



## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

### Μηχανισμοί Μετατροπής Ιδιοτήτων Δικτύων Βασιζόμενοι στην Τοπολογία με Εφαρμογές στα Αυτοργανούμενα και Κοινωνικά Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ευαγγελίας Δ. Σκιάνη

Επιβλέπων: Συμεών Χ. Παπαβασιλείου

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2009





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μηχανισμοί Μετατροπής Ιδιοτήτων Δικτύων Βασιζόμενοι στην  
Τοπολογία με Εφαρμογές στα Αυτοργανούμενα και Κοινωνικά  
Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Ευαγγελίας Δ. Σκιάνη

Επιβλέπων: Συμεών Χ. Παπαβασιλείου

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

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

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

.....  
Β. Μάγκλαρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Δ. Καλογεράς  
Ερευνητής ΕΠΙΣΕΥ

Αθήνα, Οκτώβριος 2009.

.....

**Ευαγγελία Δ. Σκιάνη**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright ©Ευαγγελία Δ. Σκιάνη, 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

## Περίληψη

Η μελέτη των κοινωνικών δικτύων οδήγησε στην ανάδειξη νέων δομών γράφων με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στα δίκτυα χωρίς κλίμακα καθώς και στα δίκτυα τύπου 'μικρού-κόσμου', με έμφαση στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα κάθε κατηγορίας. Οι ιδιότητες δικτύων τύπου 'μικρού-κόσμου' είναι ιδιαίτερες επιθυμητές στην περίπτωση των αυτοργανούμενων δικτύων και των δικτύων αισθητήρων καθώς βελτιώνουν την αποτελεσματικότητά τους επιτυγχάνοντας την εξάλειψη προβλημάτων της ασύρματης επικοινωνίας και την ταχύτερη μετάδοση δεδομένων. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στο πρόβλημα της μετατροπής ενός τυχαίου γεωμετρικού γράφου (μοντελοποίηση δικτύου αισθητήρων όπου ένας κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει με κόμβους μόνο εντός της εμβέλειας της ακτίνας μετάδοσής του) σε δίκτυο με ιδιότητες 'μικρού-κόσμου', οι οποίες συνίστανται στο μικρό μέσο αριθμό βημάτων μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κόμβων, και στην ισχυρή ομαδοποίηση που περιγράφεται από τον παράγοντα ομαδοποίησης. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται μία επαναληπτική διαδικασία, σε κάθε βήμα της οποίας μεταβάλλεται η ακτίνα μετάδοσης και εκτελείται ένας αλγόριθμος για την προσθήκη συνδέσεων σε κατάλληλα επιλεγμένους κόμβους. Τα κριτήρια επιλογής καθορίζονται από τη θέση των κόμβων στην περιοχή του δικτύου, με τη γνώση της τοπολογίας να αποτελεί βασική προϋπόθεση της ανάλυσης του μοντέλου. Σκοπός είναι η μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού και η αύξηση του παράγοντα ομαδοποίησης διατηρώντας, ταυτόχρονα, αναλλοίωτο το χαρακτήρα του αρχικού γράφου. Επιχειρείται η σύγκριση του μοντέλου με μία παραλλαγή αυτού που είναι βασισμένη στο βαθμό των κόμβων του δικτύου, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά στην καταλληλότητα και στην προτίμηση καθενός ανάλογα με την εφαρμογή και τις σχετικές απαιτήσεις. Τέλος, μελετάται η δυνατότητα εφαρμογής αυτών των μοντέλων στην περιοχή των κοινωνικών δικτύων,

με έμφαση στην αποτελεσματικότητα των μεθόδων, και την ενδεχόμενη επέκτασή τους σε ευρύτερα πεδία.

### **Λέξεις Κλειδιά**

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

## **Abstract**

The analysis of social networks has given rise to a number of different network classifications. In this thesis, we revisit two special network categories, scale-free and small-world networks, emphasizing the distinct features of each network. Properties of small-world networks are favorable to ad-hoc as well as sensor networks, since they enhance their performance by eliminating problems related to wireless communication and allowing for more reliable and effective transmissions. This work focuses on the procedure of converting a random geometric graph (a model used for a sensor network where each node can communicate only with nodes within its transmission range) into a network with small-world properties. Such networks exhibit small average path lengths (average number of hops between two arbitrarily chosen nodes) and high clustering coefficient (which represents the tendency of the network to form clusters). Specifically, we present a repeated procedure and describe the implementation of a corresponding algorithm. In each step, we change the value of the transmission range and add links to properly selected nodes. The selection criteria are related to node positions and, thus, are based on the network topology. We aim at producing a network with a smaller average path length and a higher clustering coefficient without altering its original character as a sensor network. The model is then compared to another similar one, which is based on node degree, so as to draw conclusions regarding each one's suitability in different kinds of applications and requirements. Finally, we discuss the possibility of applying these techniques on social networks and we offer incentives for future advancements and applications in other fields of study.

### **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

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους αυτούς τους ανθρώπους που συνέβαλλαν στην περάτωση της παρούσας Προπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα της εργασίας αυτής, τον κ. Συμεών Παπαβασιλείου, για την πολύτιμη βοήθειά του και τη διαρκή υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας καθώς και τη συμβολή του καθ'όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον διδάκτορα Βασίλειο Καρυώτη για την άμεση βοήθειά του, τις χρήσιμες συμβουλές του και την καθοδήγησή του καθ'όλα τα στάδια διεκπεραίωσης της εργασίας, όπως επίσης και τη φίλη και συνάδελφό μου, Έλενα Στάη, για το ευχάριστο κλίμα συνεργασίας και τη δημιουργική υποστήριξή της σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και κυρίως κατανόηση και ανοχή κατά το χρονικό διάστημα των σπουδών μου, καθώς επίσης και το φιλικό μου περιβάλλον για την αγάπη και την εμπιστοσύνη τους όλα αυτά τα χρόνια.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Γενικά . . . . .	1
1.2	Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών . . . . .	2
1.3	Συμβολή . . . . .	4
1.4	Διάρθρωση . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Θεωρητικά Στοιχεία και Σχετική Εργασία</b>	<b>9</b>
2.1	Ασύρματα Αυτοργανούμενα Δίκτυα . . . . .	9
2.1.1	Εισαγωγή . . . . .	9
2.1.2	Στοίβα Πρωτοκόλλων . . . . .	10
2.1.3	Επιπρόσθετες Βελτιώσεις (Κατευθυντικές Κεραίες) . . . . .	16
2.2	Δίκτυα Αισθητήρων . . . . .	17
2.2.1	Αρχιτεκτονική . . . . .	18
2.2.2	Στοίβα πρωτοκόλλων . . . . .	24
2.3	Scale-Free Δίκτυα . . . . .	27
2.4	Δίκτυα Μικρού-Κόσμου . . . . .	32
2.4.1	Continuum Theory . . . . .	35
2.5	Έλεγχος Τοπολογίας . . . . .	43

<b>3</b>	<b>Μοντέλο Μεταβολής Αυτοργανούμενων Δικτύων</b>	<b>46</b>
3.1	Εισαγωγή . . . . .	46
3.2	Σενάριο Μεταβολής Δικτύου . . . . .	48
3.3	Ανάλυση . . . . .	52
3.3.1	Υπολογισμός μέσου μήκους μονοπατιού . . . . .	59
3.3.2	Υπολογισμός παράγοντα ομαδοποίησης . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Μεθοδολογία Προσομοίωσης</b>	<b>62</b>
4.1	Εισαγωγή . . . . .	62
4.2	Μελέτη Παραμέτρων Δικτύου . . . . .	62
4.2.1	Συνεκτικότητα δικτύου συναρτήσει της ακτίνας μετάδοσης . . . . .	63
4.2.2	Συνεκτικότητα δικτύου συναρτήσει του πλήθους των κόμβων . . . . .	64
4.2.3	Συνεκτικότητα συναρτήσει της πυκνότητας του δικτύου . . . . .	66
4.2.4	Σχέση περιοχής δικτύου και ακτίνας μετάδοσης . . . . .	66
4.2.5	Εξέταση του απαιτούμενου πλήθους των διαφορετικών τοπολογιών . . . . .	68
4.3	Συμπεράσματα . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Αριθμητικά Αποτελέσματα</b>	<b>70</b>
5.1	Σχηματική Επίδειξη Λειτουργίας . . . . .	70
5.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων με τα Θεωρητικά . . . . .	77
5.2.1	Ρυθμός πρόσθεσης συνδέσεων . . . . .	78
5.2.2	Κατανομή βαθμού κόμβων . . . . .	80
5.2.3	Μήκος μονοπατιού . . . . .	82
5.2.4	Παράγοντας ομαδοποίησης . . . . .	87
5.3	Σύγκριση με Δίκτυα τύπου small-world . . . . .	89
5.4	Σύγκριση Μοντέλων . . . . .	93

<b>6</b>	<b>Επίλογος</b>	<b>98</b>
6.1	Εφαρμογές . . . . .	100

# Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Κατανομές του αριθμού των συνδέσεων . . . . .	28
3.1	Δίκτυα με αυξανόμενο βαθμό τυχαιότητας . . . . .	49
3.2	Επιλογή αρχικού κόμβου . . . . .	51
3.3	Επιλογή κόμβου σε δεύτερο επίπεδο . . . . .	55
3.4	Μέση τιμή σφάλματος συναρτήσει του αριθμού των κόμβων . . . . .	56
4.1	Συνεκτικότητα ως προς την ακτίνα μετάδοσης . . . . .	64
4.2	Συνεκτικότητα ως προς το πλήθος των κόμβων, $R(m)$ . . . . .	65
4.3	Συνεκτικότητα ως προς την ακτίνα μετάδοσης για πυκνότητα $175$ κόμβων/ $km^2$ . . . . .	67
5.1	Αρχική κατάσταση . . . . .	71
5.2	Στιγμιότυπα για ακτίνα από $R=130$ έως $200m$ . . . . .	72
5.3	Στιγμιότυπα για μεγαλύτερες ακτίνες . . . . .	73
5.4	Στιγμιότυπα για $p = 0.6$ . . . . .	74
5.5	Στιγμιότυπα για τυχαία επιλογή κόμβων . . . . .	75
5.6	Αριθμός συνδέσεων συναρτήσει της ακτίνας $p = 1$ . . . . .	79
5.7	Αριθμός συνδέσεων συναρτήσει της ακτίνας $p = .6$ . . . . .	79
5.8	Αρχική Κατανομή βαθμού κόμβων $R = 120m$ . . . . .	80
5.9	Νέα Κατανομή βαθμού κόμβων $R = 220m$ . . . . .	81
5.10	Κατανομή βαθμού κόμβων: Διαδοχικά Στιγμιότυπα . . . . .	82

5.11 Μέσο μήκος μονοπατιού $p = 1$ . . . . .	83
5.12 Μέσο μήκος μονοπατιού $p = .6$ . . . . .	85
5.13 Θεωρητικός Υπολογισμός Μέσου Μήκους Μονοπατιού . . . . .	86
5.14 Σύγκριση Μέσου Μήκους Μονοπατιού . . . . .	87
5.15 Παράγοντας ομαδοποίησης . . . . .	88
5.16 Μέσο Μήκος Μονοπατιού: Σύγκριση τυχαίου γεωμετρικού γράφου, δικτύου τύπου small-world και ετερογενούς δικτύου διαφορετικών ακτινών μετάδοσης . . . . .	90
5.17 Μέσο Μήκος Μονοπατιού: Σύγκριση τυχαίου γεωμετρικού γράφου, δικτύου τύπου small-world και ετερογενούς δικτύου διαφορετικών ακτινών μετάδοσης . . . . .	91
5.18 Μέσο μήκος μονοπατιού σε δίκτυα τύπου small world . . . . .	92
5.19 Παράγοντας Ομαδοποίησης: Σύγκριση τυχαίου γεωμετρικού γράφου, δικτύου τύπου small-world και ετερογενούς δικτύου διαφορετικών ακτινών μετάδοσης . . . . .	93
5.20 Παράγοντας Ομαδοποίησης: Σύγκριση τυχαίου γεωμετρικού γράφου, δικτύου τύπου small-world και ετερογενούς δικτύου διαφορετικών ακτινών μετάδοσης . . . . .	94
5.21 Μέσο Μήκος Μονοπατιού: Σύγκριση Μοντέλων . . . . .	95
5.22 Παράγοντας Ομαδοποίησης: Σύγκριση Μοντέλων . . . . .	96

# Κατάλογος Πινάκων

2.1	Contention-free Πρωτόκολλα MAC . . . . .	10
2.2	Contention-based Πρωτόκολλα MAC . . . . .	11
2.3	Proactive Topology-Based Πρωτόκολλα . . . . .	13
2.4	Reactive Topology-Based Πρωτόκολλα . . . . .	14
2.5	Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση τη θέση . . . . .	15
2.6	MAC Πρωτόκολλα στα Δίκτυα Αισθητήρων . . . . .	25
2.7	Scale-Free Δίκτυα . . . . .	30
2.8	Non-Scale-Free Δίκτυα . . . . .	31
2.9	Κατηγορίες πρωτοκόλλων ελέγχου τοπολογίας . . . . .	45
4.1	Τιμή κατωφλίου ακτίνας . . . . .	68
5.1	Θεωρητικός Υπολογισμός Μέσου Μήκους Μονοπατιού . . . . .	86

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά

Κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα, η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος κατέστησε την ανάγκη της άμεσης και ταυτόχρονης συλλογής, επεξεργασίας και διανομής πληροφοριών επιτακτική. Αποτέλεσμα ήταν η εμφάνιση των δικτύων υπολογιστών. Ένα δίκτυο υπολογιστών αποτελείται από ένα σύνολο αυτόνομων υπολογιστών που είναι διασυνδεδεμένοι με κοινή τεχνολογία, δηλαδή είναι σε θέση να ανταλλάσσουν πληροφορίες. Τα Δίκτυα Ηλεκτρονικών Υπολογιστών χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Ανάλογα με το φυσικό μέσο διασύνδεσής τους χαρακτηρίζονται ως Ενσύρματα ή Ασύρματα.
- Ανάλογα με τον τρόπο πρόσβασης σε αυτά χαρακτηρίζονται ως Δημόσια ή Ιδιωτικά δίκτυα.
- Ανάλογα με την γεωγραφική κάλυψη μιας περιοχής χαρακτηρίζονται ως Προσωπικά (PAN και WPAN), Τοπικά (LAN και WLAN), Μητροπολιτικά (MAN και WMAN) και Ευρείας κάλυψης (WAN και WWAN).



Η ευρεία χρήση των δικτύων υπολογιστών γίνεται αντιληπτή μέσω της πληθώρας των εφαρμογών τόσο στον επιχειρησιακό όσο και τον ιδιωτικό τομέα, με το Internet να βρίσκεται στην κορυφή της λίστας των δημοφιλέστερων δικτύων παγκοσμίως.

Σήμερα το ενδιαφέρον εστιάζεται στα ασύρματα δίκτυα. Τα ασύρματα δίκτυα παρέχουν στους χρήστες τη δυνατότητα πρόσβασης σε δεδομένα χωρίς περιορισμούς υλικού και εγκατάστασης λογισμικού. Η καλωδιακή σύνδεση είναι αδύνατη όταν ο χρήστης βρίσκεται σε κινούμενο όχημα ή αεροσκάφος, ενώ πολλοί χρήστες επιτραπέζιων υπολογιστών θέλουν να παραμένουν συνδεδεμένοι με το δίκτυο, ακόμα και όταν βρίσκονται εκτός σπιτιού. Τα ασύρματα δίκτυα βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές και διαφορετικού τύπου υπηρεσίες ενώ η σταδιακή εισχώρησή τους σε νέους τομείς αποδεικνύει τη ζωτική σημασία τους και θεμελιώνει την παρουσία τους στον χώρο των τηλεπικοινωνιών.

## 1.2 Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών

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 περιβάλλον μετάδοσης και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Σε παλαιότερες εποχές τα τηλεφωνικά δίκτυα ήταν αναλογικά, αλλά σήμερα όλα τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και επομένως, κατά μία έννοια, είναι δίκτυα υπολογιστών.

Σε μία πρώτη προσέγγιση, τα ασύρματα δίκτυα υπολογιστών μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: τη διασύνδεση συστήματος (διασύνδεση δηλαδή των εξαρτημάτων ενός υπολογιστή με τη χρήση ραδιοκυμάτων μικρής εμβέλειας), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (LAN), μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδος για την εγκατάσταση δικτύων σε περιορισμένης έκτασης χώρους χωρίς να απαιτείται καλωδίωση, και τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής

(WAN), που χρησιμοποιούνται κυρίως στα κυψελωτά συστήματα της κινητής τηλεφωνίας.

Όλα σχεδόν τα ασύρματα δίκτυα συνδέονται με ενσύρματα προκειμένου να καταστεί δυνατή η πρόσβαση σε αρχεία, βάσεις δεδομένων και στο Διαδίκτυο.

Σε μία ασύρματη ζεύξη ένας υπολογιστής συνδέεται με έναν σταθμό βάσης ή έναν άλλο ασύρματο υπολογιστή μέσω μιας ασύρματης ζεύξης επικοινωνίας. Οι υπολογιστές που συνδέονται με το σταθμό βάσης λειτουργούν σε τρόπο λειτουργίας υποδομής, εφόσον όλες οι παραδοσιακές υπηρεσίες - δρομολόγηση, εκχώρηση διευθύνσεων - παρέχονται από το δίκτυο στο οποίο συνδέεται ο υπολογιστής μέσω του σταθμού βάσης. Στα αυτοργανούμενα δίκτυα, δεν υπάρχει κεντρική υποδομή, δηλαδή οι ασύρματοι υπολογιστές δε συνδέονται με έναν κεντρικό σταθμό. 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.

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 οργανώσουν ένα αυτόνομο δίκτυο χωρίς κεντρική υποδομή. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των κινητών, ασύρματων κόμβων ενός ad-hoc δικτύου είναι η δυνατότητα να εκτελούν εργασίες ανεξάρτητα και ακολούθως να επικοινωνούν προκειμένου να συγχωνεύσουν τα αποτελέσματά τους, ώστε να επιτελέσουν λειτουργίες υψηλότερης πολυπλοκότητας. Κάτι τέτοιο καθιστά τα ad-hoc δίκτυα ιδανικά για την εκτέλεση κατανεμημένων λειτουργιών με έξυπνο και αποδοτικό τρόπο. Τα πρωτόκολλα που απαιτούνται για τη λειτουργία του παραπάνω δικτύου είναι πολύπλοκα, ενώ η αυξανό-

μενη ζήτηση για πιο σύνθετες λειτουργίες οδηγεί τους κατασκευαστές να συμπεριλάβουν στις συσκευές τους πιο απαιτητικό υλικό και λογισμικό. Ταυτόχρονα, είναι επιθυμητό οι συσκευές να παρέχουν μεγαλύτερη αυτονομία και ευελιξία. Τα ad-hoc δίκτυα και τα πρωτόκολλα που διέπουν τη λειτουργία τους περιγράφονται πιο αναλυτικά στην ενότητα 2.1 του Κεφαλαίου 2.

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (sensor network) αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων (αισθητήρων) οι οποίοι είναι κατανεμημένοι σε μια 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 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 ισχύ, περιορισμούς μνήμης και ενέργειας. Τα δίκτυα αισθητήρων και τα πρωτόκολλα που διέπουν τη λειτουργία τους περιγράφονται αναλυτικότερα στην ενότητα 2.2 του Κεφαλαίου 2.

### 1.3 Συμβολή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ταυτόχρονη μελέτη των αυτοργανούμενων (ad-hoc) δικτύων, των δικτύων αισθητήρων (sensor) και των δικτύων τύπου 'μικρού-κόσμου' (small-world). Κύρια συμβολή αποτελεί ένα μοντέλο για τον μετασχηματισμό ενός δικτύου αισθητήρων προκειμένου να αποκτήσει κάποιες από τις ιδιότητες ενός δικτύου τύπου 'μικρού-κόσμου' (small-world). Ως τώρα, έχει μελετηθεί η αντίστροφη διαδικασία. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην αύξηση της ακτίνας μετάδοσης ορισμένων

κόμβων, οι οποίοι επιλέγονται με κατάλληλα κριτήρια. Το ποσοστό αύξησης μεταβάλλεται σε κάθε στάδιο εκτέλεσης με αποτέλεσμα την εμφάνιση ανομοιογενών ως προς τη δυνατότητα επικοινωνίας κόμβων. Η αύξηση της εμβέλειας ενός κόμβου συνεπάγεται την προσθήκη νέων συνδέσεων σε αυτόν επιτρέποντας την απ' ευθείας επικοινωνία με κόμβους που προηγουμένως βρίσκονταν σε μεγάλη απόσταση. Το μέσο μήκος των διαδρομών μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων μειώνεται, με τη νέα αυτή ιδιότητα να προσδίδει στο δίκτυο αμιγώς χαρακτήρα δικτύου 'μικρού-κόσμου'. Επίσης, κατάλληλος ορισμός των κριτηρίων επιλογής των κόμβων είναι δυνατόν να οδηγήσει στην ισχυρή ομαδοποίηση του δικτύου, δηλαδή την εμφάνιση ομάδων από κόμβους που αλληλοσυνδέονται. Αυτό αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα ενός κανονικού γράφου (ίδιος βαθμός για κάθε κόμβο), αλλά σε συνδυασμό με μικρές τιμές για το μέσο μήκος μονοπατιού, καταλήγει σε προσέγγιση δικτύου τύπου 'μικρού-κόσμου'. Οι επιπρόσθετες ιδιότητες καθιστούν το δίκτυο περισσότερο αποτελεσματικό όσον αφορά στην ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων. Επιπρόσθετα εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής του παραπάνω μοντέλου στα κοινωνικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα μελετώνται δύο διαφορετικής φύσεως παραδείγματα πραγματικών δικτύων, τα οποία αρχικά μοντελοποιούνται κατάλληλα προκειμένου να τηρούν τις προϋποθέσεις εφαρμογής του μοντέλου, και στη συνέχεια προτείνονται τρόποι μεταβολής των ιδιοτήτων τους μέσω ρεαλιστικών διαδικασιών και προσεγγίσεων.

## 1.4 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 και τα δίκτυα τύπου 'μικρού-κόσμου' (small-world networks), με έμφαση στα ξεχωριστά γνωρίσματα καθενός, προκειμένου να

καταστεί σαφής ο διαχωρισμός τους στο βαθμό που αυτό είναι δυνατό. Γίνεται επίσης εκτενής αναφορά στα μοντέλα που μελετούν τη συνδεσιμότητα ενός συστήματος και έχουν δημοσιευτεί σε προγενέστερες εργασίες. Παρατίθενται παραδείγματα τύπων δικτύων, στον πραγματικό κόσμο, που εμφανίζουν κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες με στόχο αφενός την κατανόηση βασικών εννοιών και αφετέρου την ανάδειξη της σημασίας της ανάλυσης και των ενδεχόμενων εφαρμογών της. 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 κόμβου τους. Παρόλο που δεν μας απασχολούν τα δίκτυα αυτού του τύπου στην παρούσα εργασία, η αναφορά σε αυτά κρίνεται αναγκαία προκειμένου να γίνει σαφέστερη η μελέτη των δικτύων ‘μικρού-κόσμου’, τα οποία αφενός μοιράζονται ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά με τα scale-free δίκτυα και αφετέρου, παρουσιάζουν επιπλέον ιδιότητες που δικαιολογούν το γεγονός ότι ανήκουν σε διαφορετική κατηγορία με αποτέλεσμα ο διαχωρισμός τους και η οριοθέτησή τους να αποτελεί προϋπόθεση για την περαιτέρω ανάλυση δικτύων ειδικού τύπου. Η εμφάνιση αυτών των δικτύων οφείλεται στο φαινόμενο του ‘μικρού-κόσμου’, στο οποίο γίνεται αναφορά και σημειώνονται οι αδυναμίες και οι δυσκολίες που ανακύπτουν όσον αφορά τη συσχέτιση του με τα κλασικά Δίκτυα Επικοινωνιών. 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 απαραίτητη καθώς αποτελεί θεμέλιο λίθο στην μελέτη του θέματος της εργασίας και συμβάλλει στην επίλυση του προβλήματος που μας απασχολεί εδώ, δίνοντας έμφαση στην κατανομή του βαθμού των κόμβων του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 3 προσεγγίζεται με περισσότερες λεπτομέρειες το πρόβλημα που θα μας απασχολήσει. Για την ακρίβεια, μετά την περιγραφή του βασικού προβλήματος, το

οποίο συνίσταται στη μετατροπή ενός δικτύου αισθητήρων σε δίκτυο ειδικού τύπου - με ιδιότητες δικτύου τύπου '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 ένα δίκτυο αισθητήρων 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 μπορούμε να προσδώσουμε στο δίκτυο χαρακτηριστικά 'μικρού-κόσμου' με 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 συνδεσιμότητας του δικτύου, ώστε να εξαχθεί ο τρόπος που αυτό επηρεάζει τις λοιπές παραμέτρους του δικτύου και κυρίως το μέσο μήκος μονοπατιού.

Στο Κεφάλαιο 4 εξετάζονται οι παράμετροι των δικτύων που πρόκειται να προσομοιωθούν. Πιο συγκεκριμένα, μας ενδιαφέρει ο απαιτούμενος αριθμός των κόμβων στην περιοχή δικτύου και η ελάχιστη ακτίνα μετάδοσης καθενός, για την εξασφάλιση της συνδεσιμότητας στο δίκτυο. Οι συνθήκες συνδεσιμότητας αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή αρχικοποίηση του δικτύου της προσομοίωσης και την εξαγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα προέρχονται από προγενέστερες εργασίες, και συνοδεύονται από σχετικά γραφήματα.

