο από διαδικασίες γνωστοποίησης. Από την άλλη, το μοντέλο που βασίζεται στην τοπολογία προϋποθέτει τη γνώση της τοπολογίας, η οποία ενδεχομένως να παρέχεται από άλλες πηγές όπως διαδικασίες δρομολόγησης ή αλγόριθμοι εύρεσης μονοπατιού. Επίσης, το δεύτερο μοντέλο ομαδοποιεί το δίκτυο σε μεγαλύτερο βαθμό εξαιτίας της συγκεντρωσης κόμβων σε ορισμέ-

νες περιοχές, κάτι που ίσως να είναι επιθυμητό όταν το φορτίο είναι χαμηλό αλλά να δημιουργεί παρεμβολές όταν το δίκτυο είναι φορτωμένο. Στη δεύτερη περίπτωση θα ήταν προτιμότερο το μοντέλο βασισμένο στο βαθμό κόμβου, όπου οι ομαδοποιήσεις κόμβων είναι περισσότερο κατανεμημένες, σε όλη την περιοχή δικτύου.

# Κεφάλαιο 5

## Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται όσα αναλύθηκαν στην διπλωματική εργασία για την προσθήκη σε ένα δίκτυο τυχαίου γεωμετρικού γράφου με ιδιότητες *small – world* και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, ενώ προτείνονται τρόποι μελλοντικής εξέλιξης ή επέκτασης του μοντέλου που παρουσιάστηκε.

Προτείνεται ένα μοντέλο εξέλιξης δικτύου που στηρίζεται στο βαθμό του κόμβου με σκοπό τη μείωση του μέσου μήκους διαδρομής στα επίπεδα εκείνου των δικτύων μικρού κόσμου. Επιλέγεται σε κάθε βήμα αύξησης της ακτίνας ένα ποσοστό των κόμβων του δικτύου σε μία κατάλληλη περιοχή προς αποφυγή του φαινομένου των άκρων. Οι επιλεγμένοι κόμβοι συνδέονται με γείτονες τους στην περιοχή του δακτυλίου που προστίθεται στο εύρος μετάδοσής τους. Στο βασικό μοντέλο οι νέες συνδέσεις είναι μονόδρομες, ωστόσο εξετάζεται και η περίπτωση του βασικού μοντέλου με αμφίδρομες συνδέσεις, όπου οι νέες συνδέσεις είναι αμφίδρομες και συνεπώς αυξάνεται η ακτίνα μετάδοσης και στους γείτονες του επιλεγμένου κόμβου. Επιπλέον εξετάζεται η ενδεχόμενη βελτίωση του βασικού μοντέλου - Σενάριο 2 - αν οι επιλεγόμενοι κόμβοι βρίσκονται κοντά στο κέντρο της περιόχης δικτύου, εκτός του μεγάλου βαθμού τους.

Μετά την προσομοίωση του βασικού μοντέλου και των παραλλαγών του η μελέτη κατέληξε στα ακόλουθα συμπεράσματα. Σε κάθε περίπτωση οδηγούμαστε σε μείωση του μέσου μήκους διαδρομής και αύξηση του συντελεστή ομαδοποίησης σε σχέση με το αρχικό δίκτυο του τυχαίου γεωμετρικού γράφου. Τη χειρότερη απόδοση ως προς το μέσο μήκος διαδρομής παρουσιάζει το Σενάριο 2 καθώς η μείωση που επιφέρει είναι μικρή. Αντίθετα το Σενάριο 1 με αμφίδρομες συνδέσεις μειώνει το μέσο μηκος διαδρομής περισσότερο από τις άλλες δύο περιπτώσεις και το αποτέλεσμά του είναι πολύ ικανοποιητικό, προσεγγίζοντας την τιμή του μέσου μήκους διαδρομής του δικτύου μικρού κόσμου αν η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων αυξηθεί αρκετά, έως 570m. Το Σενάριο 1 με αμφίδρομες συνδέσεις οδηγεί επίσης σε μεγαλύτερη ομαδοποίηση του δικτύου. Το αποτέλεσμα σε όλες τις περιπτώσεις είναι καλύτερο με αύξηση των επιλέγομενων κόμβων για προσθήκη συνδέσμων και με άυξηση της ακτίνας μετάδοσης, αλλά και πιο ακριβό στην υλοποίηση. Η αύξηση της μέγιστης ακτίνας των επιλεγόμενων κόμβων οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση του μέσου μήκους διαδρομής και σε αύξηση της ομαδοποίησης.