Στο Κεφάλαιο 5 , περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και ακολουθεί σχολιασμός αυτών και αντιπαράθεση με το θεωρητικό πρότυπο. Η προσομοίωση έγινε

με κώδικα γραμμένο στο μαθηματικό εργαλείο Matlab, και αφορά τη συμπεριφορά του δικτύου καθώς οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων μεταβάλλονται έως ότου γίνει η μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση. Σημειώνονται τα κύρια συμπεράσματα και γίνεται μία προσπάθεια να αιτιολογηθεί η μη πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά, που βασίζονται αποκλειστικά στην ανάλυση του Κεφαλαίου 3. Επίσης, γίνεται σύγκριση των βασικών ιδιοτήτων του δικτύου με αυτές ενός δικτύου τύπου ‘μικρού-κόσμου’, ώστε να διαπιστωθεί η επίτευξη του αρχικού στόχου του μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα από τη μελέτη, ανακεφαλαιώνεται η συμβολή της και επιχειρείται μια σύνδεσή της στα κοινωνικά δίκτυα. Τέλος παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική εργασία και επέκταση της παρούσας μελέτης.

## Κεφάλαιο 2

# Θεωρητικά Στοιχεία και Σχετική Εργασία

### 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 να απαιτείται προϋπάρχουσα υποδομή. Οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους είτε απευθείας είτε μέσω ενδιάμεσων κόμβων. Επομένως, κάθε κόμβος θα μπορούσε να θεωρηθεί ως δρομολογητής και χρήστης ταυτόχρονα. Τα δίκτυα αυτά παρέχουν ευελιξία, χαμηλό κόστος, γρήγορη εγκατάσταση ακόμη και σε έρημες περιοχές, αντοχή στις φυσικές καταστροφές και στις συνθήκες πολέμου. Τυπικά προβλήματα που σχετίζονται με τα ασύρματα δίκτυα είναι ο θόρυβος, το περιορισμένο εύρος ζώνης, οι ασύρματες μεταδόσεις με χαμηλά επίπεδα ασφάλειας, ο υψηλός ρυθμός λαθών, ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης, οι μεταβαλλόμενες συνθήκες του φυσικού μέσου μετάδοσης, η κινητικότητα, οι περιορισμοί όσον αφορά στην



κατανάλωση ενέργειας και η ασφάλεια.

## 2.1.2 Στοιβά Πρωτοκόλλων

### 2.1.2.1 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). Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα πρωτόκολλα χωρίς ανταγωνισμό τα οποία εγγυώνται μετάδοση χωρίς ανταγωνισμό για το μέσο πρόσβασης (Πίνακας 2.1), καθώς οι εκχωρήσεις πόρων είναι προκαθορισμένες, και πρωτόκολλα με ανταγωνισμό (Πίνακας 2.2) τα οποία χαρακτηρίζονται από τυχαία και προσωρινή τοπολογία και θεωρούνται κατάλληλα για σποραδική μετάδοση δεδομένων.

Πίνακας 2.1: Contention-free Πρωτόκολλα MAC

Contention-free Πρωτόκολλα
TDMA
CDMA
FDMA
Polling
Token-based

Η ανάγκη για βελτίωση της αποτελεσματικότητας των διαφορετικών πρωτοκόλλων επιπέδου MAC στις εφαρμογές διαφορετικού τύπου οδήγησε στον περαιτέρω διαχωρισμό τους σε:

1. **Πρωτόκολλα πολλαπλών καναλιών.** Τα πολλαπλά κανάλια μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική επίδοση ενός δικτύου γιατί αφενός κάθε κανάλι αποτελεί ένα διαφορετικό τομέα συγκρούσεων, και αφετέρου το διαθέσιμο εύρος ζώνης αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των καναλιών. Επίσης, καθίσταται δυνατή και η διαφοροποίηση μεταξύ των καναλιών προκειμένου να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Αναφέρεται ότι ενδεχομένως να διατίθεται και ξεχωριστό

Πίνακας 2.2: Contention-based Πρωτόκολλα MAC

Contention-based Πρωτόκολλα	Περιγραφή	Πιθανότητα Σύγκρουσης	Κρυμμένο Τερματικό <sup>1</sup>	Εκτεθειμένο Τερματικό <sup>2</sup>
ALOHA	Ένας σταθμός ανταγωνίζεται για την πρόσβαση στο μέσο μόνο όταν έχει δεδομένα να μεταδώσει	πολύ υψηλή	ναι	ναι
Slotted ALOHA	Ένας σταθμός επιχειρεί πρόσβαση στο μέσο μετά την παρέλευση ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος	υψηλή	ναι	ναι
CSMA (p-επίμονο ή μη-επίμονο)	Ένας σταθμός αφουγκράζεται το μέσο προκειμένου να γνωρίζει αν υπάρχουν μεταδόσεις σε εξέλιξη. Όταν διαπιστωθεί ότι το μέσο είναι διαθέσιμο, ο σταθμός μεταδίδει με πιθανότητα p (p-επίμονο) ή αναμένει για ένα τυχαίο διάστημα μέχρι να επιχειρήσει την επόμενη μετάδοση (μη-επίμονο)	μέση	ναι	ναι
MACA	Ο σταθμός που επιθυμεί να μεταδώσει δεδομένα στέλνει ένα RTS (Αίτηση-Για-Μετάδοση) πακέτο ενώ ο προορισμός απαντά με ένα CTS πακέτο, αποτρέποντας έτσι τη μετάδοση δεδομένων από άλλους σταθμούς για το χρονικό διάστημα που έχει ανακοινωθεί (το μέσο έχει δεσμευτεί)	μέση (εξαιτίας της εκθετικής οπισθοχώρησης)	ίσως (λόγω συγκρούσεων μεταξύ πακέτων ελέγχου και δεδομένων)	ναι
MACAW	Όπως το MACA αλλά με επιβεβαίωση ACK	μέση	ίσως	ναι
FAMA	Χρησιμοποιείται η ανίχνευση φέροντος αλλά και ο μηχανισμός RTS/CTS. Εισάγεται καθυστέρηση ανάμεσα στα μεταδιδόμενα πλαίσια με στόχο μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης και επεξεργασίας δεδομένων	χαμηλή	όχι	όχι
CSMA/CA	Συνδυασμός των CSMA, MACA/MACAW και FAMA. Εισάγεται επίσης ένα τυχαίο χρονικό διάστημα (NAV) <sup>3</sup> , που αποσκοπεί στον εντοπισμό επιπρόσθετων συγκρούσεων	χαμηλή	όχι	όχι

κανάλι ελέγχου.

2. Πρωτόκολλα με έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας. Οι κινητές ασύρματες συσκευές ή σταθμοί τροφοδοτούνται από μπαταρία και, επομένως, η οικονομική κατανάλωση ενέργειας αποτελεί προϋπόθεση για την παράταση της διάρκειας ζωής της

<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.

<sup>2</sup> φαινόμενο που συμβαίνει όταν ένας σταθμός δεν μπορεί να μεταδώσει επειδή βρίσκεται εντός της ακτίνας μετάδοσης ενός σταθμού που μεταδίδει ακόμα και αν ο επιθυμητός προορισμός βρίσκεται εκτός της προαναφερθείσας περιοχής σύγκρουσης.

<sup>3</sup> ένας μετρητής που διατηρείται από κάθε σταθμό και αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου το μέσο αναμένεται να είναι κατειλημμένο, έτσι ώστε ο σταθμός να επιχειρήσει μετάδοση αφού παρέλθει το NAV.

μπαταρίας τους, ιδιαίτερα όταν σχηματίζουν ένα αυτοργανούμενο (ad-hoc) δίκτυο. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα αυτά είναι: η εναλλαγή των καταστάσεων ενεργοποίησης και αναμονής, η ρύθμιση της ισχύος στην ελάχιστη δυνατή, και η αποφυγή των αναμεταδόσεων. Τα πρωτόκολλα με έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιούν μηχανισμούς διαχείρισης ή ελέγχου της ισχύος.

3. **Πρωτόκολλα με έλεγχο της ποιότητας υπηρεσίας.** Η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) σε ένα ασύρματο δίκτυο εξασφαλίζεται με δυσκολία εξαιτίας των παρακάτω παραγόντων (α) μη προβλεπτικότητα του ασύρματου μέσου μετάδοσης, (β) δυσκολίες στη διάκριση μεταξύ χαμένων πλαισίων (προκαλούμενα από συγκρούσεις και συμφόρηση) και λανθασμένης λήψης λόγω του υψηλού ρυθμού λαθών, (γ) η κατανεμημένη φύση των ασύρματων δικτύων και (δ) η εξάρτηση ενός σταθμού από άλλους σταθμούς για την προώθηση των δεδομένων. Τέλος, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων για ποιότητα υπηρεσίας (QoS) έχουν προταθεί μοντέλα που δρούν χρησιμοποιώντας διαστρωματική πληροφορία (cross-layer models) [1] [2] [3].

### 2.1.2.2 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Τα αυτοργανούμενα δίκτυα απαιτούν την ύπαρξη αποτελεσματικών πρωτόκολλων δρομολόγησης, ικανών να ανακαλύπτουν διαδρομές μεταξύ επικοινωνούντων κόμβων με τρόπο δυναμικό. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα ενσύρματα δίκτυα θεωρούνται ακατάλληλα για τα ασύρματα καθώς στα τελευταία οι κόμβοι μετακινούνται αυθαίρετα, οδηγώντας σε απρόβλεπτες αλλαγές της τοπολογίας, ενώ ταυτόχρονα η κατάσταση των συνδέσεων είναι συνάρτηση παραμέτρων όπως η θέση των κόμβων, η ισχύς μετάδοσης και οι παρεμβολές μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Παρόλο που στα ενσύρματα δίκτυα η συχνότητα των ενημερώσεων των πινάκων δρομολόγησης εξαρτάται από το ρυθμό των αλλαγών στην τοπολογία, στα ασύρματα δίκτυα, η συχνότητα των ενημερώσεων που αφορούν στη δρομολόγηση περιορίζεται από την ενέργεια ή την χωρητικότητα των ασύρματων συνδέ-

σεων και αντιστρόφως. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των αυτοργανούμενων δικτύων διακρίνονται στα πρωτόκολλα που λειτουργούν με βάση την τοπολογία και σε εκείνα που λειτουργούν με βάση τη θέση.

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

Η προώθηση των πακέτων βασίζεται στη διεύθυνση προορισμού και οφείλει να λαμβάνει υπόψη την κατάσταση των συνδέσεων από την πηγή στον προορισμό. Διακρίνονται σε proactive και reactive. Στην proactive δρομολόγηση, ανταλλάσσονται συνεχώς πληροφορίες δρομολόγησης (μέσω κατάλληλων μηνυμάτων όποτε συμβαίνει κάποια τοπολογική αλλαγή) με σκοπό τη διαρκή ενημέρωση των διαδρομών μεταξύ όλων των ζευγών κόμβων που συναποτελούν το δίκτυο. Χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων αυτών είναι η μικρή καθυστέρηση δρομολόγησης, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό φορτίο ελέγχου που επιβαρύνει το δίκτυο εξαιτίας της κυκλοφορίας των ενημερωτικών πακέτων. Δύο παραδείγματα proactive πρωτοκόλλων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3:

Πίνακας 2.3: Proactive Topology-Based Πρωτόκολλα

	Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) [4]	Optimized Link State Routing (OLSR) [5]
Κύρια Χαρακτηριστικά	Βασίζονται στον αλγόριθμο Bellman-Ford, διατηρούν ενημερωμένους πίνακες δρομολόγησης που ανανεώνονται είτε μέσω πλήρων πακέτων είτε μέσω μικρότερων (που μεταφέρουν μόνο την πληροφορία που έχει αλλάξει)	Βασίζονται στον link-state αλγόριθμο, διατηρούν ένα τοπολογικό χάρτη του δικτύου που σχεδιάζεται μέσω της ανταλλαγής των πληροφοριών δρομολόγησης. Αναθέτουν σε MPRs (multipoint relays-πολυσημειακές αναμεταδόσεις) το έργο του υπολογισμού του συντομότερου μονοπατιού
Πλεονεκτήματα	Μικρότερη επιβάρυνση για τη δρομολόγηση, εγγυώνται ακυκλικές διαδρομές	Μείωση του αριθμού των πακέτων ελέγχου εξαιτίας των MPR επιλογών
Μειονεκτήματα	Χαμηλό Εύρος Ζώνης	Ακατάλληλο για δίκτυα χαμηλής πυκνότητας

Τα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης ενεργοποιούνται κατόπιν αίτησης για μία συγκεκριμένη διαδρομή από έναν κόμβο του δικτύου. Οι λειτουργίες που επιτελούνται είναι αρχικά η εύρεση του κατάλληλου μονοπατιού (μία διαδικασία που τερματίζεται

είτε όταν βρεθεί κάποια διαδρομή ή όταν έχει εξεταστεί κάθε πιθανή παραλλαγή) και, στη συνέχεια, η καταγραφή της διαδρομής, καταχώριση που διατηρείται μέχρις ότου ο κόμβος-προορισμός να καταστεί μη διαθέσιμος ή η διαδρομή μη απαραίτητη. Η υψηλή ταχύτητα εύρεσης μονοπατιού και οι μικρές απαιτήσεις μνήμης αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά των reactive πρωτοκόλλων, τα οποία παρουσιάζουν, ωστόσο, αρκετά μειονεκτήματα μεταξύ των οποίων το περιορισμένο εύρος ζώνης, η πλεονάζουσα πληροφορία, ο ανταγωνισμός για την πρόσβαση στο μέσο, οι συγκρούσεις και οι περιορισμένες δυνατότητες σε ενέργεια των τερματικών - γεγονός που οφείλεται στα μηνύματα ελέγχου που μεταδίδονται μέσω πλημμύρας σε όλο το δίκτυο. Παραδείγματα συνοψίζονται στον πίνακα 2.4:

Πίνακας 2.4: Reactive Topology-Based Πρωτόκολλα

	Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) [6]	Dynamic Source Routing (DSR) [8]
Κύρια Χαρακτηριστικά	Εύρεση Διαδρομής: Η πηγή αποστέλλει ένα πακέτο αίτησης διαδρομής (RREQ), ο προορισμός ή ένας ενδιάμεσος κόμβος που γνωρίζει μία έγκυρη διαδρομή απαντάει με ένα πακέτο απάντησης διαδρομής (RREP), κάθε κόμβος καταγράφει το γείτονα από τον οποίο έλαβε το πακέτο (εγκαθίδρυση αντίστροφου μονοπατιού)	Βασίζεται στη δρομολόγηση πηγής. Κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα δρομολογίων και μεταχειρίζεται διαδικασίες όπως η AODV
Πλεονεκτήματα	Ακυκλικά μονοπάτια (χρήση ακολουθίας αριθμών)	Υποστηρίζει ασύμμετρες συνδέσεις
Μειονεκτήματα	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 προϋποθέτουν τη γνώση της γεωγραφικής θέσης των επικοινωνούντων κόμβων. Σε αυτήν την περίπτωση, δεν υπάρχουν πίνακες δρομολόγησης και η μετάδοση βασίζεται στη θέση του κόμβου προορισμού, η οποία περιλαμβάνεται στη διεύθυνση προορισμού του πακέτου. Δύο πρωτόκολλα που λειτουργούν με βάση τη θέση - DREAM, GRID- συνοψίζονται στον πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: Πρωτόκολλα Που Λειτουργούν με Βάση τη Θέση

	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM) [7]	GRID [9]
Κύρια Χαρακτηριστικά	Κάθε κόμβος διατηρεί μία βάση δεδομένων που περιλαμβάνει τις θέσεις όλων των κόμβων στο δίκτυο· οι κόμβοι ανταλλάσσουν μηνύματα αλλαγής τοπολογίας με συχνότητα ανάλογη της κινητικότητας τους και αντίστροφως ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης	Χρησιμοποιεί την υπηρεσία GRID LOCATION SERVICE - GLS - και μία άπλειστη τεχνική για την προώθηση των πακέτων. Η περιοχή διαιρείται σε πολλά τετράγωνα, όπου τα ν-τάξεως τετράγωνα χωρίζονται σε 4 μικρότερα (ν-1)-τάξεως τετράγωνα
Πλεονεκτήματα	Υποστηρίζει κατευθυντική πλημμύρα για την προώθηση των πακέτων (ένας κόμβος μεταδίδει μόνο προς τους πρώτης τάξεως γείτονες, και προς την κατεύθυνση του προορισμού)	Δεν χρησιμοποιείται πλημμύρα [όταν δεν πρόκειται για τον κόμβο-διακομιστή του προορισμού, η αίτηση προωθείται στον κόμβο με το μικρότερο αναγνωριστικό από εκείνους που είναι καταχωρημένοι στον τοπολογικό πίνακα του κόμβου]
Μειονεκτήματα	Απαιτείται διαδικασία επαναφοράς σε περίπτωση που δεν βρεθεί πρώτης τάξεως γείτονας προς την κατεύθυνση του προορισμού	-

### 2.1.2.3 Επίπεδο Μεταφοράς

Το Transmission Control Protocol (TCP) είναι ένα πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς που σχεδιάστηκε με στόχο την παροχή ποιότητας υπηρεσίας (QoS), ιδιαίτερα στα ενσύρματα δίκτυα. Όσον αφορά στα ασύρματα δίκτυα, ωστόσο, το πρωτόκολλο έχει αποδειχθεί αναποτελεσματικό κυρίως εξαιτίας της κινητικότητας των κόμβων που οδηγεί σε συχνές αποτυχίες εύρεσης διαδρομής αλλά και υψηλό ρυθμό λαθών και κατ' επέκταση αλλοίωση των TCP πακέτων. Η αρχική προσέγγιση για το σχεδιασμό του TCP αφορούσε στα ενσύρματα δίκτυα όπου ο ρυθμός των λαθών κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα και οι απώλειες πακέτων οφείλονται αποκλειστικά στη συμφόρηση. Αυτή η υπόθεση όμως δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων, η φύση των οποίων επιβάλλει το διαχωρισμό των σφαλμάτων σε εκείνα που συμβαίνουν για λόγους συμφόρησης και σε άλλου είδους σφάλματα όπως, για παράδειγμα, οι απώλειες πακέτων εξαιτίας του υψηλού ρυθμού λαθών (οπότε είναι απαραίτητη η άμεση αναμετάδοση) και αποτυχίες δρομολόγησης εξαιτίας της κινητικότητας των κόμβων (εξαιτίας της κατάρρευσης μιας σύνδεσης). Η εισαγωγή του FIXED-RTO είναι μία καλή εναλλακτική προς αποφυγή των προαναφερθέντων προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα, το FIXED-RTO αναμένει δύο διαδο-

χικές λήξεις χρόνου πριν αποφασίσει για μία αποτυχημένη μετάδοση και αναμεταδίδει το πακέτο χωρίς να διπλασιάσει το χρονόμετρο. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μια τεχνική που επιτρέπει στον TCP αποστολέα να αποφύγει την αναμονή για μεγάλα χρονικά διαστήματα πριν επιχειρήσει αναμετάδοση. Μία δεύτερη εναλλακτική είναι το διαστρωματικό TCP, δηλαδή η αλληλεπίδραση του επιπέδου μεταφοράς με τα άλλα στρώματα - με τη χρήση πρωτοκόλλων όπως το Explicit Link Failure Notification, το TCP-Feedback, το Ad-hoc TCP. Υπάρχουν, τέλος, δύο μηχανισμοί στο στρώμα σύνδεσης, το Link Random Early Discarding - το οποίο καθορίζει μία βέλτιστη τιμή για το παράθυρο συμφόρησης - και η τεχνική του adaptive spacing (προσαρμοστικός διαχωρισμός), που επιτρέπει καλύτερο συντονισμό μεταξύ των σταθμών που ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο μέσο.

### 2.1.3 Επιπρόσθετες Βελτιώσεις (Κατευθυντικές Κεραίες)

Ανάμεσα στις προτάσεις που έχουν κατατεθεί κατά καιρούς είναι η αντικατάσταση των ομοιοκατευθυντικών κεραιών, δηλαδή των κεραιών που εκπέμπουν και λαμβάνουν ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, με κατευθυντικές. Με τον τρόπο αυτό, περιορίζεται η περιοχή κάλυψης σε ένα μικρότερο τομέα μεγαλύτερης ακτίνας, γεγονός που επιτρέπει τη χωρική επαναχρησιμοποίηση, και υψηλότερου κέρδους λήψης, και άρα μέγιστης ισχύος σήματος. Η χρήση κατευθυντικών κεραιών οδηγεί στη μείωση των παρεμβολών εξαιτίας των σημάτων που προέρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις. Από την άλλη μεριά, οι σταθμοί εμφανίζουν αδυναμία ανίχνευσης σημάτων από διαφορετικές διευθύνσεις, φαινόμενο γνωστό με τον διεθνή όρο deafness, ενώ, ταυτόχρονα, επιδεινώνεται το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού 2.1.1. Για τους λόγους αυτούς, έχουν παρουσιαστεί πολλές παραλλαγές με στόχο την εξάλειψη των προβλημάτων αυτών στο επίπεδο MAC [10], όπως είναι τα πρωτόκολλα Directional Network allocation Vector per sector, Directional MAC, Multihop RTS MAC (MMAC), κατευθυντικά πλαίσια RTS και ομοιοκατευθυντικά CTS καθώς και η χρήση των τεχνικών του κυκλικού RTS και της σάρωσης (ο εκπομπός στέλνει

RTS σε όλες τις κατευθυντικές κεραίες). Στο επίπεδο της δρομολόγησης, το κύριο πρόβλημα πηγάζει από τη διαδικασία της σάρωσης, η οποία εισάγει καθυστέρηση. Η χρήση του Utilizing Directional Antennas for Ad-Hoc Networking(UDAAN) [11] θεωρείται ιδανική λύση καθώς μειώνει τον αριθμό των ενημερώσεων που αφορούν την κατάσταση των συνδέσεων αναλογικά με την απόσταση από την πηγή.

## 2.2 Δίκτυα Αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν μια κατηγορία αυτοργανούμενων δικτύων, ικανά να επιτελέσουν σημαντικές λειτουργίες όπως η επιτήρηση συστημάτων, η παρακολούθηση χώρων, η ανίχνευση και ο 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, δηλαδή η ικανότητα να εξασφαλίζουν τις απαραίτητες δομές οργάνωσης χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, και η συνεργασία, καθώς 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 συχνότερες. Εκτός από τους περιορισμούς υλικού (ενέργεια,



μνήμη και υπολογιστική χωρητικότητα) και την υψηλότερη ευαισθησία στα λάθη, 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 ετικέτες παγκόσμιας εμβέλειας για την ταυτοποίηση των κόμβων.

### 2.2.1 Αρχιτεκτονική

Οι παράμετροι σχεδιασμού ενός δικτύου αισθητήρων είναι οι εξής [12]:

- *Ανοχή λαθών.* Είναι η ικανότητα ενός δικτύου αισθητήρων να λειτουργεί αδιάκοπα παρά την πιθανή κατάρρευση ενός ή περισσότερων κόμβων (εξάντληση ενέργειας, φυσική φθορά 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 κατάρρευσης των συνδέσμων.
- *Επεκτασιμότητα.* Είναι η δυνατότητα επέκτασης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων όσον αφορά στον αριθμό των κόμβων αλλά και την πυκνότητά τους, η οποία και υπολογίζεται βάσει της σχέσης:  $m(R) = \frac{N \cdot \pi R^2}{A}$ . Η επεκτασιμότητα οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσοστό συνολικής κάλυψης, το οποίο ορίζεται ως η ένωση των επιμέρους περιοχών κάλυψης των κόμβων (χαμηλότερου κόστους). Τα μοντέλα κάλυψης είναι είτε ντετερμινιστικά ή 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 [14]. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την ένταση της κίνησης και του φορτίου στο δίκτυο.

- *Κόστος παραγωγής.* Μία παράμετρος που καθορίζει πόσο οικονομικά συμφέρουσα είναι η εγκατάσταση ασύρματων αισθητήρων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες. Το κόστος ενός μεμονωμένου κόμβου πρέπει να παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.
- *Περιορισμοί υλικού.* Αφορούν στις απαιτήσεις για μικρό μέγεθος και χαμηλό βάρος, μικρή ισχύ, χαμηλό κόστος, ευκολία προσαρμογής σε αντίξοες συνθήκες, διαθεσιμότητα και αυτονομία. Το υλικό διαμορφώνεται από τα παρακάτω τμήματα:

επίπεδο αισθητήρων <sup>4</sup>	εκτελεί τη συλλογή δεδομένων από αντικείμενα που έχουν ανιχνευθεί
επίπεδο επικοινωνίας <sup>5</sup>	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)
επίπεδο επεξεργασίας <sup>6</sup>	επεξεργάζεται τα δεδομένα και τα συσχετίζει βάσει τεχνικών λήψης απόφασης, επεξεργασίας σήματος, συγκέντρωσης δεδομένων (data fusion), τεχνητής νοημοσύνης και την υπάρχουσα γνώση όσον αφορά τις επιδόσεις του δικτύου ώστε να παράγει τα τελικά αποτελέσματα
επίπεδο χρήστη	παρουσιάζει τα τελικά αποτελέσματα, παρέχοντας μία διεπαφή ανθρώπου-μηχανής αλλά και διαδραστικές λειτουργίες

<sup>4</sup> αποτελείται από τους αισθητήρες και έναν μετατροπέα Analog-To-Digital(ADC)

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

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

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| μονάδα ισχύος                     | μία μονάδα εύρεσης θέσεως ή ένας mobilizer ίσως είναι απαραίτητα ανάλογα με την εφαρμογή   |
| επιπρόσθετες λειτουργικές μονάδες | i. Μονάδα Διαχείρισης Πόρων που παρακολουθεί τους διαθέσιμους πόρους<br>ii. Μονάδα Ελέγχου Τοπολογίας/Κάλυψης που προσαρμόζει την τοπολογία του δικτύου και συγχρονίζει τους κόμβους |
- *Τοπολογία δικτύου αισθητήρων.* Η εγκατάσταση, προ-εγκατάσταση και επανεγκατάσταση των αισθητήρων.
  - *Περιβάλλον.* Οι συνθήκες στην περιοχή όπου τοποθετούνται οι κόμβοι παίζουν σημαντικό ρόλο δεδομένου ότι οι κόμβοι λειτουργούν χωρίς επιτήρηση. Είναι επίσης σχεδιασμένοι ώστε να προσαρμόζονται σε δυσμενή περιβάλλοντα.
  - *Μέσο Μετάδοσης.* Η πλειοψηφία των ασύρματων συνδέσεων υλοποιούνται μέσω ραδιοσυχνοτήτων, υπέρυθρων ή οπτικών μέσων. 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 είτε σταθεροί είτε 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 τον 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 άκρο σε άκρο απόδοσης είναι επιτακτική ανάγκη όταν μεταδίδεται μεγάλος όγκος δεδομένων· αυτό οφείλεται στο περιορισμένο εύρος ζώνης και την υψηλή πυκνότητα του δικτύου 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 διακρίνονται:

#### 1. ανάλογα με το μηχανισμό επικοινωνίας:

- (a) Απευθείας σύνδεση (Direct connected): κάθε αισθητήρας επικοινωνεί απευθείας με τον προορισμό. Αυτό οδηγεί σε υψηλό κόστος και κατ' επέκταση μεγάλη αναποτελεσματικότητα, ιδιαίτερα στα δίκτυα μεγάλης κλίμακας.
- (b) Επίπεδα αυτοργανούμενα (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 ενέργειά τους πολύ γρήγορα οδηγώντας στην αποσύνδεση του δικτύου.

- (c) Peer-to-peer multi-hop: ομαδοποίηση ενός επιπέδου.
- (d) Cluster-based multi-hop: οι κόμβοι διαμορφώνουν ομάδες, κάθε μία εκ των οποίων έχει τον δικό της επικεφαλής που είναι υπεύθυνος αφενός για την συλλογή δεδομένων στην περιοχή του, δηλαδή τοπικά, και αφετέρου για την κατηγοριοποίησή τους. Οι επικεφαλής κόμβοι χαμηλότερου επιπέδου προωθούν δεδομένα σε κόμβους 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:

- (a) Κεντροποιημένη (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.
- (b) Κατανεμημένη (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.
- (c) Υβριδική (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 διακρίνονται σε:

- Σταθερής κατάστασης που βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ακριβής και ενημερωμένη εκτίμηση του πεδίου που μελετάται: προϋποθέτει σταθερή ροή πληροφορίας.
  - *Ad hoc* τρόπος αίτησης-απάντησης 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* τρόπος βασισμένος σε κατώφλι 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 τον υπολογισμό και την 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 τον Park και τους συνεργάτες του [13], τα μοντέλα είναι (α) γραμμικά (β) εξαρτώμενα από το ρυθμό αποφόρτισης (λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του ρυθμού αυτού στη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας) και (γ) απενεργοποίησης (όπου λαμβάνονται υπόψη και φαινόμενα αδρανοποίησης).

Ένα ακόμα ζήτημα που αξίζει να αναφερθεί είναι η κατανομή της συνεκτικότητας και πως επηρεάζεται από την ακτίνα μετάδοσης, την πυκνότητα καθώς και τη θέση όπου έχουν τοποθετηθεί οι κόμβοι. Οι Papavassiliou και Zhu [14] περιγράφουν ένα μοντέλο (2.4.1) για τη συνεκτικότητα το οποίο στηρίζεται στις διαδικασίες που συντελούνται κατά την εξέλιξη ενός δικτύου, δηλαδή την προσθαφαίρεση ή την αναδιάταξη των συνδέσεων τους: τα συμπεράσματα της μελέτης αναδεικνύουν τη συσχέτιση της πιθανότητας πρόσθεσης,

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 (multihop ad-hoc networks), η ποιότητα 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 Papavassiliou και Zhu έδειξαν ότι η συνδεσιμότητα ακολουθεί μία Poisson κατανομή με παράμετρο που εξαρτάται από την πυκνότητα και την ακτίνα μετάδοσης των κόμβων. Ακόμα, στην εν λόγω μελέτη λαμβάνεται ειδική μέριμνα για την κατανάλωση ισχύος καθώς και το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων.

### 2.2.2 Στοιβά πρωτοκόλλων

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

**Στρώμα Ελέγχου Ζεύξης:** έχει σχέση με την πολυπλεξία της ροής δεδομένων, την ανίχνευση πλαισίου, την πρόσβαση στο μέσο και τον έλεγχο σφαλμάτων. Εγγυάται επικοινωνία σημείο προς σημείο ή σημείο προς πολλαπλά σημεία στο δίκτυο. Όσον αφορά την πρόσβαση στο μέσο, τα πρωτόκολλα MAC πρέπει να εξασφαλίζουν τη δημιουργία μιας υποδομής για το δίκτυο και τη δίκαιη κατανομή των επικοινωνιακών πόρων μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων. Τα υπάρχοντα πρωτόκολλα MAC (κυψελωτά συστήματα, Bluetooth,

Πίνακας 2.6: MAC Πρωτόκολλα στα Δίκτυα Αισθητήρων

MAC protocol	Πρόσβαση στο μέσο	Πλεονεκτήματα	Κατανάλωση ισχύος
SMACS and EAR	Σταθερή εκχώρηση αμφίδρομων χρονο-σχημάτων σε σταθερή συχνότητα	Εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης	Απενεργοποίηση του δέκτη όταν είναι αδρανής
Hybrid TDMA-FDMA	Κεντροποιημένη συχνότητα και διαίρεση χρόνου	Βέλτιστος αριθμός καναλιών για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος	Προσέγγιση βάσει υλικού
CDMA-based	Ανταγωνιστική και τυχαία πρόσβαση στο μέσο	Αλλαγή φάσης και καθυστέρηση πριν τη μετάδοση	Συνεχής ακρόαση του μέσου

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 ελαχιστη 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 περιλαμβάνει μία σύντομη περιγραφή των MAC πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων.

Όσον αφορά τον έλεγχο σφαλμάτων, αναφέρονται δύο λειτουργίες: Forward Error Correction (FEC) και Automatic Repeat Request (ARQ). Η 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 δίκτυα αισθητήρων συνίσταται η εγκατάσταση ενός αποκωδικοποιητή Viterbi. Δείκτης αξιοπιστίας των συνδέσεων είναι ο ρυθμός των λανθασμένων ψηφίων (BER).

**Στρώμα Δικτύου:** είναι σχεδιασμένο με γνώμονα τη σωστή διαχείριση ενέργειας, τη



βασισμένη στα δεδομένα φύση των δικτύων αισθητήρων, την αποτελεσματική αξιοποίηση της συλλογής δεδομένων, τη βασισμένη σε ιδιότητες ονομασία - που σημαίνει ότι ενδιαφέρει να εξετάσουμε μία ιδιότητα του φαινομένου παρά να μελετάμε κάθε κόμβο ξεχωριστά και τη γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Η δρομολόγηση βάσει δεδομένων σημαίνει ότι η ανάθεση εργασιών στους επιμέρους κόμβους προϋποθέτει την εκδήλωση ενδιαφέροντος από τους χρήστες. 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 δικτύου με τις διαδρομές ελαχίστου κόστους [12].

**Στρώμα Μεταφοράς:** είναι απαραίτητο προκειμένου το σύστημα να είναι προσβάσιμο από το Διαδίκτυο και άλλα εξωτερικά δίκτυα. Το TCP δεν μπορεί να εφαρμοστεί εξαιτίας των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν τα δίκτυα αισθητήρων. Η διαίρεση του TCP (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 το TCP μέσω Διαδικτύου ή δορυφόρου.

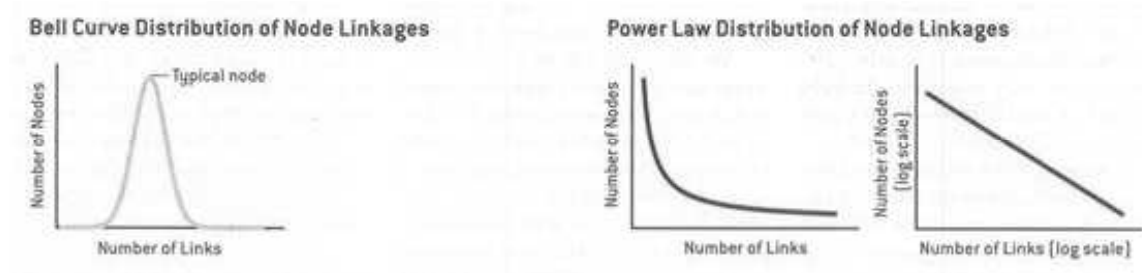
**Στρώμα εφαρμογής** τα πρωτόκολλα του στρώματος αυτού απαιτούν περαιτέρω έρευνα.

Ωστόσο, τα τρία πιθανότερα είναι το πρωτόκολλο διαχείρισης αισθητήρων, το πρωτόκολλο ανάθεσης εργασιών και γνωστοποίησης δεδομένων και το πρωτόκολλο αίτησης και διάδοσης πληροφορίας [12].

## 2.3 Scale-Free Δίκτυα

Τα κοινωνικά δίκτυα, στην πλειοψηφία τους, 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, 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 Jeong και Albert [15], 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 φαινομενικά αμέτρητο αριθμό συνδέσεων. Ωστόσο, στα δίκτυα αυτά, η πλειοψηφία των κόμβων έχουν μικρό αριθμό συνδέσεων. 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 το νόμο μίας 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 συνεχώς φθίνουσα συνάρτηση χωρίς κορυφή, σε αντίθεση με την καμπύλη σχήματος καμπάνας. Συνεπώς, η κατανομή των συνδέσεων δεν είναι ομοιόμορφη, κάτι που δε συμβαίνει στα τυχαία δίκτυα. Υπάρχουν δηλαδή πολύ λίγοι κόμβοι με απεριόριστο αριθμό συνδέσεων, οι οποίοι κυριαρχούν στο δίκτυο, και αρκετοί άλλοι κόμβοι με πολύ μικρό αριθμό συνδέσεων.



Σχήμα 2.1: Κατανομές του αριθμού των συνδέσεων

Σύμφωνα με το μοντέλο τυχαίων γράφων των Erdős και R enyi (ER model [16]), ξεκινώντας με  $N$  κορυφές, 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 μηχανισμός είναι η επιλεκτική σύνδεση όπως ονομάζεται: το γεγονός ότι οι κόμβοι δεν αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο με αποτέλεσμα ορισμένοι να 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  $2 \times n$  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 κατάσταση χωρίς κλίμακα και η πιθανότητα ένας κόμβος που αλληλεπιδρά με  $k$  άλλους μειώνεται ακολουθώντας το νόμο μίας δύναμης τύπου  $P(k) \sim k^{-\gamma}$ , 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 βαθμό μικρότερο του  $k$ ,  $P(k_i(t) < k)$ , γράφεται ως  $P(t_i > \frac{m^2 t}{k^2})$ .

Υποθέτοντας 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

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

Έτσι,  $\gamma = 3$

□

Κατά την ανάλυση των scale-free δικτύων, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη και των δύο αυτών μηχανισμών, οι οποίοι συμβάλλουν στην εμφάνιση της κατανομής που ακολουθεί το νόμο μιας δύναμης. 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 [16]. Προκειμένου να ενσωματωθεί ο επεκτατικός χαρακτήρας του δικτύου, θεωρείται αρχικά ένας μικρός αριθμός  $m_0$  κόμβων, και σε κάθε βήμα προστίθεται ένας νέος κόμβος με  $m < m_0$  ακμές που συνδέεται με  $m$  διαφορετικούς προϋπάρχοντες κόμβους. Προκειμένου να ενσωματωθεί η επιλεκτική σύνδεση, γίνεται η υπόθεση ότι η πιθανότητα  $\Pi$  ένας νέος κόμβος να συνδεθεί με έναν κόμβο  $i$  εξαρτάται από τη συνδεσιμότητα  $k_i$  του συγκεκριμένου κόμβου, έτσι ώστε  $\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$ . 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 γνώρισμα της αυτο-οργάνωσης.

Ανάμεσα στους παράγοντες που ενδεχομένως να οδηγούσαν σε ένα ελαφρώς διαφοροποιημένο αποτέλεσμα είναι ο μη γραμμικός χαρακτήρας της επιλεκτικής σύνδεσης, η ύπαρξη κατευθυνόμενων ακμών και οι αλλαγές της τοπολογίας πέραν από την εισαγωγή νέων κόμβων όπως η αναδιάταξη ή και η αφαίρεση των κόμβων.

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

Πίνακας 2.7: Scale-Free Δίκτυα

ΔΙΚΤΥΑ	ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ
Κυτταρικός Μεταβολισμός	Μόρια που εμπλέκονται στη μετατροπή της τροφής σε ενέργεια	Συμμετοχή στην ίδια βιοχημική αντίδραση
Hollywood	Ηθοποιοί	Συμμετοχή στην ίδια ταινία
Παγκόσμιος Ιστός	Ιστοσελίδες	Σύνδεσμοι (Utlis)
Παραπομπές	Επιστημονικά κείμενα	Αναφορές σε άλλα επιστημονικά κείμενα
Συμμαχίες	Εταιρίες	Συνεργασίες
Διαδίκτυο	Δρομολογητές	Οπτικές ή φυσικές συνδέσεις

Πίνακας 2.8: Non-Scale-Free Δίκτυα

ΔΙΚΤΥΑ	ΚΟΜΒΟΙ	ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ
Οδικό Δίκτυο στις ΗΠΑ	Αυτοκινητόδρομοι	Διασταυρώσεις
Επιστήμη Υλικών	Άτομα	Συνδέσεις μεταξύ των ατόμων

### Η κύρια αδυναμία

Ένα σημαντικό ζήτημα που ανακύπτει έχει σχέση με την αξιοπιστία του δικτύου. Σε αντίθεση με τους τυχαίους γράφους, τα scale-free δίκτυα είναι ανθεκτικά στις βλάβες που χαρακτηρίζονται από τυχαιότητα. 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. Αντιθέτως, είναι πιο πιθανό να αφαιρεθούν μικροί κόμβοι, με λιγότερες συνδέσεις, που επηρεάζουν ελάχιστα ως καθόλου τη συνεκτικότητα του δικτύου. Έτσι, το δίκτυο παραμένει συνεκτικό, δηλαδή υπάρχει μονοπάτι μεταξύ δύο οποιονδήποτε κόμβων, γεγονός που συνεπάγεται την εξάλειψη του φαινομένου της τμηματοποίησης<sup>7</sup>. Ωστόσο, γίνεται ξεκάθαρο ότι η καταστροφή μεγάλου αριθμού κεντρικών κόμβων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαταράξεις, θέτοντας το σύστημα σε κίνδυνο και καθιστώντας το ιδιαίτερα ευάλωτο στις επιθέσεις. Η Αχιλλέως Πτέρνα των scale-free δικτύων θέτει το ερώτημα για τον αριθμό των κεντρικών κόμβων που είναι απαραίτητοι. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, η ταυτόχρονη καταστροφή του 5 έως 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, κόμβοι τέτοιου είδους είναι ανεπιθύμητοι.

### Επιδημιολογικά μοντέλα σε Scale-Free δίκτυα

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 κατώφλι [17] που σημαίνει ότι οποιοσδήποτε ιός θα εξαπλωθεί τελικά στα δίκτυα αυτά. Η εξήγηση που δίνεται στηρίζεται στο ότι τουλάχιστον ένας κεντρικός κόμβος τείνει να

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

μολυνθεί εξαιτίας των πολλών συνδέσεών του, μεταδίδοντας με τον τρόπο αυτό έναν ιό σε πολλούς κόμβους, μολύνοντας τελικά ολόκληρο το δίκτυο. Κατά συνέπεια, η αποτελεσματική προστασία επιτάσσει την ανοσοποίηση όλων των κόμβων ανεξαιρέτως. Η ιδέα της ανοσοποίησης ενός μικρού τμήματος του πληθυσμού προϋποθέτει τον εντοπισμό των κεντρικών κόμβων, γεγονός που δεν είναι εύκολη υπόθεση, ειδικά 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 των επιδημιών μέσω της ανίχνευσης και μόλυνσης κεντρικών κόμβων θα μπορούσε να αποβεί μια ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος στον επιχειρησιακό τομέα. Τέλος, σημειώνεται ότι η μετατροπή ενός οποιουδήποτε δικτύου σε δίκτυο scale-free δεν είναι πάντα δυνατή. Κατά την εξέταση ενός δικτύου είναι σημαντική η μελέτη των συνδέσεων και των κόμβων ξεχωριστά καθώς και των χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο πιθανώς να είναι ταυτόχρονα συνεκτικό και scale-free όταν μικρές, διασυνδεδεμένες ομάδες κόμβων συνδέονται με μεγαλύτερες, λιγότερο συνεκτικές ομάδες, όπως συμβαίνει με το Παγκόσμιο Ιστό.

## 2.4 Δίκτυα Μικρού-Κόσμου

Ο όρος 'small-world' (ή 'δίκτυα μικρού-κόσμου') - τον οποίο εισηγήθηκαν οι Watts and Strogatz [18]- προέρχεται από το φαινόμενο 'μικρού-κόσμου', που χαρακτηρίζει δίκτυα τα οποία δεν εμπίπτουν σε καμία από τις γνωστές κατηγορίες γράφων (κανονικοί<sup>8</sup> ή τυχαίοι), καθότι είναι μεν οργανωμένα σε συστάδες, όπως τα κανονικά πλέγματα, έχοντας ταυτόχρονα μικρό μέσο μήκος μονοπατιού, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των τυχαίων γράφων. Επομένως, τα δίκτυα αυτά κατατάσσονται κάπου ανάμεσα στις δύο αυτές ακραίες περιπτώσεις. Το φαινόμενο 'μικρού-κόσμου' αναφέρεται συχνά ως διαχωρισμός έξι βαθμών ('six degrees of separation') καθώς έχει παρατηρηθεί ότι το μέσο μήκος μονοπατιού

είναι περίπου έξι βήματα.

Ο τρόπος που έχει προταθεί για τη μετατροπή ενός δικτύου σε small-world δίκτυο είναι ο εξής: ξεκινώντας από ένα κυκλικό πλέγμα με  $N$  κόμβους και βαθμό κόμβου  $k$  για όλους τους κόμβους, γίνεται επανασύνδεση κάθε ακμής με πιθανότητα  $p$  δημιουργώντας, έτσι, συντομεύσεις: τα λεγόμενα short-cuts. Δεδομένου ότι οι τιμές  $p = 0$  και  $p = 1$  αντιστοιχούν σε έναν κανονικό και έναν τυχαίο γράφο αντίστοιχα, η περιοχή τιμών  $0 < p < 1$  αντιστοιχεί σε μία μέση κατάσταση μεταξύ κανονικότητας και πλήρους τυχαιότητας. Η διαδικασία μετάβασης σε ένα small-world δίκτυο εκτιμάται με βάση δύο δείκτες που ορίζονται ως εξής:

**Ορισμός 1. Χαρακτηριστικό μήκος μονοπατιού  $L(p)$ .** Ο μέσος αριθμός των ακμών στο συντομότερο μονοπάτι μεταξύ δύο κόμβων (γενική ιδιότητα).

**Ορισμός 2. Συντελεστής ομαδοποίησης  $C(p)$ .** Ο μέσος αριθμός των ακμών μεταξύ των γειτόνων ενός κόμβου (τοπική ιδιότητα).

Η μόνη απαίτηση, στην εν λόγω διαδικασία, είναι ότι τα short-cuts (συντομεύσεις) θα πρέπει να συνδέουν κόμβους οι οποίοι κανονικά θα βρίσκονταν σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση (η απόσταση μετρείται σε βήματα) από το μέσο μήκος μονοπατιού τυχαίου γράφου  $L_{random}$ . Το κανονικό πλέγμα για  $p = 0$  είναι ισχυρά ομαδοποιημένο, σχηματίζοντας ένα μεγάλης κλίμακας δίκτυο 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 λογαριθμικά ως προς το  $N$ . Ωστόσο, μετά την ολοκλήρωση της τροποποιητικής διαδικασίας, παρατηρούμε ότι σε ένα μεγάλο εύρος τιμών της πιθανότητας  $p$ , το μήκος  $L(p)$  είναι σχεδόν τόσο μικρό όσο το χαρακτηριστικό μήκος ενός τυχαίου γράφου  $L_{random}$  ενώ για το συντελεστή ομαδοποίησης ισχύει  $C(p) \gg C_{random}$ . Τα παραπάνω είναι αποτέλεσμα της προσθήκης ακμών μεγάλου μήκους (short-cuts), που οδηγούν στην ραγδαία

---

<sup>8</sup>κανονικοί γράφοι είναι οι γράφοι των οποίων όλες οι κορυφές έχουν τον ίδιο αριθμό ακμών



μείωση του  $L(p)$ . Οι νέες αυτές ακμές συνδέουν κόμβους του γράφου, που διαφορετικά θα απείχαν πολύ περισσότερο από  $L_{random}$ . Για μικρές τιμές του  $p$ , κάθε συντόμευση έχει ισχυρά μη γραμμική επίδραση στο  $L$ , μειώνοντας την απόσταση όχι μόνο μεταξύ των προσκειμένων κόμβων, αλλά και μεταξύ των γειτόνων τους, ενώ έχει γραμμική επίδραση στο συντελεστή  $C$  εξαιτίας των ακμών που αποσπώνται από την ομάδα ώστε να πραγματοποιηθούν οι συντομεύσεις. Έτσι, το  $C(p)$  παραμένει πρακτικά αμετάβλητο ακόμα και αν το χαρακτηριστικό μήκος  $L(p)$  μειωθεί εξαιρετικά. Το καίριο ζήτημα, ωστόσο, είναι το πλήθος των συντομεύσεων που απαιτούνται προκειμένου να μετατραπεί ένα δίκτυο σε δίκτυο τύπου small-world.

Μία εργασία όσον αφορά την εξάπλωση των μολυσματικών ασθενειών - με στόχο να ταυτοποιηθεί η λειτουργική σημασία της συνεκτικότητας των small-world δικτύων για τα δυναμικά συστήματα - έδειξε ότι η κρίσιμη τιμή της μολυσματικότητας  $r_{half}$ , δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο νοσεί το 1/2 του πληθυσμού, μειώνεται ραγδαία για μικρές πιθανότητες  $p$ . Επίσης, όταν μία ασθένεια είναι ικανή να μολύνει ολόκληρο τον πληθυσμό ανεξάρτητα από τη δομή του, ο χρόνος  $T(p)$  που απαιτείται για τη μόλυνση ολόκληρου του πληθυσμού προσεγγίζει την καμπύλη του  $L(p)$  [18]. Έτσι, η συνεκτικότητα που επιδεικνύουν τα small-world δίκτυα ενοχοποιείται για την ταχύτερη και ευκολότερη εξάπλωση των μολυσματικών ασθενειών.

Το παραπάνω μοντέλο αποκλείει την εμφάνιση κόμβων με μεγάλο αριθμό συνδέσεων, καθώς η πιθανότητα να βρεθεί ένας κόμβος τέτοιου είδους (δηλαδή κόμβος με πολύ μεγάλο βαθμό) μειώνεται εκθετικά ως προς το  $k$ , αποτυγχάνοντας έτσι να αιτιολογήσει την ύπαρξη scale-free δικτύων. Δεύτερον, το μοντέλο δεν ενσωματώνει τους δύο μηχανισμούς που χαρακτηρίζουν τα δίκτυα του πραγματικού κόσμου και περιγράφονται στην ανάλυση των scale-free δικτύων (ενότητα 2.3). Καταρχήν, τα πραγματικά δίκτυα, στην πλειοψηφία τους, επεκτείνονται με την πάροδο του χρόνου καθώς συνεχώς προστίθενται νέοι κόμβοι, κάτι που επιβεβαιώνεται από πολλά παραδείγματα όπως το World Wide Web, ένα

δίκτυο που μεγαλώνει συνεχώς με την προσθήκη νέων σελίδων και συνδέσμων. Έπειτα, η υπόθεση ότι η πιθανότητα σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων είναι τυχαία ή ομοιόμορφη δεν ισχύει για πραγματικά δίκτυα εξαιτίας του φαινομένου της επιλεκτικής σύνδεσης όπως αυτό περιγράφεται στην ενότητα 2.3 του κεφαλαίου.