Το μοντέλο εξέλιξης δικτύων που προτάθηκε επιτρέπει μια σειρά επεκτάσεων που θα το καταστήσουν πιο ισχυρό και απόδοτικό. Συγκεκριμένα το μοντέλο θα μπορούσε να επεκταθεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

1. Θα μπορούσε να γίνει ενεργειακά οικονομικότερο επιλέγοντας καταληλότερους, αλλά λιγότερους κόμβους για προσθήκη συνδέσεων, λαμβάνοντας υπόψην και άλλα κριτήρια εκτός από το βαθμό του κόμβου, όπως τη μεταξύ τους απόσταση ή των αριθμών των διαδρομών που αποτελούν ενδιάμεσο κόμβο.
2. Είναι δυνατός ο συνδυασμός του μοντέλου που βασίζεται στο βαθμό του

κόμβου με το μοντέλο που βασίζεται στην τοπολογία, ώστε να προσεγγιστεί το μοντέλο τύπου μικρού κόσμου ακόμα περισσότερο. Για παράδειγμα θα μπορούσε στο μοντέλο που βασίζεται στην τοπολογία ο πρώτος κόμβος που επιλέγεται να είναι ένας κόμβος με μεγάλο βαθμό.

3. Μπορούν να βρεθούν άλλοι τρόποι μείωσης του μέσου μήκους διαδρομής εκτός από την προσθήκη νέων συνδέσεων, όπως η τοποθέτηση νέων κόμβων σε κατάλληλα σημεία του δικτύου με μεγάλη ακτίνα μετάδοσης ώστε να αποτελούν ενδιάμεσους κόμβους που θα συντομεύουν τις διαδρομές.

# Βιβλιογραφία

- [1] M. G. Rubinstein, I. M. Moraes, M. E. M. Campista, L. H. M. K. Costa and O. C. M. B. Duarte, “A Survey on Wireless Ad Hoc Networks”, *Mobile and Wireless Communications Networks*, Springer-Verlag, pp. 1-34, August 2006.
- [2] H. Xiao, W. K. G. Seah, A. Lo, and K. C. Chua, “A Flexible Quality of Service Model for Mobile Ad Hoc Networks”, *Proc. of 51st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, Vol. 1, pp. 445-449, Apr. 2000.
- [3] G. S. Ahn, A. T. Campbell, A. Veres, and L. H. Sun, “SWAN: Service Differentiation in Stateless Wireless Ad Hoc Networks”, *Proc. of Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, (INFOCOM)*, Vol. 2, pp. 457-466, Jun. 2002.
- [4] A. T. Campbell, “INSIGNIA: In-band Signaling Support for QoS in Mobile Ad Hoc Networks”, *Proc. International Workshop on Mobile Multimedia Communication (MoMuc)*, pp. 12-14, Oct. 1998.
- [5] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102-114 August 2002.

- [6] J. Zhu and S. Papavassiliou, “On the Connectivity Modeling and the Tradeoffs between Reliability and Energy Efficiency in Large Scale Wireless Sensor Networks”, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Vol. 2, pp. 1260-1265, Mar. 2003.
- [7] S. Park, A. Savvides and M. Srivastava, “Simulating Networks of Wireless Sensors”, in *Proc. of the Winter Simulation Conference*, Vol. 2, pp. 1330-1338, Dec. 2001.
- [8] R. Albert and A-L Barabasi, “Emergence of Scaling in Random Networks”, *Science*, Vol. 286, No. 5439, pp. 509-512, Oct 1999.
- [9] Albert-Laszlo Barabasi and Eric Bonabeau, ”Scale-Free Networks”, *Scientific American*, pp. 50-59 May 2003.
- [10] D.J.Watts and S.H.Strogatz, “Collective Dynamics of “Small-World” Networks”, *Nature*, Vol. 393, pp. 440-442, Jun. 1998.
- [11] Albert-Laszlo Barabasi, Reka Albert, ”Emergence of scaling in random networks” *arXiv:cond-mat/9910332v1 [cond-mat.dis-nn]*, October 1999
- [12] S. Papavassiliou and J. Zhu, “A Continuum Theory-Based Approach to the Modeling of Dynamic Wireless Sensor Networks”, *IEEE Communications Letters*, Vol.9, No.4, pp. 337- 339, Apr. 2005.
- [13] R. Albert and A-L Barabasi, “Topology of Evolving Networks: Local Events and Universality”, *Physical Review Letters*, Vol. 85, No. 24, pp. 5234-5237, Dec. 2000.
- [14] E. Skiani, “Μηχανισμοί μετατροπής Ιδιοτήτων Δικτύων βασιζόμενες στην τοπολογία με εφαρμογές στα Αυτοργανούμενα και κοινωνικά δίκτυα”, Diploma Thesis, National Technical University of Athens, October 2009.

- [15] M. E. J. Newman, D. J. Watts and S. H. Strogatz, “Random Graph Models of Social Networks”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 99, No. 1, pp. 2566-2572, Feb. 2001.