### 2.4.1 Continuum Theory

#### Βασικό Μοντέλο [19]

Η ενότητα αυτή περιγράφει ένα αναλυτικό μοντέλο που παρουσιάστηκε από τους Paravasiliou και Zhu, και αναφέρεται ως Continuum Theory, ή Θεωρία Συνέχειας. Το μοντέλο περιγράφει τις διάφορες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων καθώς αυτό μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή την προσθήκη, την αφαίρεση και τον επαναπροσδιορισμό των συνδέσεων, και μελετά την επίδραση κάθεμιας από αυτές στην καθολική συμπεριφορά του δικτύου. Βασική υπόθεση, στην ανάλυση που ακολουθεί, είναι ο σταθερός αριθμός των κόμβων  $N$  του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή, που πρακτικά σημαίνει ότι κανένας κόμβος δεν εγκαταλείπει το δίκτυο ούτε προστίθενται σε αυτό. Σε κάθε χρονική στιγμή, εκτελείται μία από τις παρακάτω ενέργειες:

- $p_1$ : Με πιθανότητα  $p$  ( $0 \leq p < 1$ ), προστίθενται  $m_1$  νέες συνδέσεις όπου ( $m_1 < N$ ). Ο αρχικός κόμβος επιλέγεται τυχαία ενώ ο τελικός κόμβος (ο κόμβος με τον οποίο θα γίνει η σύνδεση) επιλέγεται με πιθανότητα  $Q_1(k_i)$  όπου  $Q_1(k_i)$  ορίζεται ως η πιθανότητα να επιλεγεί ο κόμβος  $i$  με βαθμό  $k_i$  (τρέχων αριθμός συνδέσεων).
- $p_2$ : Με πιθανότητα  $q$  ( $0 \leq q < 1$ ), επαναπροσδιορίζονται  $m_2$  συνδέσεις όπου ( $m_2 < m_1$ ). Επιλέγεται τυχαία ένα κόμβος  $i$ , και μία ακμή του  $l_{ij}$  που συνδέει τον  $i$  με τον  $j$ , και μεταβάλλεται το δεύτερο άκρο της ακμής από  $j$  σε  $j'$ , με τον κόμβο  $j'$  να επιλέγεται με πιθανότητα  $Q_2(k_i)$ . Η  $Q_2(k_i)$  ορίζεται ομοίως με την  $Q_1(k_i)$ .
- $p_3$ : Με πιθανότητα  $r$  ( $0 \leq r < 1$ ), διαγράφονται  $m_3$  υπάρχουσες συνδέσεις, όπου

( $m_3 < m_2$ ). Επιλέγεται ένα κόμβος  $i$  με πιθανότητα  $Q_3(k_i)$ , και απελευθερώνεται τυχαία μία από τις συνδέσεις του. Η πιθανότητα  $Q_3(k_i)$  ορίζεται ομοίως με τις  $Q_1(k_i), Q_2(k_i)$ .

- $p_4$ : Με πιθανότητα  $(1 - p - q - r)$ , δεν 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 αντιστοιχεί στον αριθμό των συνδέσεων, δηλαδή το βαθμό, του κόμβου  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ . Επομένως, η πιθανότητα να αλλάξει ο βαθμός ενός κόμβου  $i$  εξαρτάται από τον τρέχοντα βαθμό του,  $k_i$ , καθώς και τις χαρακτηριστικές τιμές:  $p, q, r, N, m_1, m_2, m_3$  του δικτύου. Δεδομένου ότι το  $k_i$  μεταβάλλεται συνεχώς, κάθε μία από τις πιθανότητες  $Q_1(k_i), Q_2(k_i)$  και  $Q_3(k_i)$  μπορεί να θεωρηθεί ως ο ρυθμός μεταβολής του  $k_i$  σύμφωνα με τις παραπάνω διαδικασίες. Για να καθοριστεί ο ρυθμός μεταβολής του  $k_i$ , είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι ρυθμοί πρόσθεσης  $r_1$ , επαναπροσδιορισμού,  $r_2$ , και αφαίρεσης  $r_3$  των συνδέσεων:

- $r_1$ : αναφέρεται στην πρόσθεση  $m_1$  νέων συνδέσεων με πιθανότητα  $p$  και υπολογίζεται βάσει του τύπου:

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{pm_1}{N} + pm_1Q_1(k_i) \quad (2.1)$$

Ο πρώτος όρος προκύπτει από την τυχαία επιλογή του αρχικού κόμβου (πιθανότητα  $\frac{1}{N}$ ) και την προσθήκη σε αυτόν  $m_1$  συνδέσεων με πιθανότητα  $p$ , και ο δεύτερος από την επιλογή του τελικού κόμβου με πιθανότητα  $Q_1(k_i)$  και την προσθήκη σε αυτόν  $m_1$  συνδέσεων με πιθανότητα  $p$ .

- $r_2$ : αναφέρεται στον επαναπροσδιορισμό  $m_2$  συνδέσεων ενός κόμβου με πιθανότητα  $q$  και υπολογίζεται βάσει του τύπου:

$$\frac{dk_i}{dt} = -\frac{qm_2}{N} + pm_2Q_2(k_i) \quad (2.2)$$

Ο πρώτος όρος προκύπτει από την τυχαία επιλογή του αρχικού κόμβου (πιθανότητα

$\frac{1}{N}$ ) και την αφαίρεση (πρόσημο -) από αυτόν  $m_2$  συνδέσεων με πιθανότητα  $q$ , ενώ ο δεύτερος, από την επιλογή του τελικού κόμβου με πιθανότητα  $Q_2(k_i)$  και την προσθήκη σε αυτόν  $m_2$  συνδέσεων με πιθανότητα  $q$ . Επομένως ο πρώτος όρος φανερώνει τη μείωση του βαθμού του κόμβου από τον οποίο αφαιρούνται συνδέσεις και ο δεύτερος την αύξηση του βαθμού του κόμβου στον οποίο προστίθεται οι συνδέσεις.

- $r_3$ : αναφέρεται στη αφαίρεση  $m_3$  υπάρχουσών συνδέσεων με πιθανότητα  $r$  και υπολογίζεται βάσει του τύπου:

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

όπου  $A_i = \sum_{\text{all } k_j, \text{links } l_{ij}} \frac{Q_3(k_j)}{k_j}$ . Το αρνητικό πρόσημο που εμφανίζεται μπροστά και από τους δύο όρους δηλώνει τη μείωση του αριθμού των συνδέσεων. Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στις συνδέσεις που διαγράφει ένας κόμβος ενώ ο δεύτερος αντιστοιχεί σε εκείνες που χάνει ένας κόμβος εξαιτίας γειτονικών του που απελευθέρωσαν έναν αριθμό συνδεσεών.

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

Ο ρυθμός μεταβολής του  $k_i$  προκύπτει αθροίζοντας τους τρεις παραπάνω όρους:

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

Οι πιθανότητες  $Q_1(k_i)$ ,  $Q_2(k_i)$  και  $Q_3(k_i)$  υπολογίζονται βάσει των τριών σεναρίων που περιγράφονται παρακάτω:

**Σενάριο 1:** Στην περίπτωση αυτή, οι νέες συνδέσεις τείνουν να προστεθούν στους κόμβους με τον υψηλότερο βαθμό, ενώ όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ενός κόμβου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να του αφαιρεθεί μία σύνδεση. Βάσει των παραπάνω προκύπτει ότι:

1. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ενός κόμβου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να αποκτήσει νέες συνδέσεις.

$$Q_1(k_i) = Q_2(k_i) = \frac{k_i + 1}{\sum_{\text{all nodes } j} (k_j + 1)} \quad (2.5)$$

2. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ενός κόμβου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να απελευθερώσει κάποιες από τις συνδέσεις του.

$$Q_3(k_i) = \frac{k_i}{\sum_{\text{all nodes } j} k_j} \quad (2.6)$$

3. Η τιμή του  $A_i$  είναι ίση την πιθανότητα  $Q_3(k_i)$ .

$$A_i = Q_3(k_i)$$

Έτσι, ο συνολικός αριθμός των συνδέσεων είναι:

$$L(t) = \frac{1}{2} \sum_{\text{all nodes } j} k_j = (pm_1 - pm_3)t \quad (2.7)$$

Σε ένα πραγματικό σύστημα για το οποίο ισχύει ότι  $k_i(1) = 0$ , δηλαδή είναι αρχικά απομονωμένο,  $k_i(t) > 0$  και  $L(t) > 0$ , από όπου τελικά προκύπτει ότι  $pm_1 > rm_3$ . Αντικαθιστώντας την (2.7) στις επιμέρους πιθανότητες και έπειτα στην (2.4), προκύπτει ο γενικός τύπος:

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{pm_1 + qm_2}{2(pm_1 - rm_3)t + N} (k_i + 1) - \frac{rm_3}{pm_1 - rm_3} \frac{1}{t} k_i + \frac{pm_1 - qm_2}{N} \quad (2.8)$$

Έχει παρατηρηθεί ότι ο μέσος βαθμός κόμβων αυξάνεται σχεδόν γραμμικά ως προς το χρόνο  $t$ , όταν ο χρόνος  $t$ , είναι πολύ μεγάλος και η αντίστοιχη μέση τιμή ισούται με  $\frac{t}{a_1}$

όπου

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

**Σενάριο 2:** Στο σενάριο αυτό, οι συνδέσεις κατανέμονται πιο ομοιόμορφα, ενώ όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ενός κόμβου τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να του αφαιρεθεί μία σύνδεση. Οι νέες συνδέσεις κατανέμονται δίκαια μεταξύ των κόμβων, με αποτέλεσμα όλοι οι κόμβοι να τείνουν στον ίδιο μέσο αριθμό συνδέσεων στη μόνιμη κατάσταση. Βάσει των παραπάνω, προκύπτει ότι:

1. Όσο μικρότερος είναι ο βαθμός ενός κόμβου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να αποκτήσει νέες συνδέσεις.

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

2. Η  $Q_3(k_i)$  προκύπτει όμοια με την (2.6).

Τελικά

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{(pm_1 + qm_2)(N + 2(pm_1 - rm_3)t)}{(k_i + 1)N^2} - \frac{rm_3}{pm_1 - rm_3} \frac{k_i}{t} + \frac{pm_1 - qm_2}{N} \quad (2.9)$$

Η αντίστοιχη μέση τιμή των κατανομών καθορίζεται από τύπο  $\frac{t}{a_1}$  όπου  $a_1 = \frac{N}{2(pm_1 - rm_3)}$ . Ωστόσο, οι μεταβλητότητες τους είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες του πρώτου σεναρίου (σενάριο 1).

**Σενάριο 3:** Στην περίπτωση αυτή, η πιθανότητα αφαίρεσης συνδέσεων εξαρτάται από την κατάσταση του δικτύου (αναφορικά με τις υπάρχουσες συνδέσεις). Επομένως, προκύπτει ότι:

1. Οι  $Q_1(k_i)$  και  $Q_2(k_i)$  προκύπτουν όμοια με την (2.5).

2. Η  $Q_3(k_i)$  είναι

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

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

Η μέση τιμή του αριθμού των συνδέσεων δίνεται από τον τύπο  $\frac{\mu}{\mu-1}$  στη μόνιμη κατάσταση αφού παρέλθει η μεταβατική περίοδος. Παρατηρήθηκε ότι η κατανομή προσεγγίζει ένα σημείο ισορροπίας (μέση τιμή 10) και πέραν αυτού δεν υφίσταται καμία αλλαγή.

#### 2.4.1.1 Επέκταση μοντέλου [15]

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μία επέκταση του αρχικού μοντέλου, την οποία εισηγήθηκαν οι Albert και Barabasi, προκειμένου να ενσωματωθούν οι παράγοντες που συμβάλλουν στον τρόπο ανάπτυξης ενός δικτύου. Η ανάλυση παρουσιάζεται παρακάτω.

Ξεκινώντας από  $m_0$  απομονωμένους κόμβους, σε κάθε χρονική στιγμή συμβαίνει μία από τις παρακάτω ενέργειες:

1. Με πιθανότητα  $p$  προστίθενται  $m < m_0$  νέες συνδέσεις. Η επιλογή του αρχικού κόμβου είναι τυχαία, και το άλλο άκρο της σύνδεσης επιλέγεται με πιθανότητα

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

όπου γίνεται εμφανές ότι οι κόμβοι τείνουν να συνδεθούν σε εκείνους με το μεγαλύτερο βαθμό (αριθμό συνδέσεων).

2. Με πιθανότητα  $q$ ,  $m$  συνδέσεις επαναπροσδιορίζονται.
3. Με πιθανότητα  $1 - p - q$ , προστίθεται ένας νέος κόμβος με  $m$  συνδέσεις προς τους κόμβους  $i$  που προϋπάρχουν στο σύστημα και πιθανότητα  $\Pi(k_i)$ .

Οι κύριες υποθέσεις είναι οι εξής:

- $0 < p < 1$  και  $0 < q < 1 - p$
- Οι απομονωμένοι κόμβοι, δηλαδή οι κόμβοι χωρίς συνδέσεις,  $k_i = 0$ , έχουν μη μηδενική πιθανότητα να αποκτήσουν νέες.
- Αν  $p = q = 0$ , το μοντέλο καταλήγει σε μοντέλο scale-free δικτύου.

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  $N$ , είναι αναγκαίο να οριστούν τα παρακάτω:

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

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

όπου  $A$  είναι ο αριθμός των συνδέσεων που προστίθενται σε κάθε κόμβο, άρα  $A = m$ .

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

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

όπου  $B$  είναι ο αριθμός των επανασυνδέσεων, άρα  $B = m$ .

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

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

όπου  $C$  είναι ο αριθμός των συνδέσεων που προστίθενται σε κάθε κόμβο, άρα  $C = m$ .



Τελικά, με άθροιση των παραπάνω προκύπτει ο ρυθμός μεταβολής του  $k_i$ :

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

Αν  $k_i(t) = m$  τη χρονική στιγμή  $t_i$  τότε:

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

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

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

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

Δεδομένου ότι πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη  $0 \leq t_i \leq t$ , η αναλυτική έκφραση που προκύπτει για τη συνάρτηση κατανομής  $P(k)$ , όταν  $0 < C < 1$  είναι:

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

$$\kappa = A + 1, \gamma = B + 1.$$

## 2.5 Έλεγχος Τοπολογίας

Τα περισσότερα ad-hoc δίκτυα αντιμετωπίζουν προβλήματα που σχετίζονται με τη συνεκτικότητά τους, την κατανάλωση ενέργειας και τον ανταγωνισμό για την πρόσβαση στο μέσο. Τα τελευταία είναι γνωστά ως το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού και του εκτεθειμένου τερματικού (ενότητα 2.1). Για τον περιορισμό των προβλημάτων αυτών, έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί, όπως η δρομολόγηση με έλεγχο ισχύος, προσεγγίσεις σε επίπεδο MAC και ο έλεγχος τοπολογίας (Topology Control-TC). Πρόκειται για μία πολλά υποσχόμενη μέθοδο καθώς είναι σε θέση να εξετάσει όλα τα προαναφερθέντα προβλήματα υπό ένα ενοποιημένο πλαίσιο. Ακόμα, αποτελεί μία δυναμική προσέγγιση εφόσον προσαρμόζει κατάλληλα την τοπολογία του ασύρματου δικτύου.

Ο έλεγχος τοπολογίας (TC) είναι ένας μηχανισμός που ελέγχει την ισχύ μετάδοσης κάθε κόμβου με σκοπό τη μετατροπή του αρχικού δικτύου - όπου κάθε κόμβος εκπέμπει με τη μέγιστη ακτίνα μετάδοσης - σε ένα βελτιωμένο δίκτυο με τις επιθυμητές ιδιότητες που αφορούν τόσο στη συνεκτικότητα όσο και στην αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων. Ο έλεγχος τοπολογίας προϋποθέτει τη συνεργασία των κόμβων προκειμένου να καθορίσουν τις ακτίνες μετάδοσής τους με κατάλληλο τρόπο κατάλληλο για την παραγωγή του επιθυμητού δικτύου. Οι κύριοι στόχοι του ελέγχου τοπολογίας (TC) είναι η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου (μέσω της καλύτερης χωρικής επαναχρησιμοποίησης) και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι το δίκτυο παραμένει συνεκτικό και είναι σε θέση να προσαρμόζεται άμεσα στις μεταβολές της τοπολογίας ή της κατάστασης του μέσου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εξής ασυμμετρία: από τη μία μεριά είναι η κατανάλωση ενέργειας και οι παρεμβολές μεταξύ των κόμβων, ενώ από την άλλη είναι η συνεκτικότητα του δικτύου. Σε ένα ντετερμινιστικό περιβάλλον διάδοσης ισχύει ότι η ισχύς μετάδοσης είναι ανάλογη προς την ακτίνα μετάδοσης και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης. Επίσης, δύο κόμβοι θεωρούνται γειτονικοί μόνο όταν ο ένας βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης του άλλου, η οποία με τη σειρά της, καθορίζεται από την ακτίνα

μετάδοσης. Από την άλλη μεριά, σε ένα πραγματικό περιβάλλον μετάδοσης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η λογαριθμοκανονική σκίαση για τον καθορισμό της γειτονιάς των κόμβων καθώς και της συνολικής κάλυψης. Άρα, στην πράξη η μείωση της ισχύος δεν αποτελεί ντετερμινιστική συνάρτηση της απόστασης και οι γείτονες ενός κόμβου ενδεχομένως να βρίσκονται ή όχι εντός της περιοχής που υπαγορεύεται από το ντετερμινιστικό μοντέλο μετάδοσης.

Ο μηχανισμός ελέγχου τοπολογίας επιβάλλει τη συνεργασία μεταξύ των κόμβων, καθώς μείωση της ακτίνας μετάδοσης ενός κόμβου (που τίθεται σε μία νέα τιμή μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή) σημαίνει διακοπή της απ' ευθείας σύνδεσης του με ορισμένους (τους μακρινότερους) από τους γείτονες του, που βρίσκονται εκτός της περιοχής κάλυψης. Έτσι, κάθε κόμβος βασίζεται στη συνεργασία του με τους εναπομείναντες ενός βήματος γείτονες του προκειμένου να εκτελέσει κάποιες από τις λειτουργίες του, ιδιαίτερα την προώθηση πακέτων δρομολόγησης. Άρα, κατά την εφαρμογή των πρωτοκόλλων ελέγχου τοπολογίας είναι αυτές οι τεχνικές συνεργασίας που 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, που συνεπάγεται ότι το δίκτυο πρέπει να σταθμίζει την καθυστέρηση διάδοσης με την αξιοποίηση ενέργειας και το υψηλό εύρος ζώνης. Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, ωστόσο, είναι ανεκτικά στις καθυστερήσεις και μπορούν να εξισορροπήσουν αυτή την ασυμμετρία.

Ο έλεγχος τοπολογίας αποτελεί μία διαστρωματική προσέγγιση, που λειτουργεί στην τομή του φυσικού στρώματος με το στρώμα δικτύου. Οι αποφάσεις του ελέγχου τοπολογίας προέρχονται με ανατροφοδότηση από το στρώμα MAC και επιδρούν στα πρωτόκολλα δρομολόγησης, και το αντίστροφο.

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί ελέγχου τοπολογίας που ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες ανάλογα με το περιβάλλον, τη χρησιμοποιούμενη πληροφορία ή το στρώμα της στοίβας πρωτοκόλλων (Πίνακας 2.9).

Πίνακας 2.9: Κατηγορίες πρωτοκόλλων ελέγχου τοπολογίας

<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ</b>	
Ομογενές	Η μέγιστη ισχύς μετάδοσης είναι ίδια για κάθε κόμβο
Ετερογενές	Η μέγιστη ισχύς μετάδοσης είναι διαφορετική για κάθε κόμβο
<b>ΓΝΩΣΤΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ</b>	
Κεντροποιημένο	Η τελική τοπολογία και ο παραγόμενος γράφος καθορίζεται από έναν μόνο κόμβο, που είναι μοναδικός
Κατανεμημένο	Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί τοπική πληροφορία
<b>ΣΤΡΩΜΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ</b>	
Στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC)	Ανάλογα με το στρώμα που λειτουργεί το καθένα
Στρώμα δικτύου	

# Κεφάλαιο 3

## Μοντέλο Μεταβολής

## Αυτοργανούμενων Δικτύων

### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε ένα μοντέλο βασισμένο στη Θεωρία Συνέχειας (Continuum Theory) που περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 2.4.1. Οι παραδοχές που γίνονται κατά την ανάπτυξη της Θεωρίας Συνέχειας έχουν μεγάλη συνάφεια με τις ιδιότητες των δικτύων αισθητήρων με αποτέλεσμα οι απαραίτητες τροποποιήσεις να αφορούν μόνο στις διαδικασίες της πρόσθεσης, της τροποποίησης και της διαγραφής των συνδέσεων. Με άλλα λόγια, η Θεωρία Συνέχειας που μελετάται στην εργασία των Zhu και Papavassiliou 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 αισθητήρων, καθώς προσδίδονται σε αυτό ιδιότητες δικτύων τύπου ‘small-world’. Όλες οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα αποσκοπούν στη σταδιακή μετατροπή του αρχικού δικτύου σε ένα διαφορετικού τύπου δίκτυο, το οποίο αφενός θα παραμένει δομικά

ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, αλλά αφετέρου θα παρουσιάζει χαρακτηριστικά που το διαφοροποιούν από την πλειοψηφία των δικτύων αισθητήρων.

Σκοπός είναι η μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού, δηλαδή της απόστασης μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων (σε βήματα-hops), διατηρώντας ταυτόχρονα τον παράγοντα ομαδοποίησης σε υψηλά επίπεδα όπως αυτό υπαγορεύεται από την φύση ενός δικτύου αισθητήρων, όπου κάθε κόμβος επικοινωνεί με όλους τους κόμβους που βρίσκονται εντός μιας περιοχής με συγκεκριμένη ακτίνα μετάδοσης. Η ανάγκη μείωσης του μέσου μήκους μονοπατιού προκύπτει από την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας. Το αρχικό μοντέλο του δικτύου αισθητήρων μπορεί να προσομοιωθεί με έναν τυχαίο γεωμετρικό γράφο όπου κάθε κόμβος συνδέεται με όλους τους κόμβους-γείτονες σε μία συγκεκριμένη χωρική περιοχή (που καθορίζεται με συγκεκριμένη ακτίνα μετάδοσης). Η παραγωγή ενός τυχαίου γεωμετρικού γράφου (με παραμέτρους  $N, R$ ) συνίσταται στην ομοιόμορφη διασπορά  $N$  κόμβων στην περιοχή δικτύου και την προσθήκη συνδέσεων μεταξύ τους μόνο εφόσον απέχουν απόσταση μικρότερη ή ίση με  $R$ . Η μοντελοποίηση των δικτύων κατά αυτό τον τρόπο είναι πιο ρεαλιστική σε σύγκριση με τη μοντελοποίηση Erdős-Rényi με τυχαίο γράφο για την περίπτωση δικτύων αισθητήρων και ad-hoc. Οι τυχαίοι γεωμετρικοί γράφοι, από τη μία πλευρά παρουσιάζουν υψηλό βαθμό ομαδοποίησης εξαιτίας της ομογένειας όσον αφορά την ακτίνα μετάδοσης, ενώ από την άλλη το μέσο μήκος μονοπατιού έχει μεγάλη τιμή, ειδικά όταν η ακτίνα μετάδοσης είναι μικρή.

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

- Πρώτον, η ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου δεν μπορεί να αυξάνεται απεριόριστα εξαιτίας της περιορισμένης διαθέσιμης ενέργειας και της αύξησης παρεμβολής που

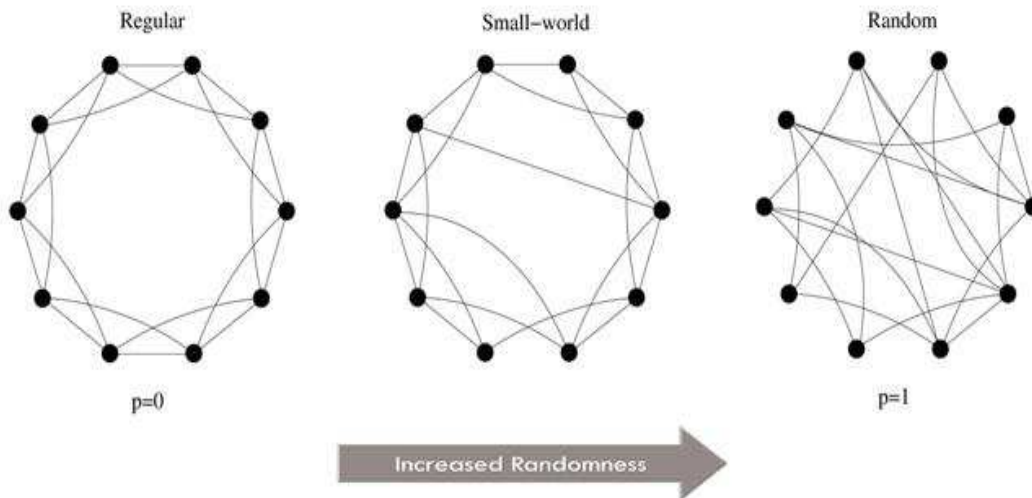
θα προκαλούσε. Για το σκοπό αυτό, υποτίθεται ένας μηχανισμός TC που ρυθμίζει κατάλληλα την ακτίνα κάθε κόμβου.

- Δεύτερον, το δίκτυο οφείλει να παραμένει συνεκτικό σε κάθε χρονική στιγμή ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση απομονωμένων κόμβων, που είναι αδύνατο να επικοινωνήσουν με το υπόλοιπο δίκτυο. Εδώ υπεισέρχεται ξανά η έννοια του ελέγχου τοπολογίας (ενότητα 2.5) που εξασφαλίζει την ισορροπία ανάμεσα στη συνεκτικότητα και την κατανάλωση ενέργειας διατηρώντας τις τιμές της ακτίνας όσον το δυνατόν μικρότερες.
- Τρίτον, η γειτονιά κάθε κόμβου αποτελείται κατ' ανάγκη από όλους τους κόμβους που βρίσκονται εντός της εμβέλειας του πρώτου, και δεν υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του κόμβου επικοινωνίας. Ωστόσο, η αποκοπή της σύνδεσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ανώτερα στρώματα (επίπεδο δρομολόγησης), είτε γιατί ο κόμβος-προορισμός δεν είναι διαθέσιμος, αν έχει απενεργοποιηθεί για παράδειγμα, ή αν η σύνδεση δεν είναι αμοιβαία καθώς δεχόμαστε την ύπαρξη τόσο αμφίδρομων, όσο και μονόδρομων συνδέσεων. Στη δεύτερη περίπτωση είναι δυνατόν να σταλούν δεδομένα προς τον κόμβο-γείτονα χωρίς όμως να παρέχεται η δυνατότητα λήψης πληροφοριών από το συγκεκριμένο κόμβο.

### 3.2 Σενάριο Μεταβολής Δικτύου

Το σενάριο που περιγράφεται στη συνέχεια αποσκοπεί στην τροποποίηση ενός δικτύου αισθητήρων με στόχο τη μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού και ταυτόχρονα τη διατήρηση του παράγοντα ομαδοποίησης σε υψηλά επίπεδα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι διαδικασίες που περιγράφονται στην ανάλυση τείνουν να μεταβάλλουν τις βασικές ιδιότητες του αρχικού δικτύου, επομένως και τη συμπεριφορά του με τέτοιο τρόπο, ώστε το τροποποιημένο δίκτυο να αποκτήσει χαρακτηριστικά όμοια με εκείνα των small-world δικτύων,

χωρίς όμως να αλλοιώνεται ο βασικός χαρακτήρας του ad-hoc δικτύου. Θεωρώντας τα δίκτυα που φαίνονται στο Σχήμα 3.1 κατά αύξοντα βαθμό τυχειότητας, επισημαίνουμε ότι το δίκτυο που εξετάζεται βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ των κανονικών γράφων και των small-world δικτύων, με μεγαλύτερη απόκλιση από τα τελευταία. Στόχος είναι η μείωση αυτής της απόκλισης ώστε το προκύπτον δίκτυο να προσεγγίσει περισσότερο τη μεσαία κατηγορία, με την προϋπόθεση ότι δεν θα υπάρχει πλήρης ταύτιση.



Σχήμα 3.1: Δίκτυα με αυξανόμενο βαθμό τυχειότητας

Η βασική ιδέα στηρίζεται στην τροποποίηση της ακτίνας μετάδοσης ορισμένων κόμβων του δικτύου. Η προσοχή εστιάζεται στον τρόπο που επιλέγονται οι συγκεκριμένοι κόμβοι των οποίων η περιοχή κάλυψης αλλάζει, και συγκεκριμένα αυξάνεται δεδομένου ότι ο στόχος είναι η μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού. Η μείωση αυτή επέρχεται μέσω της δημιουργίας συντομεύσεων (shortcuts), δηλαδή νέων συνδέσεων μεταξύ κόμβων που προηγουμένως δεν επικοινωνούσαν μεταξύ τους. Ωστόσο, οι συντομεύσεις αυτές έχουν τοπικό χαρακτήρα, δηλαδή προϋποθέτουν την ύπαρξη ενός κόμβου στην εμβέλεια ενός άλλου, του οποίου η ακτίνα έχει μεν υποστεί αύξηση, παραμένοντας δε εντός των επιτρεπτών ορίων. Δηλαδή, η ακτίνα δεν είναι δυνατόν να αυξηθεί σε βαθμό που να επιτρέπει τη σύνδεση με-



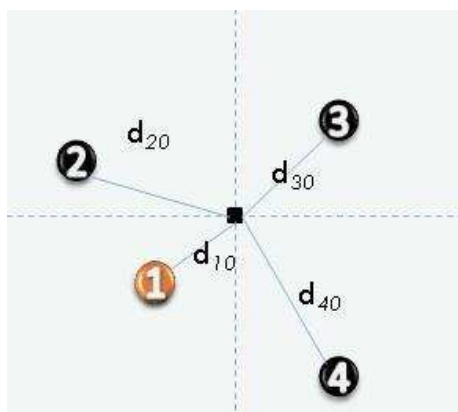
### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΑΥΤΟΡΓΑΝΟΥΜΕΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 50

ταξύ δύο οποιονδήποτε κόμβων, ακόμα και των εξαιρετικά απομακρυσμένων, καθώς κάτι τέτοιο θα αλλοίωνε το χαρακτήρα ενός δικτύου αισθητήρων. Η περιοχή εντός της οποίας μπορεί να επικοινωνήσει ένας κόμβος με τους γείτονες του δεν είναι πλέον η ίδια για οποιονδήποτε κόμβο του δικτύου. Καθώς αυξάνεται ανομοιόμορφα η ακτίνα μετάδοσης ορισμένων κόμβων σχηματίζονται κυκλικοί δίσκοι διαφορετικού εμβαδού που αντιπροσωπεύουν την περιοχή κάλυψης κάθε κόμβου. Ο χωρισμός τους σε επιμέρους δακτυλίους αποτελεί καίριο τμήμα της ανάλυσης δεδομένου ότι η χωρική κατανομή των κόμβων στις περιοχές αυτές είναι ομοιόμορφη και ο μέσος αριθμός τους είναι δυνατόν να υπολογιστεί ντετερμινιστικά. Στην ανάλυση, υπεισέρχεται και μία πιθανοτική προσέγγιση σχετικά με την προσθήκη ή όχι συνδέσεων για τους κόμβους εντός των επιπρόσθετων δακτυλίων που σχηματίζονται γύρω από τον επιλεγθέντα κόμβο.

Πιο αναλυτικά, σε κάθε βήμα της προσομοίωσης αυξάνεται η ακτίνα μετάδοσης κατά 5 έως 10 %. Αφού επιλεγεί ένας αριθμός κόμβων, που αποτελεί κλάσμα της τάξης του  $1/10$  του συνολικού αριθμού των κόμβων, με κριτήρια που περιγράφονται παρακάτω, η ακτίνα μετάδοσης των συγκεκριμένων κόμβων μεγαλώνει και η περιοχή κάλυψης προσαυξάνεται με το σχηματισμό ενός δακτυλίου που εκτείνεται από την αρχική ακτίνα  $R_0$  έως την  $R(t)$ , που αντιστοιχεί στην τρέχουσα τιμή της. Εμφανίζονται έτσι περισσότεροι κόμβοι εντός της εμβέλειας των κόμβων που έχουν επιλεγεί με αποτέλεσμα τη δυνατότητα δημιουργίας νέων συνδέσεων μεταξύ τους. Καθώς η ενέργεια που απαιτείται, προκειμένου να καταστεί δυνατή η επικοινωνία με τους μακρινότερους κόμβους, είναι μεγαλύτερη και η διαθεσιμότητα ενεργειακών πόρων περιορισμένη, οι νέες συνδέσεις γίνονται αποδεκτές με μια πιθανότητα  $p$ . Επιπρόσθετα, οι συνδέσεις είναι μονόδρομες καθώς σε διαφορετική περίπτωση θα ήταν απαραίτητο να τροποποιηθούν οι ακτίνες μετάδοσης όλων των νέων κόμβων που επικοινωνούν με τους επιλεγμένους, λύση που αφενός είναι ασύμφορη, και αφετέρου υποβαθμίζει την εφαρμοσιμότητα του μοντέλου στις περιπτώσεις των δικτύων αισθητήρων. Η προσέγγιση αυτή θα απαιτούσε τη χρήση εναλλακτικών τεχνικών, όπως

για παράδειγμα τη χρήση κατευθυντικών κεραιών ώστε οι νέοι κόμβοι να επικοινωνούν μόνο με τους επιλεγμένους εντός της νέας ακτίνας μετάδοσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι το μοντέλο είναι ρεαλιστικό όταν πρόκειται για διαφορετικού τύπου δίκτυα, όπου η δημιουργία αμφίδρομης σύνδεσης είναι επιθυμητή ως και απαραίτητη. Σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο, για παράδειγμα, η κατασκευή μιας νέας γραμμής προς μία μόνο κατεύθυνση δε θα είχε νόημα, καθώς θα εξυπηρετούσε αποκλειστικά τους επιβάτες ενός μόνο προορισμού και ένα μικρό ποσοστό των επιβατών για όσες διαδρομές απαιτούσαν λιγότερο χρόνο μέσω της νέας γραμμής.

**Κριτήρια επιλογής:** Η επιλογή των κόμβων των οποίων η ακτίνα μετάδοσης πρόκειται να αυξηθεί σε κάθε βήμα γίνεται ως εξής: Ο πρώτος κόμβος επιλέγεται βάσει της απόστασης του από το τοπολογικό κέντρο του δικτύου και είναι ο κοντινότερος σε αυτό.



Σχήμα 3.2: Επιλογή αρχικού κόμβου

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ένα πυκνό δίκτυο με τοπολογικό κέντρο το σημείο που σημειώνεται με ένα τετράγωνο. Υπολογίζοντας τις αποστάσεις όλων των κόμβων από το κέντρο προκύπτει ότι πιο κοντά βρίσκεται ο κόμβος με αριθμό 1, αρά αυτός επιλέγεται τελικά. Κάθε κόμβος που επιλέγεται δεν μπορεί να επιλεγεί ξανά σε επόμενο βήμα. Η ακτίνα του συγκεκριμένου κόμβου αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι γείτονες του σε απόσταση ενός βήματος, δηλαδή οι κόμβοι με τους οποίους συνδέεται άμεσα. Η σύνδεση είναι μονό-

δρομη με κατεύθυνση από τον κόμβο που έχει επιλεγεί προς τους κόμβους στην εμβέλεια του. Στη συνέχεια, επιλέγονται με πιθανότητα  $p$ , ορισμένοι από τους νέους γείτονές του, των οποίων η ακτίνα επίσης αυξάνεται προκειμένου, αφενός να δημιουργηθεί αμφίδρομη σύνδεση με τον προηγούμενο και αφετέρου να προστεθούν νέες συνδέσεις των κόμβων

αυτών με τους γειτονικούς τους, με τη γειτονιά να καθορίζεται πλέον από τη νέα ακτίνα μετάδοσης. Ο τρόπος δημιουργίας των νέων μονόδρομων συνδέσεων καθορίζεται ντετερμινιστικά καθώς πρόκειται για όλες τις δυνατές ακμές εντός της νέας εμβέλειας του κόμβου και θεωρείται δεδομένο ότι η τοπολογία του δικτύου δεν μεταβάλλεται. Η παραδοχή αυτή αιτιολογείται δεδομένου ότι οι αλλαγές συμβαίνουν εντός μικρών χρονικών διαστημάτων.

### 3.3 Ανάλυση

Το ακόλουθο μοντέλο περιγράφει τις διαφορετικές διαδικασίες καθώς και την επίδραση της κάθε μίας στη συνολική συμπεριφορά του δικτύου κατά την εξέλιξή του. Θεωρούμε ότι οι κόμβοι είναι ακίνητοι και ο αριθμός τους παραμένει σταθερός σε ένα στιγμιότυπο ανάλυσης και ίσος με  $N$ . Αρχικά, το δίκτυο είναι ομογενές καθώς όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια ακτίνα μετάδοσης. Σε κάθε χρονική στιγμή συμβαίνει ένα από τα παρακάτω:

- Διαδικασία  $p_1$ . Περιγράφεται από τον παρακάτω αλγόριθμο:
  1. Επιλέγεται ένας κόμβος με πιθανότητα  $Q_1$  (όπου  $Q_1$  η πιθανότητα να επιλεγεί ο κόμβος  $i$ ).
  2. Προστίθενται  $m_1(R)$ , ( $m_1 < N$ ) νέες συνδέσεις στον κόμβο αυτό. Η επιλογή του άλλου άκρου κάθε σύνδεσης είναι καθορισμένη από τη γειτονιά του κόμβου που έχει επιλεγεί στο βήμα 1. Η σύνδεση είναι μονόδρομη.
  3. Επιλέγεται ένας δεύτερος κόμβος με πιθανότητα  $Q_2$  που είναι διαφορετικός από τον κόμβο που επιλέχθηκε στο βήμα 1.
  4. Με πιθανότητα  $p$  ( $0 \leq p < 1$ ), προστίθενται  $m_1(R)$ , ( $m_1 < N$ ) νέες συνδέσεις στον παραπάνω κόμβο, με το άλλο άκρο να καθορίζεται ντετερμινιστικά όπως και στο βήμα 2.
  5. Αν υπάρχουν γείτονες, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 3, αλλιώς τερματίζει.

- Διαδικασία  $p_2$ . Δε συμβαίνει καμία αλλαγή.

Η προσθήκη νέων συνδέσεων οδηγεί σε ένα ετερογενές δίκτυο καθώς η ακτίνα δεν αυξάνεται ομοιόμορφα για όλους τους κόμβους αλλά επιλεκτικά βάσει των κριτηρίων επιλογής που περιγράφονται παραπάνω.

Η πιθανότητα  $Q_1(\vec{r}_i)$  είναι η πιθανότητα να επιλεγεί ένας κόμβος που βρίσκεται στη θέση που περιγράφεται από το διάνυσμα  $\vec{r}_i = (x_i, y_i)$  του χώρου. Κατά συνέπεια, η πιθανότητα ενός κόμβου να μεταβάλλει τον αριθμό των συνδέσεών του εξαρτάται από τη θέση του σε σχέση με τον προηγούμενο επιλεχθέντα κόμβο αλλά και τις υπόλοιπες παραμέτρους του δικτύου:  $N, m_1(R)$ . Δεδομένου ότι ο συνολικός αριθμός  $k$  των συνδέσεων του δικτύου αλλάζει συνεχώς λόγω προσθήκης συνδέσεων σε κάθε βήμα, οφείλουμε να καθορίσουμε το ρυθμό μεταβολής του βαθμού του κόμβου  $i$ ,  $k_i$ , ξεκινώντας με τον ορισμό του ρυθμού εισαγωγής  $r_1$ :

- $r_1$ : αναφέρεται στην πρόσθεση  $m_1(R)$ , νέων συνδέσεων και εκφράζεται ως

$$\frac{dk_i}{dt} = m_1(R)Q_1(\vec{r}_i) + pm_1(R)Q_2(\vec{r}_i). \quad (3.1)$$

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

Οι επιμέρους πιθανότητες υπολογίζονται ως εξής:

1. Η πιθανότητα να επιλεγεί ο πρώτος κόμβος εξαρτάται από την απόστασή του από το τοπολογικό κέντρο του δικτύου, έστω  $\vec{r}_0 = (\frac{L}{2}, \frac{L}{2})$ , κι επομένως είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασής του από αυτό. Εδώ στον παρονομαστή συνυπολογίζονται όλοι οι κόμβοι του δικτύου.

$$Q_1(\vec{r}_i) = \frac{\frac{1}{d_{i_0}}}{\sum_{\text{all nodes } j} \frac{1}{d_{j_0}}} \quad (3.2)$$

$$d_{i_0} = \| \vec{r}_i - \vec{r}_0 \| \quad (3.3)$$

2. Η πιθανότητα να επιλεγεί ένας επόμενος κόμβος εξαρτάται από την απόστασή του από τον κόμβο που επιλέχθηκε προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα ο κόμβος αυτός θα πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή του δακτυλίου που ορίζουν η τρέχουσα ακτίνα  $R(t)$  και η αρχική  $R_0$  γύρω από τον προηγούμενο κόμβο, έστω  $j$ . Επίσης, αντί να θεωρείται μηδενική η πιθανότητα επιλογής άλλων κόμβων εκτός της καθορισμένης εμβέλειας, υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η πιθανότητα να επιλεγούν κόμβοι που δεν είναι γείτονες να παίρνει πολύ μικρές τιμές, πολύ κοντά στο μηδέν. Έτσι, η ανάλυση γίνεται πιο καθολική. Πρέπει ουσιαστικά να ισχύει  $R_0 < d_{ij} = \|\vec{r}_i - \vec{r}_j\| \leq R$  το οποίο λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

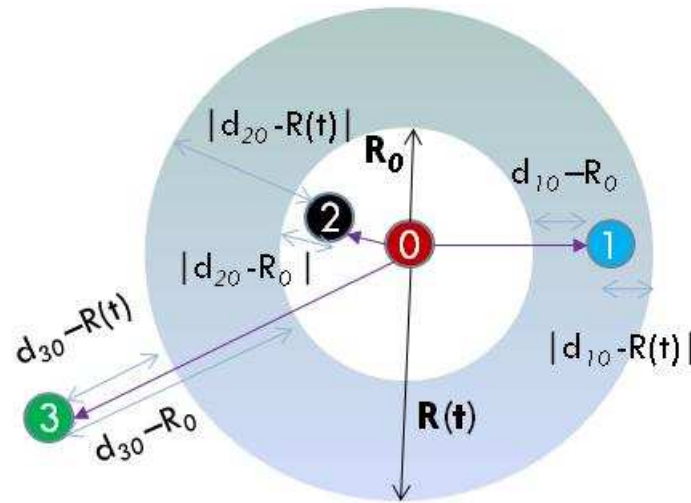
$$Q_2(\vec{r}_i) = \begin{cases} \frac{\frac{1}{|2d_{ij} - R_0 - R(t)|}}{\sum_{\text{all nodes } k} \frac{1}{|2d_{kj} - R_0 - R(t)|}} & d_{ij} \leq L\sqrt{2} \\ 0 & d_{ij} > L\sqrt{2}. \end{cases} \quad (3.4)$$

όπου

$$d_{ij} = \|\vec{r}_i - \vec{r}_j\|.$$

Ο παραπάνω τύπος για την πιθανότητα αυτή υπολογίζεται βάσει του αθροίσματος δύο διαφορών:  $d_{k0} - R_0$  και  $d_{k0} - R(t)$  κατά απόλυτο τιμή. Η ελάχιστη τιμή του αθροίσματος προκύπτει για τους κόμβους εντός του δακτυλίου, για τους οποίους ισχύει  $R_0 < d_{k0} < R(t)$ , όπου οι διαφορές έχουν αντίθετα πρόσημα όπως συμβαίνει για τον κόμβο 1 (Σχ.3.3). Για τον κόμβο 2, οι δύο διαφορές είναι ομόσημες (και αρνητικές) με αποτέλεσμα η απόλυτη τιμή του αθροίσματος να προκύπτει μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του κόμβου 1. Το ίδιο ισχύει και για τον κόμβο 3, όπου οι διαφορές είναι ομόσημες και θετικές.

Ωστόσο, για να απλοποιηθεί η ανάλυση, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εφόσον ο αρχικός κόμβος που επιλέγεται σε κάθε βήμα βρίσκεται κοντά στο κέντρο του δι-

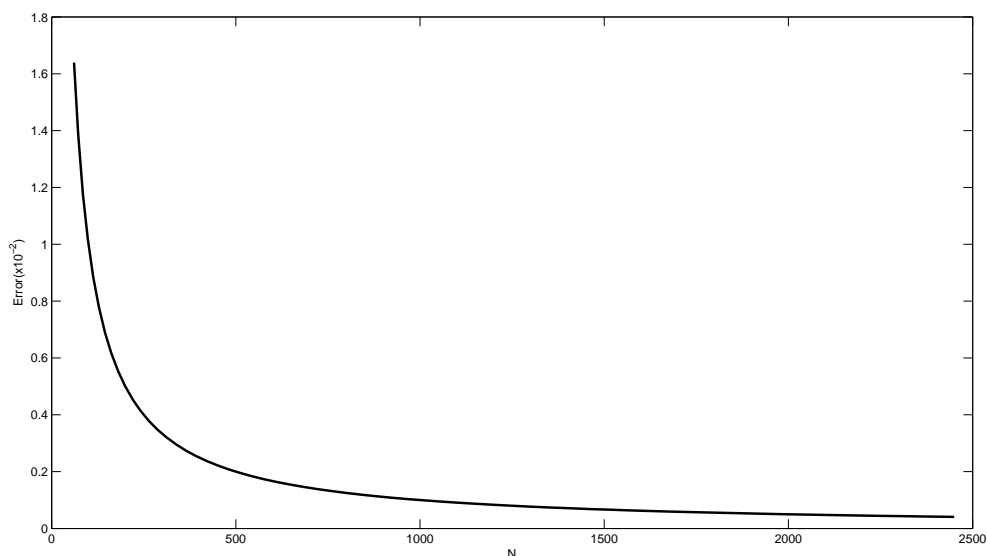


Σχήμα 3.3: Επιλογή κόμβου σε δεύτερο επίπεδο

κτύου, η θέση του θα περιγράφεται από ένα διάνυσμα με συντεταγμένες κοντά στο  $\vec{r}_0 = (\frac{L}{2}, \frac{L}{2})$ . Άρα αντί να θεωρούμε γνωστή τη θέση του προηγούμενα επιλεχθέντος κόμβου  $j$  στην εξ. 3.4, κάνουμε την προσέγγιση ότι  $\vec{r}_j \approx \vec{r}_0 = (\frac{L}{2}, \frac{L}{2})$ . Άρα αρκεί να υπολογιστούν οι αποστάσεις των κόμβων από το  $\vec{r}_0$ . Τελικά, προκύπτει:

$$Q_2(\vec{r}_i) = \frac{1}{\sum_{\text{all nodes } k} \frac{|2d_{i0} - R_0 - R(t)|}{|2d_{k0} - R_0 - R(t)|}} \quad (3.5)$$

Προκειμένου να γίνει έλεγχος εγκυρότητας όσον αφορά τον παραπάνω προσεγγιστικό τύπο, υπολογίσαμε τις δύο τιμές της πιθανότητας προσομοιώνοντας δίκτυα σταθερής πυκνότητας και υπολογίζοντας τις μέσες τιμές των σφάλματων. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται ο τρόπος μεταβολής του μέσου σφάλματος συναρτήσει του αριθμού των κόμβων. Οι διαστάσεις της περιοχής του δικτύου δεν παραμένουν σταθερές αλλά μεταβάλλονται με τρόπο ώστε ο λόγος  $\frac{\text{αριθμος κομβων}(N)}{\text{εμβαδο περιοχης}(L^2)}$ , που αντιστοιχεί σε πυκνότητα, να παραμένει σταθερός και ίσος με  $2/10^4$  κόμβοι/ $m^2$ . Η καμπύλη του σφάλματος έχει εκθετική μορφή και τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν. Με άλλα λόγια,



Σχήμα 3.4: Μέση τιμή σφάλματος συναρτήσει του αριθμού των κόμβων

η μέση τιμή του σφάλματος μειώνεται ραγδαία στην αρχή ενώ στη συνέχεια εξακολουθεί να μειώνεται με ολοένα και πιο αργό ρυθμό προσεγγίζοντας το μηδέν, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων. Δηλαδή, όσο πιο μεγάλο είναι το δίκτυο τόσο περισσότερο συμφωνούν οι προσεγγιστικές τιμές με τις πραγματικές. Ωστόσο, για την περίπτωση των μεγάλων, ρεαλιστικών δικτύων, η προσέγγιση παραμένει εφικτή. Αυτό πρακτικά, σημαίνει ότι η προσέγγιση μπορεί να γίνει αποδεκτή για τα δίκτυα που πρόκειται να εξεταστούν παρακάτω. Η προσομοίωση αφορά δίκτυα πυκνότητας 2 κόμβων ανά  $10.000m^2$  και αριθμούς κόμβων από 50 έως 2500 για περιοχές από 0.25 ως  $16 km^2$  αντίστοιχα. Η περιοχή που εξετάζεται είναι  $4 km^2$ , όπου το σφάλμα είναι της τάξης του 0.1%. Οι τιμές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα προήλθαν από το μέσο όρο 1000 διαφορετικών τοπολογιών με τον ίδιο αριθμό κόμβων σε ίδια περιοχή προκειμένου να επιτευχθεί σύγκλιση.

3. Η συνολική πιθανότητα να επιλεγεί ένας κόμβος σε κάθε αλλαγή της ακτίνας (βήμα

του αλγορίθμου) καθορίζεται από δύο αμοιβαίως αποκλειόμενα ενδεχόμενα: το ενδεχόμενο να επιλεγεί ως πρώτος και το ενδεχόμενο να επιλεγεί ως επόμενος, γείτονας του πρώτου, με πιθανότητα  $p$ . Η ένωση των δύο παραπάνω συνόλων οδηγεί στην συνολική πιθανότητα:

$$Q(\vec{r}_i) = Q_1(\vec{r}_i) + pQ_2(\vec{r}_i) \quad (3.6)$$

Είναι γνωστό ότι ο συνολικός αριθμός των συνδέσεων είναι:

$$|E|_t = \frac{1}{2} \sum_{\text{all nodes } i} k_i \quad (3.7)$$

Όλα τα παραπάνω συμβαίνουν για μία τιμή της ακτίνας, σε μία χρονική στιγμή  $t$ . Έτσι σε κάθε βήμα ο αριθμός των συνδέσεων που προστίθενται καθορίζεται αυστηρά από την τοπολογία. Στην επόμενη χρονική στιγμή, η ακτίνα αυξάνεται με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται τόσο ο αριθμός των συνδέσεων όσο και η επιλογή των κόμβων. Εδώ σημειώνεται ότι η τεχνική επιλογής του κεντρικού κόμβου δημιουργεί την λανθασμένη εντύπωση ότι πρόκειται για τον ίδιο κόμβο κάθε φορά. Ωστόσο, στα πραγματικά δίκτυα, ο πιο κεντρικός κόμβος θα μπορούσε να είναι διαφορετικός σε κάθε χρονική στιγμή, εξαιτίας της κινητικότητας του δικτύου ή της κατάρρευσης του κόμβου που είχε επιλεγεί στο προηγούμενο βήμα. Η προσομοίωση του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα της ανάλυσης καθώς αυτό που μας απασχολεί είναι η συμπεριφορά του δικτύου στη μόνιμη κατάσταση και όχι οι μικρές μεταβολές που συμβαίνουν καθώς αυτό οργανώνεται και εξελίσσεται.

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού των συνδέσεων που προστίθενται ως συνάρτηση του χρόνου και της ακτίνας. Υποθέτουμε ομοιόμορφη κατανομή των κόμβων στην περιοχή του δικτύου με αποτέλεσμα ο αριθμός των κόμβων εντός κυκλικού δίσκου



με ακτίνα  $R(t)$  να δίνεται από τη σχέση:

$$m_1(t) = \frac{\pi R^2(t)}{L^2} N$$

Εφόσον αρχικά το δίκτυο είναι ομογενές με μία συγκεκριμένη ακτίνα  $R_0$ , στο πρώτο βήμα ο αριθμός των συνδέσεων που πρόκειται να προστεθούν (και δεν υπάρχουν ήδη) προκύπτει από τον κυκλικό δακτύλιο με ακτίνα από  $R_0$  έως  $R(t)$  και ισούται με:

$$\pi \frac{R^2(t) - R_0^2}{L^2} N \quad (3.8)$$

Στις επαναλήψεις που έπονται, η επιλογή του επόμενου κόμβου εξαρτάται από τη θέση του σε σχέση με τον προηγούμενο αλλά δεν διαφοροποιείται ως προς τον αριθμό των νέων συνδέσεων, με αποτέλεσμα ο αριθμός των συνδέσεων που προστίθενται σε αυτόν να προκύπτει όπως στην εξ. (3.8).

Όμως παρόλο που ο πρώτος κόμβος επιλέγεται πάντα, δηλαδή με πιθανότητα 1, οι επόμενοι, που βρίσκονται εντός του κυκλικού δακτυλίου που ορίζεται από την ακτίνα  $R_0$  έως την  $R(t)$ , επιλέγονται με μία πιθανότητα  $p$ . Δηλαδή, ο συνολικός αριθμός συνδέσεων που προστίθενται με κάθε αύξηση της ακτίνας είναι ίσος με το βαθμό του κόμβου που επιλέχθηκε στο αρχικό στάδιο, και ισούται με το πλήθος των κόμβων εντός του κυκλικού δακτυλίου όπως περιγράφηκε προηγουμένως, δηλαδή  $m_1$ , συν το πλήθος των συνδέσεων που προστίθενται σε όσους γείτονες επιλέγονται, που ισούται με  $m_1 \times n_2$ , όπου  $n_2$  είναι ο αριθμός των γειτόνων που επιλέγονται. Εφόσον ο κόμβος που επιλέγεται αρχικά έχει  $m_1$  νέους γείτονες, εκ των οποίων επιλέγονται κάποιοι με πιθανότητα  $p$ , ο αριθμός τους τελικά είναι  $m_1 \times p$ . Δηλαδή:

$$\begin{aligned} |E|_t &= m_1(t) + pm_1(t)m_1(t) \\ &= m_1(t) + pm_1(t)^2 \end{aligned}$$

Ο ρυθμός μεταβολής των συνδέσεων κάθε κόμβου ορίζεται ως εξής:

$$\frac{dk_i}{dt} = m_1(t)Q(\vec{r}_i) \quad (3.9)$$

όπου η πιθανότητα  $Q(\vec{r}_i)$  δίνεται από την εξ. (3.6).

Αυτό που απομένει είναι να καθορίσουμε τον τρόπο που επηρεάζουν οι ανωτέρω τροποποιήσεις τις παραμέτρους του δικτύου, δηλαδή το μέσο μήκος μονοπατιού και τον πα-  
ραγοντα ομαδοποίησης.

### 3.3.1 Υπολογισμός μέσου μήκους μονοπατιού

Θεωρώντας μία δισδιάστατη περιοχή, με άπειρη έκταση, ισχύει ότι η πιθανότητα να βρεθούν  $k$  κόμβοι σε μία περιοχή εμβαδού  $S$  ακολουθεί την κατανομή Poisson με παράμετρο  $\lambda = \rho S$ , όπου  $\rho = \frac{N}{L^2}$ . Έτσι:

$$p(k, S) = \frac{(\rho S)^k}{k!} e^{-\rho S} \quad (3.10)$$

Το μέσο μήκος μονοπατιού προκύπτει από το μέσο όρο των συντομότερων διαδρομών μεταξύ όλων των κόμβων του δικτύου. Προκειμένου να εξαχθεί αναλυτικός τύπος έχουν γίνει διάφορες προσεγγίσεις, μία εκ των οποίων συνίσταται στον υπολογισμό του αριθμού των γειτόνων δύο βημάτων και περιγράφεται αναλυτικά στο μοντέλο που παρουσίασαν οι Watts και Strogatz [18]. Από την ανάλυση προκύπτει ότι το μέσο μήκος μονοπατιού δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{\log(N/z_1)}{\log(z_2/z_1)} + 1 \quad (3.11)$$

όπου  $z_1$  είναι ο αριθμός των γειτόνων ενός βήματος, που ισούται με το μέσο βαθμό κόμβων, και  $z_2$  είναι ο αριθμός των γειτόνων δύο βημάτων, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής: Προκειμένου δύο κόμβοι να απέχουν δύο βήματα μεταξύ τους, θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας κόμβος στην κοινή περιοχή κάλυψης και η απόσταση τους να έχει τιμή

εντός του διαστήματος  $[R, 2R]$ . Έχει αποδειχτεί, με χρήση γεωμετρίας, ότι ο αριθμός τους προκύπτει από το ολοκλήρωμα:

$$z_2 = \frac{\pi R^2}{L^2} N \int_1^2 2t * (1 - e^{-B(t)}) dt. \quad (3.12)$$

όπου

$$B(t) = 2 \frac{R^2}{L^2} N a(t); \quad a(t) = \arccos \frac{t}{2} - \frac{t}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{t}{2}\right)^2}.$$

Γίνεται σαφές ότι τα παραπάνω ισχύουν σε ένα ομογενές δίκτυο. Κάθε φορά όμως που αυξάνεται η ακτίνα ενός κόμβου αφενός μεταβάλλεται ο μέσος βαθμός κόμβου και αφετέρου ο μέσος αριθμός των γειτόνων δύο βημάτων.

Ο υπολογισμός του μέσου αριθμού των κόμβων που απέχουν ένα βήμα προκύπτει αναλυτικά μέσω του ρυθμού μεταβολής των συνδέσεων εξ. (3.9). Εφόσον έχει υποτεθεί ότι σε κάθε βήμα προστίθενται  $m_1(R(t))$  συνδέσεις, κατά μέσο όρο, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι

$$z_1(t) = z_1(0) + \frac{[1 + pm_1(R(t))]m_1(R(t))}{N} t$$

Όσον αφορά τον αριθμό των γειτόνων δύο βημάτων, μπορεί να υπολογιστεί με την εξής προσέγγιση: Σε κάθε βήμα υπολογίζουμε τους γείτονες δεύτερου βαθμού ακριβώς όπως πριν θεωρώντας το δίκτυο ομογενές με ακτίνα  $R(t)$ . Αυτός θα είναι ο μέσος αριθμός γειτόνων δύο βημάτων για τους τροποποιημένους κόμβους. Για τους υπόλοιπους, ο αριθμός γειτόνων δύο βημάτων δεν θα μεταβληθεί.

### 3.3.2 Υπολογισμός παράγοντα ομαδοποίησης

Ο παράγοντας ομαδοποίησης είναι μία παράμετρος ενδεικτική για τον τρόπο οργάνωσης του δικτύου. Πρόκειται για το βαθμό με τον οποίο οι κόμβοι τείνουν να οργανώνονται σε ομάδες (συστάδες). Η τοπική τιμή του παράγοντα ομαδοποίησης για έναν μεμονωμένο

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΑΥΤΟΡΓΑΝΟΥΜΕΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ61

κόμβο, έστω  $i$ , είναι ο λόγος του αριθμού των συνδέσεων μεταξύ των γειτόνων του προς τον μέγιστο αριθμό των ακμών που θα μπορούσαν να τους συνδέουν (πλήρης γράφος), που ισούται με  $k_i(k_i - 1)$ , όπου  $k_i$  ο βαθμός του κόμβου. Επομένως για κάθε ζεύγος γειτόνων,  $j, k$ , η τιμή του παράγοντα ομαδοποίησης για τον κόμβο  $i$  υπολογίζεται ως εξής:

$$C_i = \frac{|e_{jk}|}{k_i(k_i - 1)}; e_{jk} \in E, j, k \neq i$$

με μέση τιμή:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (3.13)$$

## Κεφάλαιο 4

# Μεθοδολογία Προσομοίωσης

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό διεξάγεται μελέτη της επίδρασης ορισμένων από τις παραμέτρους ενός τυχαίου γεωμετρικού γράφου στη συνεκτικότητά του. Η μελέτη δικτύων τέτοιου τύπου επιβάλλει την διατήρηση της συνεκτικότητας τους παρά τις πιθανές τροποποιήσεις προκειμένου να μην τίθεται σε κίνδυνο η λειτουργικότητα και η επίδοση του δικτύου. Πιθανά προβλήματα που ανακύπτουν σε περίπτωση που δεν τηρείται το κριτήριο αυτό είναι η εμφάνιση απομονωμένων κόμβων, η αναποτελεσματική δρομολόγηση και η αύξηση του μέσου μήκους μονοπατιού.

### 4.2 Μελέτη Παραμέτρων Δικτύου

Η προσομοίωση του μοντέλου περιλαμβάνει την εξέταση πολλών διαφορετικών τοπολογιών και την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων που συγκλίνουν σε μια καθολική παραδοχή. Διαφορετικές τοπολογίες παρουσιάζουν αποκλίσεις όσον αφορά στον τρόπο οργάνωσης του δικτύου, γεγονός που έχει επίδραση και στη συνεκτικότητά του. Για το

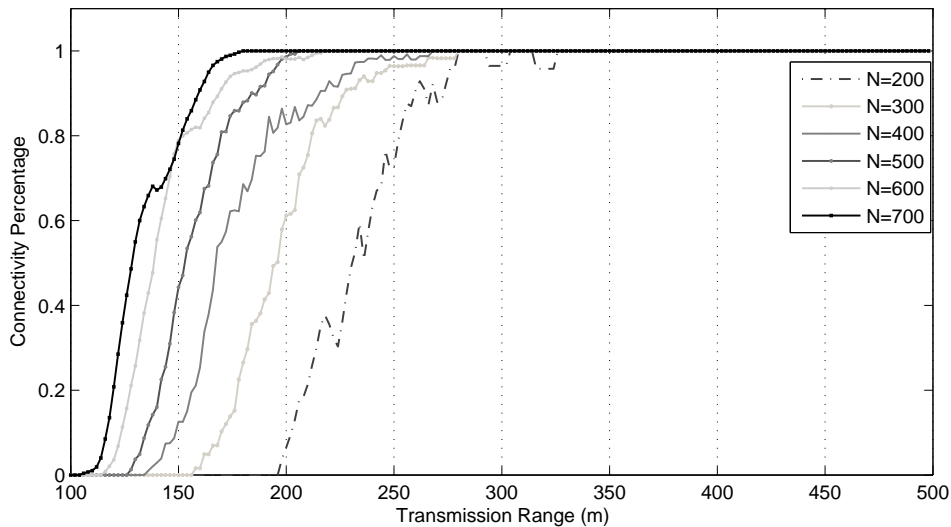
λόγο αυτό, η τιμή της συνεκτικότητας - που αντιστοιχεί στη μονάδα (τιμή 1) όταν ένα δίκτυο είναι συνδεδεμένο και στο 0 όταν υπάρχουν απομονωμένοι κόμβοι - υπολογίζεται για πολλές διαφορετικές τοπολογίες, έστω  $T$ , και στη συνέχεια εξάγεται ο μέσος όρος των μετρήσεων. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι:

1. το πλήθος κόμβων  $N$
2. η ακτίνα μετάδοσης  $R$
3. η πυκνότητα του δικτύου και
4. το πλήθος  $T$  των διαφορετικών τοπολογιών που προσομοιώνονται

Οι υποενότητες που ακολουθούν εξετάζουν τον τρόπο που μεταβάλλεται η τιμή για τη συνεκτικότητα συναρτήσει των παραπάνω παραγόντων. Η ανάλυση αυτή αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων όσον αφορά στον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων του δικτύου που πρόκειται να προσομοιωθεί.

#### 4.2.1 Συνεκτικότητα δικτύου συναρτήσει της ακτίνας μετάδοσης

Από το Σχήμα 4.1 παρατηρείται ότι για σταθερό πλήθος κόμβων  $N$ , η συνεκτικότητα του δικτύου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα καθορισμένο κατώφλι ακτίνας μετάδοσης, πάνω από το οποίο, κάθε γράφος που παράγεται είναι συνδεδεμένος με μεγάλη πιθανότητα. Το παραπάνω κατώφλι κυμαίνεται μεταξύ 100 και 200 m για γράφους μεσαίου μεγέθους. Όταν η ακτίνα μετάδοσης μειωθεί κάτω από 100 m, η πλειοψηφία των γράφων δεν είναι συνδεδεμένοι, καθώς υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά στη συνεκτικότητα. Από την άλλη μεριά, όταν η ακτίνα μετάδοσης αυξηθεί υπερβολικά, και γίνει συγκρίσιμη με τις διαστάσεις της περιοχής που έχει εμβαδό  $2000 \times 2000m^2$  για τις τοπολογίες που εξετάζονται, η συνεκτικότητα εξασφαλίζεται με μεγάλη βεβαιότητα. Σχεδόν κάθε γράφος είναι συνδεδεμένος, με τη μέση

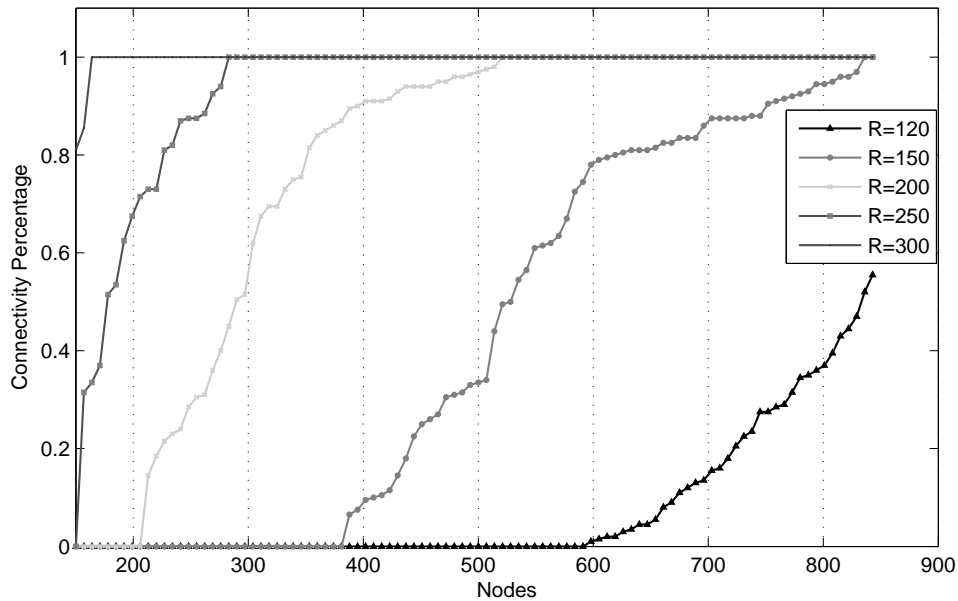


Σχήμα 4.1: Συνεκτικότητα ως προς την ακτίνα μετάδοσης

τιμή της συνεκτικότητας να τείνει στη μονάδα. Μπορούμε ακόμη να παρατηρήσουμε, ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν είναι αντιπροσωπευτικά της 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 συνεκτικότητας. Για γράφους μεσαίου μεγέθους, η μετάβαση από το μη συνεκτικό γράφο στο συνεκτικό δεν είναι ραγδαία, αλλά αντιθέτως, η τιμή της συνεκτικότητας μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την ακτίνα μετάδοσης, μια ομαλότητα που διακρίνεται και στο διάγραμμα (Σχήμα 4.1).

#### 4.2.2 Συνεκτικότητα δικτύου συναρτήσει του πλήθους των κόμβων

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η μεταβολή της συνεκτικότητας συναρτήσει του πλήθους των κόμβων, όταν η ακτίνα μετάδοσης παραμένει σταθερή. Παρατηρούμε ότι η τιμή της συνεκτικότητας αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων του δικτύου. Αυτό οφείλεται



Σχήμα 4.2: Συνεκτικότητα ως προς το πλήθος των κόμβων,  $R(m)$

στην αύξηση της πυκνότητας των κόμβων. Πράγματι, πυκνότερο δίκτυο συνεπάγεται μεγαλύτερο αριθμό γειτόνων για κάθε μεμονωμένο κόμβο και επομένως αποτελεσματικότερη μεταξύ τους επικοινωνία. Εξαλείφεται, δηλαδή, η πιθανότητα εμφάνισης απομονωμένων κόμβων. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της ακτίνας μετάδοσης ο αριθμός των κόμβων που εξασφαλίζει μοναδιαία τιμή για τη συνεκτικότητα είναι μικρότερος. Όταν στο δίκτυο υπάρχουν 700 κόμβοι, η συνδεσιμότητα εξασφαλίζεται ακόμα και για μικρές τιμές της ακτίνας. Αντιθέτως, όταν οι κόμβοι είναι 200 (αραιότερο δίκτυο), η συνδεσιμότητα δεν είναι εγγυημένη ακόμα κι όταν η ακτίνα έχει αρκετά υψηλή τιμή σε σχέση με τις διαστάσεις της περιοχής δικτύου. Σημειώνεται εδώ ότι η περιοχή που εξετάζεται έχει διαστάσεις  $2000 \times 2000m^2$ .

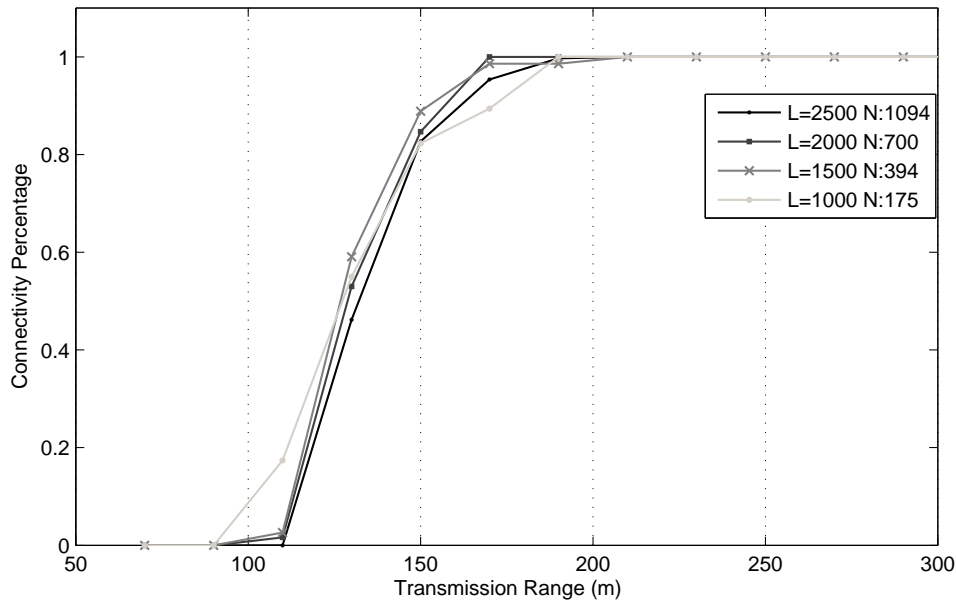


### 4.2.3 Συνεκτικότητα συναρτήσεως της πυκνότητας του δικτύου

Το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει τον τρόπο μεταβολής της συνεκτικότητας συναρτήσεως της ακτίνας μετάδοσης για δίκτυα σταθερής πυκνότητας. Πρόκειται για τέσσερις διαφορετικές καμπύλες, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε διαφορετικό δίκτυο ως προς τον αριθμό των κόμβων και την περιοχή που καλύπτει. Κοινό χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών αποτελεί η πυκνότητα των κόμβων, η οποία είναι ίση με  $175 \text{ κόμβους}/\text{km}^2$ . Οι τιμές της ακτίνας μετάδοσης, στον οριζόντιο άξονα, κυμαίνονται από 50 έως 300m. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα έχουν προέλθει από το μέσο όρο της συνδεσιμότητας για πολλές διαφορετικές τοπολογίες κάθε κατηγορίας δικτύου. Μία καιρία παρατήρηση αφορά στις τιμές της ακτίνας μετάδοσης που εξασφαλίζουν τη συνδεσιμότητα αυτών των δικτύων, οι οποίες σχεδόν ταυτίζονται. Παρόλο δηλαδή που εξετάζονται 4 εντελώς διαφορετικά δίκτυα όσον αφορά τον πλήθος των κόμβων και την περιοχή που καταλαμβάνουν, η ελάχιστη τιμή της ακτίνας μετάδοσης για την επίτευξη της συνδεσιμότητας είναι η ίδια, και στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει τιμή εντός του διαστήματος 150-200m. Για μεγάλο μέγεθος δίκτυα ( $L > 1500$ ), παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση της καμπύλης, που σημαίνει ταχύτερη επίτευξη συνδεσιμότητας σε σύγκριση με περιοχές μικρότερου μεγέθους, στα οποία ο ρυθμός αύξησης του ποσοστού συνδεσιμότητας είναι χαμηλότερος για ακτίνα μετάδοσης κάτω από 150m. Για ακτίνες πάνω από τα 250m όλες οι τοπολογίες καταλήγουν σε συνδεδεμένο δίκτυο για όλες τις κατηγορίες.

### 4.2.4 Σχέση περιοχής δικτύου και ακτίνας μετάδοσης

Εφόσον έχει ήδη μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η συνεκτικότητα ενός δικτύου από την ακτίνα μετάδοσης (ενότητα 4.2.1), τον αριθμό των κόμβων (ενότητα 4.2.2) και την πυκνότητα του δικτύου (ενότητα 4.2.3), κρίνεται απαραίτητο να καθοριστεί μία συσχέτιση του μεγέθους της περιοχής που καλύπτει το δίκτυο με την ακτίνα μετάδοσης προκειμένου να εξασφαλίζεται η συνεκτικότητα του δικτύου. Περιγράφεται, λοιπόν, ένας



Σχήμα 4.3: Συνεκτικότητα ως προς την ακτίνα μετάδοσης για πυκνότητα 175 κόμβων/ $km^2$ .

τρόπος υπολογισμού της ελάχιστης τιμής της ακτίνας σαν συνάρτηση του μεγέθους της περιοχής του δικτύου και του αριθμού των κόμβων. Αρχικά, σκιαγραφείται ένα γενικό μοντέλο για το συνολικό δίκτυο: Χωρίζεται η περιοχή σε επιμέρους τετράγωνα (ή κυκλικούς δίσκους) ίσα με τον αριθμό των κόμβων, κι επομένως κάθε ένα από αυτά έχει εμβαδό ίσο με  $\frac{L^2}{N}$  ( $m^2$ ). θεωρώντας ότι η συνολική περιοχή είναι ένας δίσκος ακτίνας  $\frac{L\sqrt{2}}{2}$ , η συνολική περιοχή του δικτύου ισούται με

$$\pi \cdot \left(\frac{L\sqrt{2}}{2}\right)^2 = \pi \cdot \frac{L^2}{2}$$

Άρα το εμβαδό κάθε τετραγώνου θα είναι  $\frac{\pi \cdot L^2}{2 \cdot N}$  ( $m^2$ ). Εφόσον το δίκτυο είναι συνεκτικό, κάθε κόμβος θα πρέπει να είναι σε θέση να επικοινωνεί με τους γείτονες του, άρα θα πρέπει να εκπέμπει στο εύρος του δικού του τετραγώνου και των 8 γειτονικών του, δηλαδή σε 9 συνολικά τετράγωνα. Επομένως η περιοχή κάλυψης κάθε κόμβου θα πρέπει να ισούται με

9×εμβαδό τετραγώνου. Κατά συνέπεια, η ακτίνα υπολογίζεται ως εξής:

$$\pi \cdot R^2 = 9 \cdot \frac{\pi \cdot L^2}{2 \cdot N} \Rightarrow R = \sqrt{\frac{9 \cdot L^2}{2 \cdot N}} \quad (4.1)$$

Η παραπάνω ανάλυση συγκλίνει στο γεγονός ότι δίκτυα με την ίδια πυκνότητα τείνουν να παρουσιάζουν την ίδια τιμή κατωφλίου για την ακτίνα μετάδοσης, γεγονός που υποστηρίζεται και από τα σχήματα των προηγούμενων ενοτήτων.

Θεωρώντας τις καμπύλες του Σχήματος 4.1 που αφορούν μία περιοχή δικτύου διαστάσεων  $2000 \times 2000m^2$ , υπολογίστηκαν οι θεωρητικές τιμές κατωφλίου για την ακτίνα όπως προκύπτουν από την εξίσωση (4.1). Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Τιμή κατωφλίου ακτίνας

Αριθμός κόμβων N	Πραγματική τιμή R (σχ. 4.1)	Θεωρητική τιμή $R_{theory}$ (εξ.4.1)
200	310	300.00
300	260	244.95
400	240	212.13
500	190	189.74
600	180	173.21
700	170	160.36

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

Το πλήθος των διαφορετικών τοπολογιών που είναι απαραίτητες για την εξαγωγή του μέσου όρου είναι ένας παράγοντας που έχει ιδιαίτερη σημασία και αφορά αποκλειστικά στην προσομοίωση. Είναι σαφές ότι όσο περισσότερες τοπολογίες εξετάζονται, τόσο ασφαλέστερα είναι και τα συμπεράσματα που προκύπτουν. Υπάρχει, ωστόσο, μία κρίσιμη τιμή για το  $T$ , πέραν της οποίας οι προσομοιώσεις συγκλίνουν στα ίδια αποτελέσματα. Κατά συνέπεια, δεν έχει νόημα να συμπεριληφθούν κι άλλες τοπολογίες για τον υπολογισμό του μέσου όρου. Έπειτα από δοκιμές στο πρόγραμμα Matlab, παρατηρήθηκε ότι κατάλληλες

τιμές για την παράμετρο  $T$  κυμαίνονται από 1000 έως 4000.

### 4.3 Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση είναι τα ακόλουθα:

- Για σταθερό πλήθος κόμβων, η συνεκτικότητα επιτυγχάνεται ταχύτερα με αύξηση της ακτίνας μετάδοσης των κόμβων.
- Για σταθερή ακτίνα μετάδοσης, η συνεκτικότητα επιτυγχάνεται ταχύτερα με αύξηση του πλήθους των κόμβων.
- Δίκτυα με ίδια πυκνότητα παρουσιάζουν καμπύλες με όμοια μορφή και τιμές κατωφλίου.
- Πλήθος τοπολογιών 1000-4000 είναι ικανοποιητικό για την εξαγωγή ενός ακριβούς μέσου όρου.

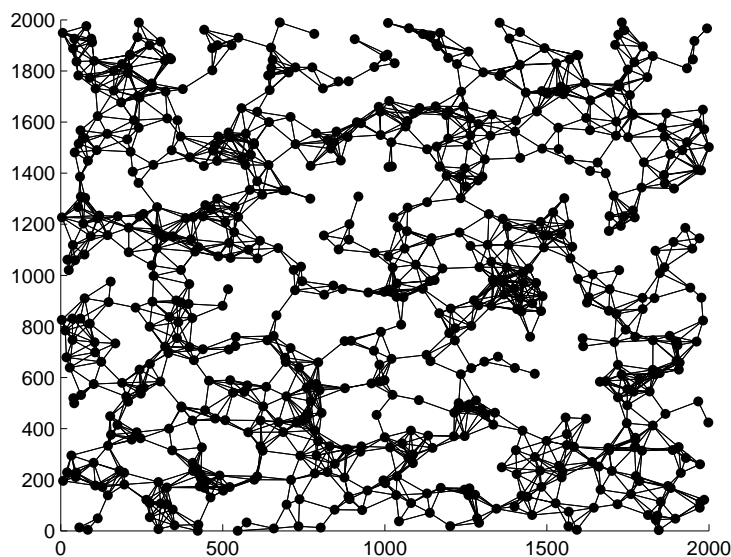
## Κεφάλαιο 5

# Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός δικτύου με κύριο στόχο την επιβεβαίωση της λειτουργίας του μοντέλου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Το δίκτυο που εξετάζεται είναι ένας τυχαίος γεωμετρικός γράφος με ομοιόμορφη κατανομή κόμβων. Αρχικά, γίνεται απεικόνιση των μεταβολών στη συνδεσμολογία του δικτύου για διαδοχικές επαναλήψεις. Ακολουθεί σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με αυτά της προσομοίωσης και, τέλος, αντιπαράθεση των κύριων παραμέτρων του δικτύου που προκύπτει μετά τις τροποποιήσεις με αυτές ενός δικτύου τύπου ‘small-world’.

### 5.1 Σχηματική Επίδειξη Λειτουργίας

Η τροποποίηση του αρχικού δικτύου είναι μία διαδικασία που περιλαμβάνει πολλά στιγμιότυπα δεδομένου ότι στηρίζεται στην εκτέλεση ενός αλγορίθμου, του οποίου τα βήματα είναι προκαθορισμένα. Με στόχο την παρακολούθηση της εξέλιξης του δικτύου, παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά στάδια εκτέλεσης, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της ακτίνας μετάδοσης. Η αλλαγή της ακτίνας μετάδοσης ορισμένων κόμβων οδηγεί στην αύξηση του αριθμού των συνδέσεων καθιστώντας το δίκτυο πυκνότερο, γεγονός που



Σχήμα 5.1: Αρχική κατάσταση

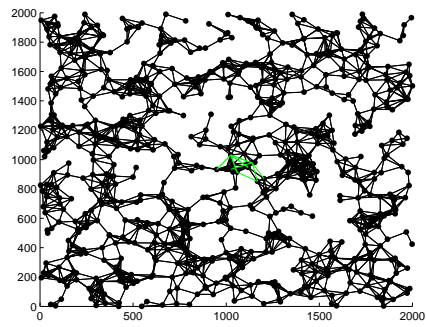
γίνεται εμφανές μέσω των ακόλουθων σχημάτων.

Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται η αρχική κατάσταση του δικτύου, πριν την προσθήκη συνδέσεων. Όπως παρατηρούμε, πρόκειται για ένα συνδεδεμένο δίκτυο, αρκετά πυκνό αλλά με μικρό σχετικά αριθμό συνδέσεων για κάθε κόμβο. Η περιοχή που καλύπτει έχει έκταση  $1000 \times 1000m^2$ , στην οποία κατανέμονται ομοιόμορφα 700 κόμβοι ακτίνας 120m.

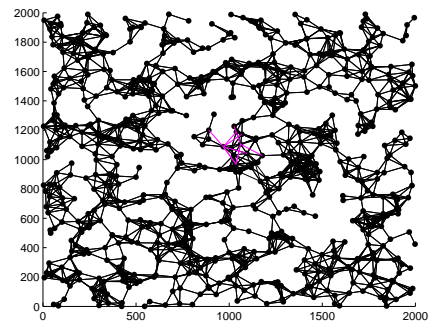
Στο Σχήμα 5.2, παρουσιάζονται διαφορετικά στιγμιότυπα της προσομοίωσης για τιμές της ακτίνας από 120 έως 200m, ενώ το σχήμα 5.3 αφορά σε τιμές από 210 έως 280m. Μια προσεκτική μελέτη των διαδοχικών στιγμιότυπων οδηγεί στις εξής παρατηρήσεις:

1. ο αριθμός συνδέσεων σε κάθε βήμα γίνεται ολοένα και μεγαλύτερος,
2. το δίκτυο πυκνώνει αρκετά στην περιοχή του κέντρου του δικτύου.

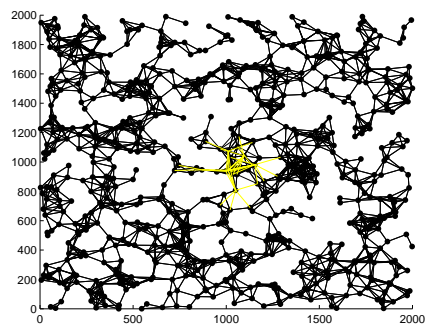
Όσον αφορά την πρώτη παρατήρηση, γίνεται εμφανές ότι στα πρώτα βήματα (Σχ.5.2), ο ρυθμός πρόσθεσης συνδέσεων είναι αρκετά χαμηλός. Αυτό οφείλεται στη μικρή επιφάνεια που ορίζει η νέα ακτίνα με την προηγούμενη, δηλαδή το εμβαδό του κυκλικού δακτυλίου.



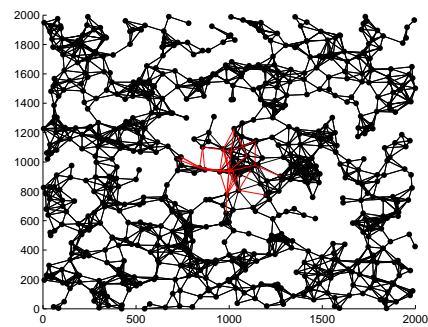
(a) R - 130



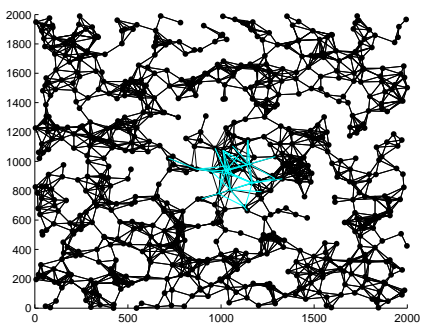
(b) R - 140



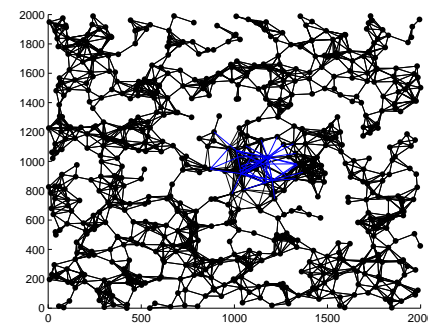
(c) R - 150



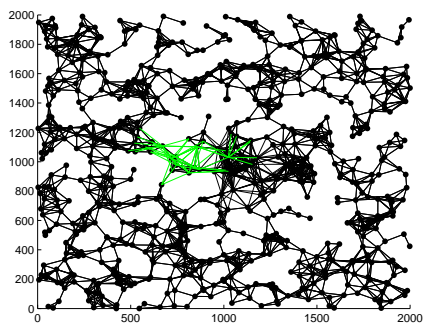
(d) R - 160



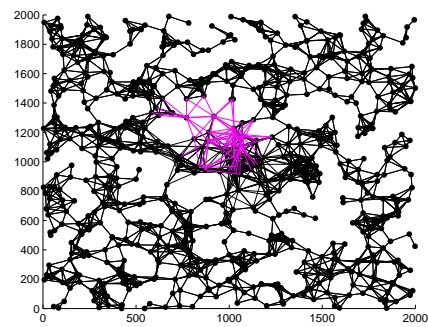
(e) R - 170



(f) R - 180

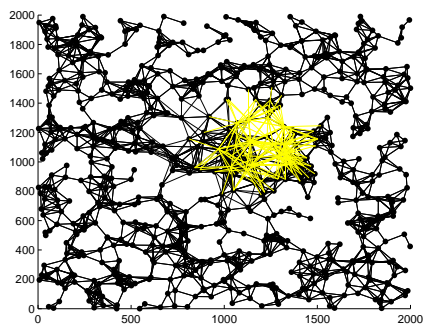


(g) R - 190

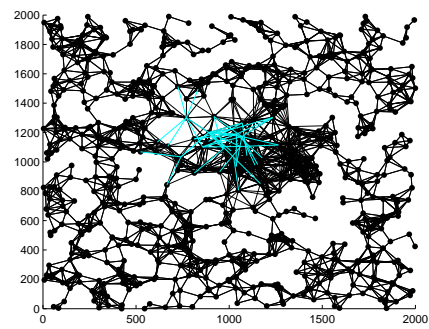


(h) R - 200

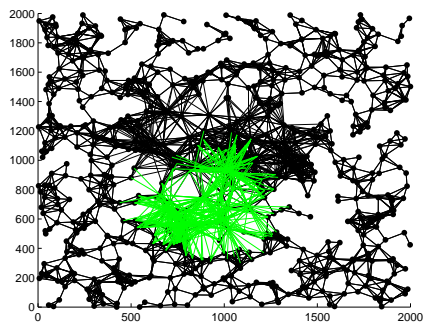
Σχήμα 5.2: Στιγμιότυπα για ακτίνα από R-130 έως 200m



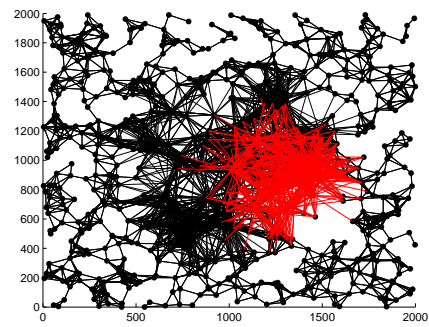
(a) R - 210



(b) R - 230



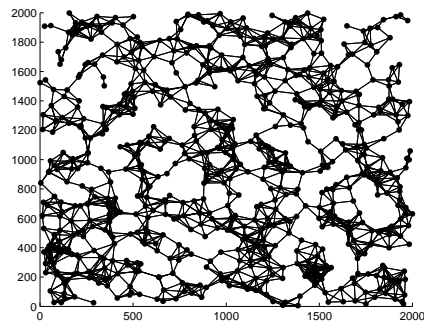
(c) R - 250



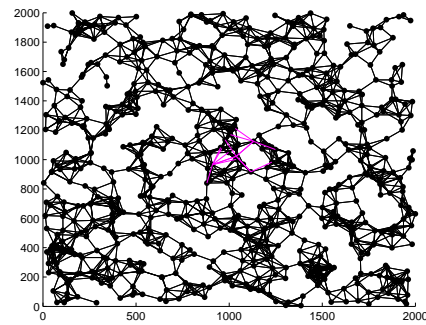
(d) R - 280

Σχήμα 5.3: Στιγμιότυπα για μεγαλύτερες ακτίνες

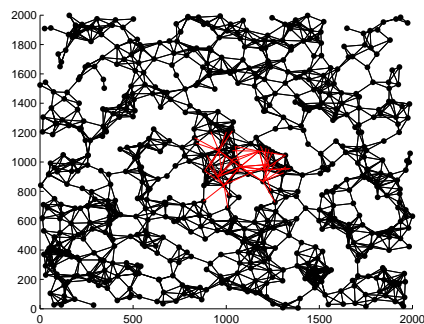




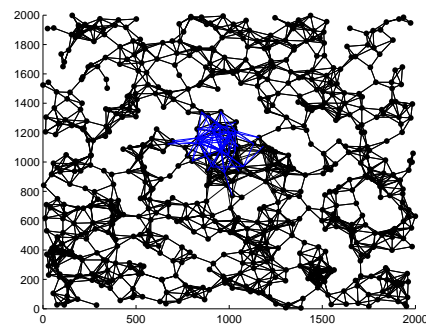
(a) R - 120



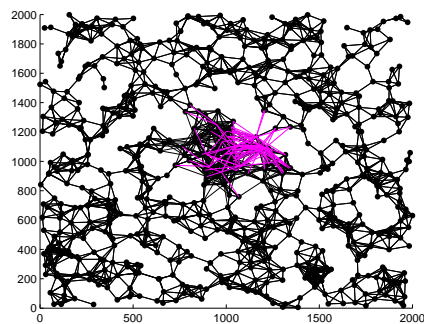
(b) R - 140



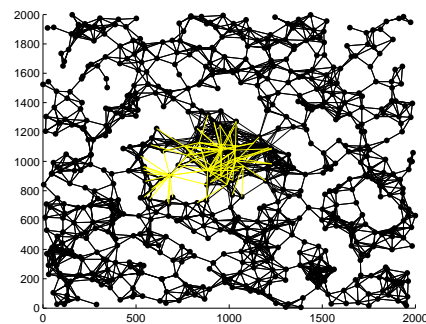
(c) R - 160



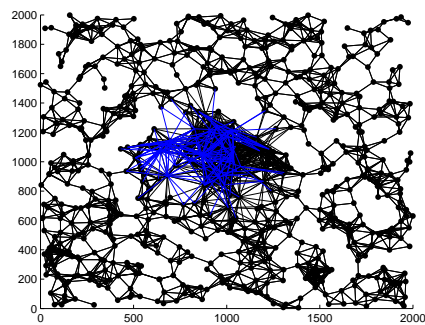
(d) R - 180



(e) R - 200

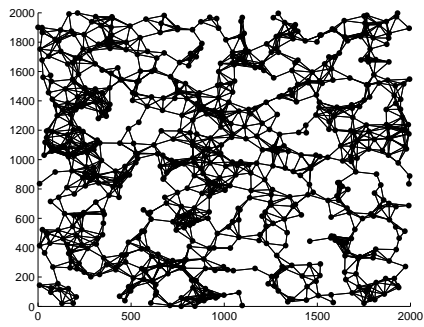


(f) R - 220

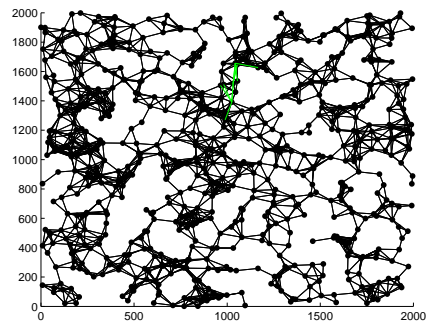


(g) R - 240

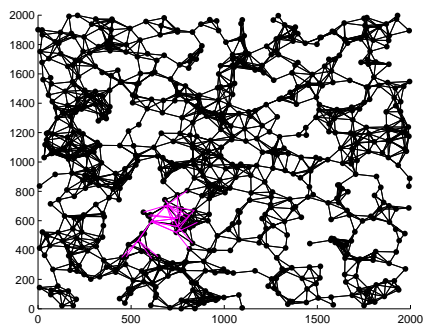
Σχήμα 5.4: Στιγμιότυπα για  $p = 0.6$



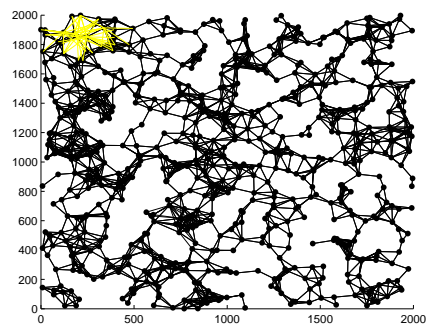
(a) R - 120



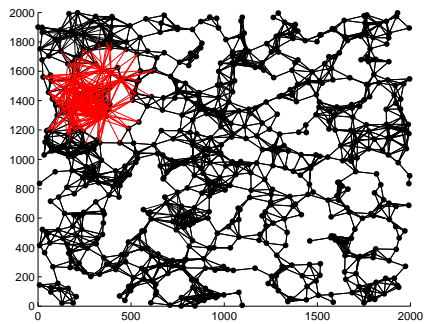
(b) R - 140



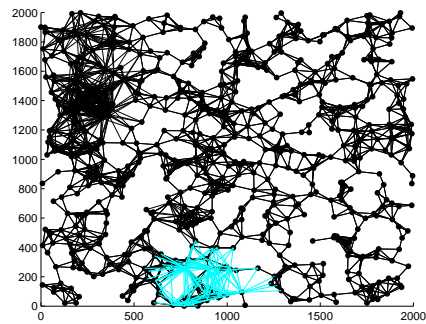
(c) R - 160



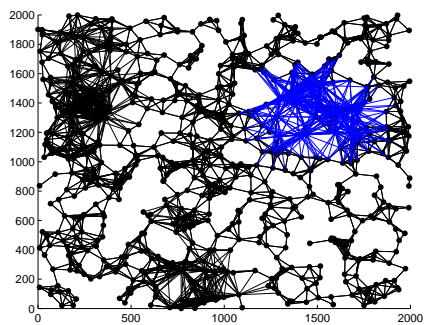
(d) R - 180



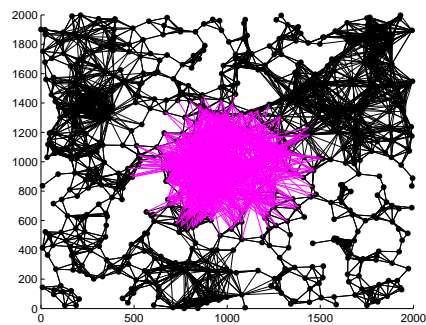
(e) R - 200



(f) R - 220



(g) R - 240



(h) R - 280

Σχήμα 5.5: Στιγμιότυπα για τυχαία επιλογή κόμβων

Στα επόμενα βήματα, όταν η αύξηση της ακτίνας είναι της τάξης του 50 % ( $R=180$ ), οι συνδέσεις που προστίθενται σε κάθε βήμα είναι περισσότερες. Καθώς αυξάνεται η ακτίνα (Σχ.5.3), ολοένα και περισσότερες συνδέσεις προστίθενται σε κάθε βήμα. Περαιτέρω αύξηση της ακτίνας δεν αποτελεί ρεαλιστική προσέγγιση καθώς δεν είναι επιθυμητό η περιοχή κάλυψης ενός μεμονωμένου κόμβου να είναι συγκρίσιμη με την συνολική έκταση του δικτύου. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να ισχύει  $\pi \times R^2 \ll L^2 \Rightarrow R \ll 1128.7 \approx 1130m$ . Κατά συνέπεια, τιμές της ακτίνας μέχρι 500-600m είναι αποδεκτές, ενώ υψηλότερες απορρίπτονται στα πλαίσια του περιορισμένου χωρικά δικτύου που εξετάζεται. Αν για παράδειγμα θεωρήσουμε υψηλότερες τιμές ακτίνας (Σχ. 5.3(c), Σχ. 5.3(d)), παρατηρούμε ότι ο αριθμός των συνδέσεων αυξάνει σημαντικά για ορισμένους κόμβους, γεγονός που ενδεχομένως να οδηγήσει στη δημιουργία hubs, δηλαδή κόμβων με πολύ μεγαλύτερο αριθμό συνδέσεων σε σύγκριση με το μέσο όρο. Εξαιτίας όμως της περιορισμένης διαθεσιμότητας ενεργειακών πόρων, η ύπαρξη τέτοιου είδους κόμβων δεν είναι εφικτή, ούτε συμβατή με τη φιλοσοφία των δικτύων αισθητήρων.

Όσον αφορά τη δεύτερη παρατήρηση, η υψηλότερη πυκνότητα του δικτύου στην κεντρική περιοχή οφείλεται στα κριτήρια επιλογής του πρώτου κόμβου. Ο κόμβος αυτός είναι ο μοναδικός που επιλέγεται σε κάθε βήμα και είναι διαφορετικός κάθε φορά. Πάντα, όμως, επιλέγεται ένας κόμβος που βρίσκεται πολύ κοντά στο κέντρο του δικτύου. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι οι γείτονές του, που είναι πιθανότερο να επιλεγούν, βρίσκονται με τη σειρά τους στην ευρύτερη περιοχή του κέντρου. Όλες οι συντομύσεις που προστίθενται λόγω αύξησης της ακτίνας περιορίζονται σε μία περιοχή, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν εναλλακτικές όπως για παράδειγμα η τυχαία επιλογή του πρώτου κόμβου ή η επιλογή του βάσει της θέσης του, αλλά όχι σε σχέση με το κέντρο αλλά σε σχέση με άλλα σημεία του χώρου.

Αν τώρα η επιλογή ενός δεύτερου κόμβου γίνεται με πιθανότητα  $p$ , ο ρυθμός προσθήκης συνδέσεων είναι μικρότερος σε σύγκριση με τον προηγούμενο, όπου  $p = 1$ . Ενδεικτικά

παρουσιάζονται κάποια από τα στιγμιότυπα για  $p = 0.6$ .

Παρατηρώντας το Σχήμα 5.4 συμπεραίνουμε ότι οι συνδέσεις που προστίθενται σε κάθε βήμα είναι λιγότερες συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση όπου η πιθανότητα επιλογής των κόμβων-γειτόνων του πρώτου είναι μοναδιαία. Αυτό καθιστά σαφές το γεγονός ότι η εισαγωγή αυτής της πιθανότητας στον αλγόριθμο προσθέτει ευελιξία όσον αφορά το ποσοστό αύξησης των συνδέσεων, και κατά επέκταση της πυκνότητας του δικτύου.

Αν τώρα θεωρήσουμε τυχαία επιλογή του πρώτου κόμβου, η μορφή του δικτύου, και η προσθήκη των συνδέσεων είναι τελείως διαφορετική αλλά και πολύ λιγότερο προβλέψιμη, όπως προκύπτει και από το Σχήμα 5.5.

Σε κάθε βήμα επιλέγεται τυχαία ο αρχικός κόμβος, και στη συνέχεια οι γειτονικοί του, με αποτέλεσμα οι νέες συνδέσεις να περιορίζονται στην εκάστοτε περιοχή, της οποίας το εμβαδόν διαφοροποιείται για κάθε ακτίνα και για την ακρίβεια αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της ακτίνας. Η προσέγγιση αυτή είναι φαινομενικά καλύτερη καθώς συνίσταται σε μια πιο δίκαιη αντιμετώπιση των κόμβων. Ωστόσο, εξαιτίας της τυχαιότητας που εισάγεται, είναι δυσκολότερο να προβλέψουμε την επίδραση της μεταβολής της ακτίνας ορισμένων κόμβων στις παραμέτρους του δικτύου, και τη συμπεριφορά του στη μόνιμη κατάσταση.

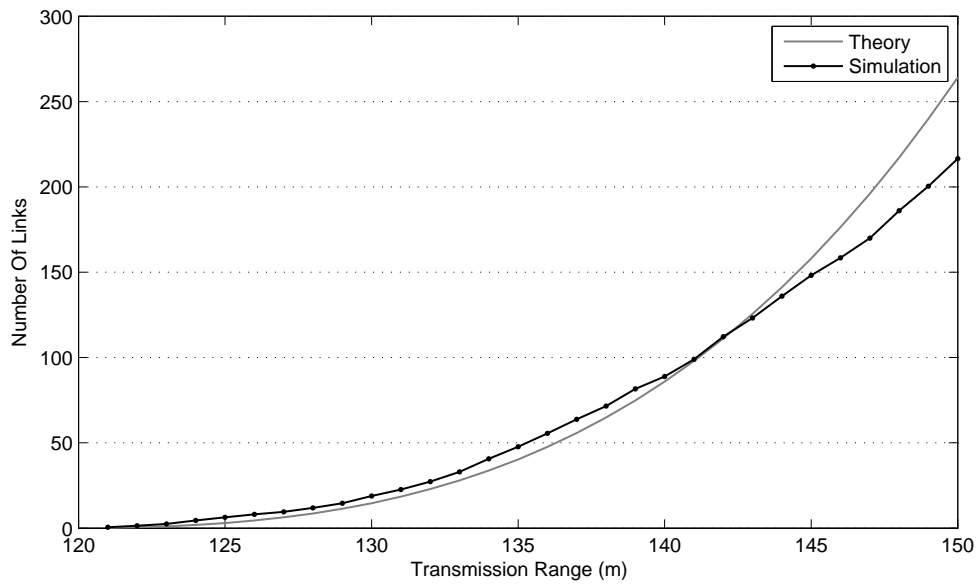
## 5.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων με τα Θεωρητικά

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με σκοπό τη σύγκρισή τους με τα αναμενόμενα, δηλαδή τις τιμές που προκύπτουν από το θεωρητικό μοντέλο. Σε κάθεμια από τις υποενότητες, μελετάται κάθε παράμετρος ξεχωριστά με τη βοήθεια γραφικών παραστάσεων και κατάλληλων υπολογισμών.

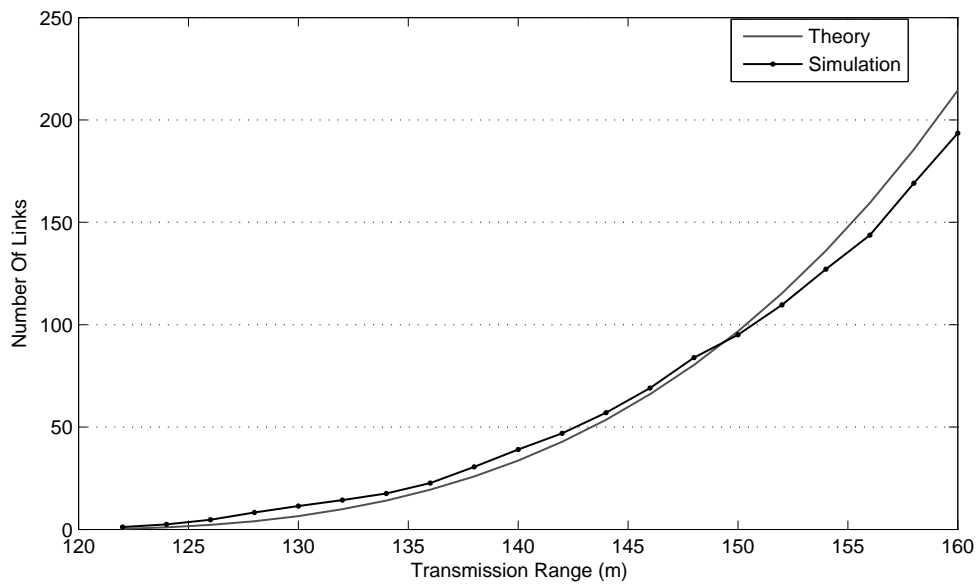
### 5.2.1 Ρυθμός πρόσθεσης συνδέσεων

Προκειμένου να ελεγχθεί η εγκυρότητα του θεωρητικού μοντέλου σχετικά με το ρυθμό πρόσθεσης νέων συνδέσεων, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα: στο πρώτο (Σχ. 5.6) η πιθανότητα  $p$ , όπως ορίστηκε στην παρουσίαση του μοντέλου είναι ίση με τη μονάδα, δηλαδή επιλέγονται όλοι οι νέοι γείτονες, ενώ στο δεύτερο (Σχ. 5.7), η πιθανότητα αυτή λαμβάνεται  $p = 0.6$ . Και τα δύο διαγράμματα παρουσιάζουν τον τρόπο μεταβολής του αριθμού των συνδέσεων συναρτήσει της ακτίνας, η οποία είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου. Σε κάθε ένα σχήμα, παρουσιάζονται δύο καμπύλες. Η πρώτη προκύπτει από την εφαρμογή του τύπου που περιγράφηκε στη θεωρία και εκφράζει την αναμενόμενη μέση τιμή των συνδέσεων που προστίθενται σε κάθε βήμα. Η δεύτερη προέκυψε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Πρόκειται για αθροιστικές καμπύλες, δηλαδή στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται ο αριθμός συνδέσεων που έχουν προστεθεί συνολικά, από την αρχή μέχρι την αντίστοιχη χρονική στιγμή, στον οριζόντιο άξονα. Σημειώνεται ότι το δίκτυο που προσομοιώθηκε έχει διαστάσεις  $2000m \times 2000m^2$  και αποτελείται από 700 κόμβους ακτίνας 120m ο καθένας. Η ακτίνα αυξάνεται σε κάθε βήμα αλλά με πολύ αργό ρυθμό καθώς στόχος είναι ο καθορισμός ενός συνεχούς μοντέλου. Τα αποτελέσματα έχουν προέλθει από μέσες τιμές πολλών διαφορετικών τοπολογιών με τα παραπάνω χαρακτηριστικά (1000 διαφορετικές τοπολογίες).

Από τα Σχήματα 5.6 και 5.7, είναι φανερό ότι η καμπύλη της προσομοίωσης ακολουθεί αυτή του θεωρητικού μοντέλου τόσο σε μορφή όσο και στις τιμές. Παρατηρούμε ότι στην αρχή οι τιμές τους σχεδόν ταυτίζονται και ο αριθμός των συνδέσεων παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Καθώς όμως αυξάνεται η ακτίνα, οι νέες συνδέσεις πραγματοποιούνται με ταχύτερο ρυθμό, γεγονός που αναμένεται καθώς το εμβαδό των δακτυλίων που σχηματίζονται σε κάθε βήμα του αλγορίθμου είναι ανάλογο του τετραγώνου της ακτίνας. Αυτό δικαιολογεί την εκθετική μορφή της καμπύλης. Παρατηρούμε ότι η καμπύλη της προσομοίωσης έχει λίγο χαμηλότερο ρυθμό αύξησης (κλίση) για τις μεγαλύτερες τιμές της

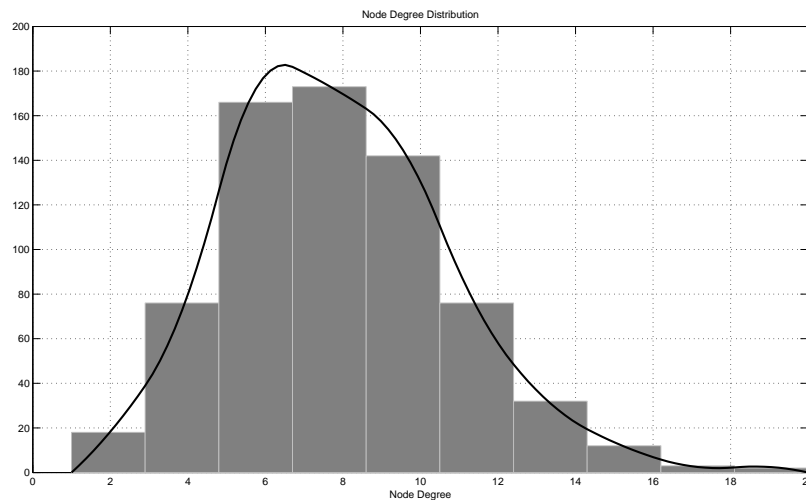


Σχήμα 5.6: Αριθμός συνδέσεων συναρτήσει της ακτίνας  $p = 1$



Σχήμα 5.7: Αριθμός συνδέσεων συναρτήσει της ακτίνας  $p = .6$

ακτίνας σε σύγκριση με τη θεωρητική. Αυτό συμβαίνει γιατί το δίκτυο που θεωρήσαμε είναι περιορισμένης έκτασης, με αποτέλεσμα η ακτίνα να μην είναι δυνατόν να αυξάνεται απεριόριστα. Επίσης, ο περιορισμένος αριθμός κόμβων δεν επιτρέπει την επιλογή πολλών διαφορετικών κόμβων στα διαδοχικά βήματα του αλγορίθμου. Κατά συνέπεια, όσο εξελίσσεται το δίκτυο, η ακτίνα δε θα αυξάνεται περαιτέρω καθώς δεν θα υπάρχουν κόμβοι για να επιλεγούν. Αυτό σημαίνει ότι η καμπύλη θα πρέπει να συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή, ένα άνω κατώφλι, προκειμένου το δίκτυο να περάσει από τη μεταβατική κατάσταση στη μόνιμη.



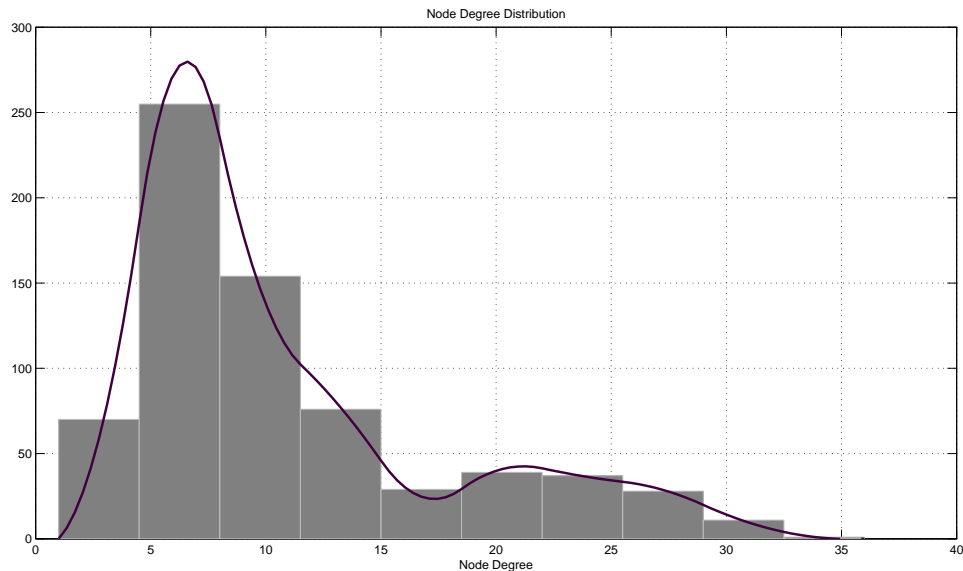
Σχήμα 5.8: Αρχική Κατανομή βαθμού κόμβων  $R = 120m$

### 5.2.2 Κατανομή βαθμού κόμβων

Παρακάτω πραγματοποιείται μελέτη της κατανομής του βαθμού των κόμβων σε κάθε βήμα του αλγορίθμου. Προκειμένου να μην υπάρχουν ασάφειες παρατίθενται τρία διαφορετικά διαγράμματα που εξηγούνται στη συνέχεια.

Η κατανομή του βαθμού των κόμβων του δικτύου, στην αρχική του μορφή, πριν υποστεί οποιαδήποτε αλλαγή ακολουθεί τη καμπύλη του Σχήματος 5.8. Για λόγους πληρότητας

περιλαμβάνονται στο ίδιο διάγραμμα το ιστόγραμμα και η αντίστοιχη προσεγγιστική καμπύλη, η οποία υπολογίστηκε με τη βοήθεια του Matlab.



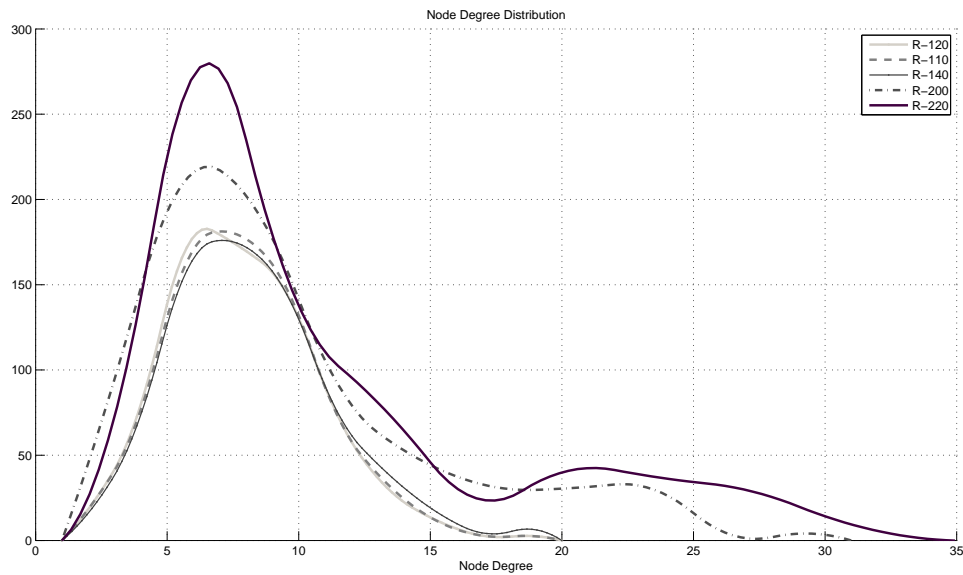
Σχήμα 5.9: Νέα Κατανομή βαθμού κόμβων  $R = 220m$

Η κατανομή του βαθμού των κόμβων όταν η ακτίνα έχει αυξηθεί κατά 80% της αρχικής ( $R_o = 120m$ ) ακολουθεί την καμπύλη που φαίνεται στο Σχήμα 5.9.

Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η καμπύλη κατανομής μπορεί να φανεί καλύτερα μέσω της απεικόνισης πολλών διαφορετικών στιγμιότυπων σε κοινό διάγραμμα. Οι καμπύλες αποτελούν προσεγγίσεις των αντίστοιχων ιστογραμμάτων, αντίστοιχα με τις προηγούμενες αναπαραστάσεις.

Παρατηρείται μία διεύρυνση των τιμών του βαθμού κόμβων στον οριζόντιο άξονα και οξύτερη κορυφή στο δεξιό τμήμα της καμπύλης. Εμφανίζονται, δηλαδή, ορισμένοι κόμβοι με μεγαλύτερο αριθμό συνδέσεων σε σχέση με το αρχικό δίκτυο, ενώ ο αριθμός αυτών με βαθμό κοντά στο μέσο όρο αυξάνεται σημαντικά. Το εμβαδόν της περιοχής που σχηματίζεται από την καμπύλη και τον οριζόντιο άξονα αυξάνεται εξαιτίας της συνεχούς προσθήκης συνδέσεων, χωρίς αφαιρέσεις ή αναδιατάξεις. Ο τρόπος μετάβασης από την αρχική στην





Σχήμα 5.10: Κατανομή βαθμού κόμβων: Διαδοχικά Στιγμιότυπα

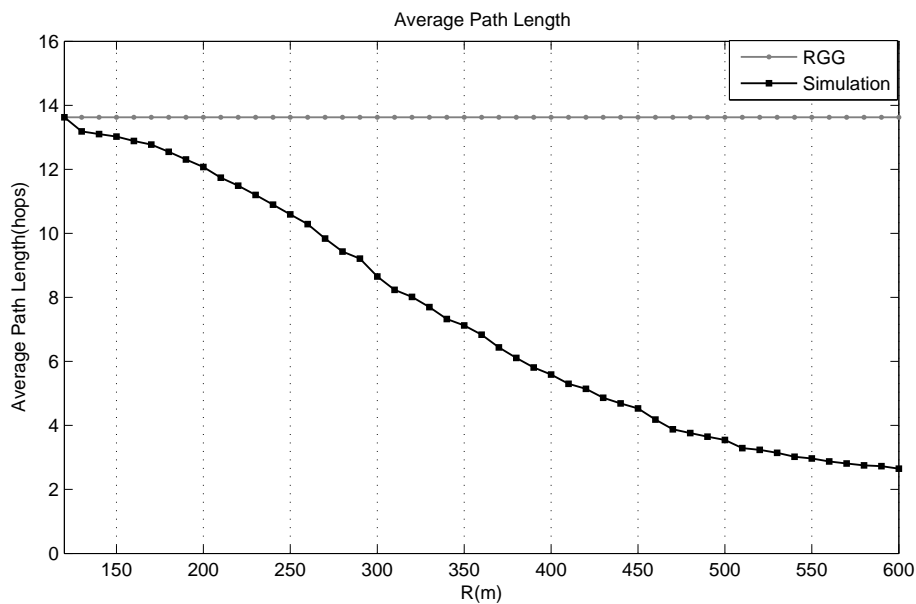
τελική κατανομή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10, όπου συμπεριλαμβάνονται ορισμένα από τα διαδοχικά στιγμιότυπα αύξησης της ακτίνας.

### 5.2.3 Μήκος μονοπατιού

Στη συνέχεια παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται το μέσο μήκος μονοπατιού συναρτήσει της ακτίνας. Το Σχήμα 5.11 παρουσιάζει το μέσο μήκος μονοπατιού σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, δηλαδή για διαδοχικές αυξήσεις της ακτίνας ορισμένων κόμβων. Η συνεχής γραμμή που διακρίνεται στο διάγραμμα αντιστοιχεί στην μέση τιμή του μήκους μονοπατιού, η οποία έχει εξαχθεί από το μέσο όρο των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πολλών διαφορετικών τοπολογιών. Παρατίθεται για λόγους σύγκρισης με τις τιμές της καμπύλης του μέσου μήκους μονοπατιού για το δίκτυο που εξετάζεται και τροποποιείται βάσει των διαδικασιών που περιγράφηκαν νωρίτερα.

Τα αποτελέσματα αφορούν σε ένα δίκτυο 700 κόμβων, ομοιόμορφα κατανομημένων σε

περιοχή έκτασης  $2000 \times 2000m^2$ . Η ακτίνα μετάδοσης μεταβάλλεται από 120 έως 600m. Εδώ σημειώνεται ότι βάσει των παρατηρήσεων του Κεφαλαίου 4, η ακτίνα μετάδοσης θα έπρεπε να ξεκινάει από 150m και να μην υπερβαίνει τα 600m. Στην προσομοίωση, ωστόσο, εξαιτίας των περιορισμών που εισάγει η μικρή έκταση του δικτύου και κυρίως το φαινόμενο των άκρων, έπρεπε να υπάρχει ένα σημαντικό περιθώριο αύξησης της ακτίνας προκειμένου να εξαχθούν πιο εύληπτα συμπεράσματα. Για το λόγο αυτό ξεκινάμε από ακτίνα 120m, για την οποία ένα ποσοστό της τάξης του 60 % των τοπολογιών είναι συνδεδεμένο, και λάβαμε υπόψη μόνο τα συνεκτικά δίκτυα για τον υπολογισμό του μέσου όρου των παραμέτρων που εξετάσαμε. Επίσης, δεν παρατίθενται αποτελέσματα για ακτίνες πάνω από 600m, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν ακολουθούν τη φιλοσοφία του δικτύου αισθητήρων γιατί απλά σημαίνουν ότι υπάρχει κόμβος στο δίκτυο με δυνατότητα επικοινωνίας σχεδόν με οποιονδήποτε άλλο, κάτι που προϋποθέτει την εξασφάλιση υψηλών ενεργειακών αποθεμάτων. Παρατηρώντας τη μορφή της καμπύλης είναι εμφανές ότι το μέσο μήκος



Σχήμα 5.11: Μέσο μήκος μονοπατιού  $p = 1$

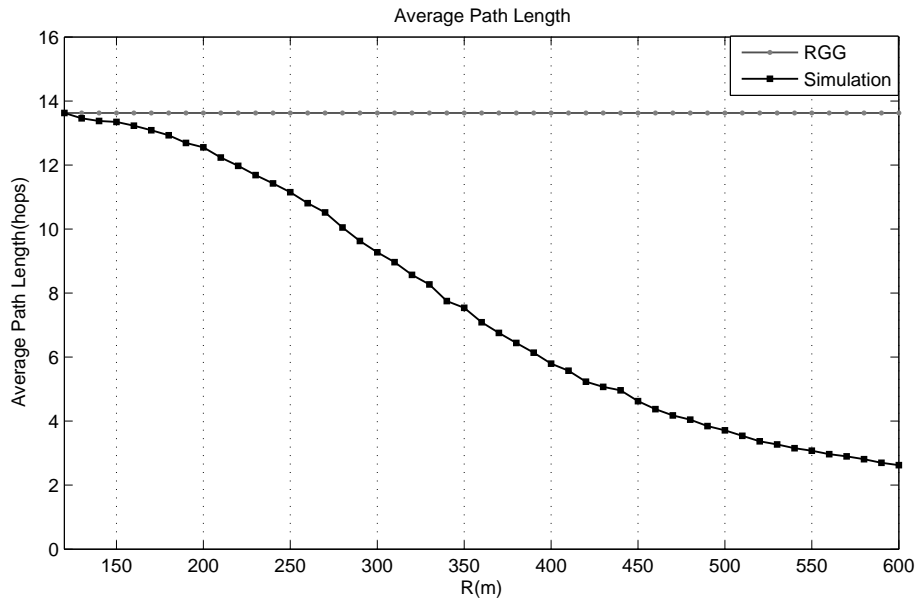
μονοπατιού μειώνεται σε κάθε επανάληψη, γεγονός που αποτελούσε και τον αρχικό στόχο

του μοντέλου που παρουσιάστηκε. Η μείωση δεν επέρχεται με τον ίδιο ρυθμό: στην αρχή, όσο η ακτίνα είναι μικρή, το μήκος μονοπατιού μειώνεται μεν αλλά με αργό ρυθμό. Καθώς όμως η ακτίνα αυξάνεται, η απόσταση μεταξύ των κόμβων μειώνεται και η προσθήκη συντομεύσεων που συνδέουν αρκετά απομακρυσμένους κόμβους τείνει να μειώσει το μέσο μήκος μονοπατιού με ολοένα και ταχύτερους ρυθμούς.

Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι περισσότερες διαδρομές μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων απαιτούν ολοένα και λιγότερα βήματα σε κάθε επανάληψη, είτε γιατί δημιουργείται απ'ευθείας σύνδεση μεταξύ τους όταν ένας από τους δύο ή και οι δύο επιλέγονται για να αυξήσουν την ακτίνα τους στη συγκεκριμένη επανάληψη, ή γιατί η συντομότερη διαδρομή πιθανώς να διέρχεται από έναν τροποποιημένο κόμβο. Παρατηρούμε ακόμα ότι το μέσο μήκος μονοπατιού εξακολουθεί να μειώνεται όσο αυξάνουμε την ακτίνα αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό καθώς δεν είναι δυνατό να μειωθεί πέραν μιας τιμής, κοντά στη μονάδα. Αν η ανάλυση αφορούσε αποτελέσματα για υψηλότερες τιμές της ακτίνας, η καμπύλη θα έτεινε ασυμπτωτικά στο 1, καθώς αν αυξηθεί τόσο η ακτίνα ενός κόμβου ώστε να είναι συγκρίσιμη με τις διαστάσεις του δικτύου είναι λογικό η πλειοψηφία των ζευγών κόμβων να βρίσκονται εντός ενός βήματος.

Ωστόσο, η αύξηση της ακτίνας πέραν από τα όρια που μελετήθηκαν στην παρούσα ανάλυση, αφενός δεν είναι καθόλου ρεαλιστική, καθώς συνοδεύεται από υψηλή κατανάλωση ισχύος, και αφετέρου δεν έχει νόημα σε ένα δίκτυο αισθητήρων. όπου εκείνο που μας ενδιαφέρει είναι η αποτελεσματική αξιοποίηση και ο κατανεμημένος τρόπος συνεργασίας των κόμβων κι όχι η δημιουργία πολύ λίγων κόμβων ικανών να εξυπηρετήσουν όλο το δίκτυο (κεντροποιημένος αλγόριθμος).

Παρόλο που η παρατήρηση της μείωσης του μονοπατιού αποτελεί σημαντικό βήμα, αξίζει να δούμε ποια είναι η σχέση που συνδέει την ακτίνα μετάδοσης με το μέσο μήκος μονοπατιού. Βάσει όσων αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.3.1, μπορούμε να δεχτούμε την προσέγγιση της εξίσωσης (3.11), δηλαδή ότι το μέσο μήκος μονοπατιού είναι  $L = \frac{\log(N/z_1)}{\log(z_2/z_1)} + 1$ .



Σχήμα 5.12: Μέσο μήκος μονοπατιού  $p = .6$

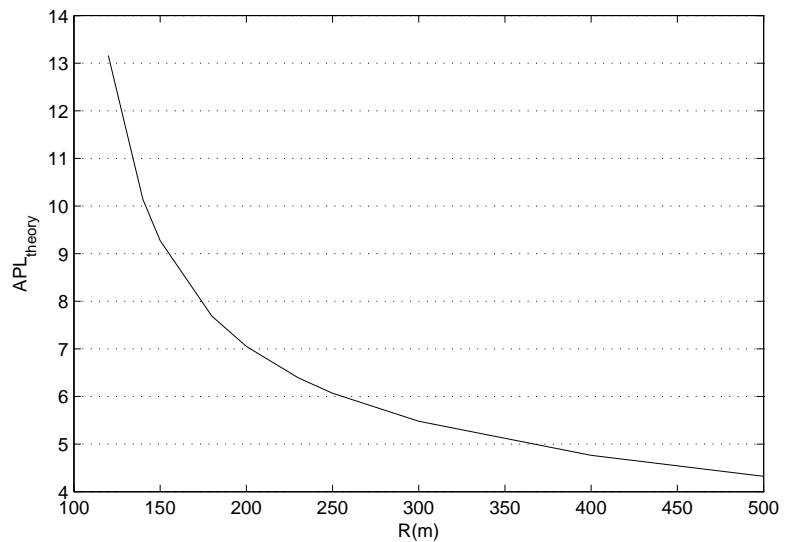
Τα  $z_1, z_2$  αποτελούν συνάρτηση της ακτίνας και οι αναμενόμενες τιμές τους μπορούν να υπολογιστούν βάσει των υποθέσεων και προσεγγίσεων του προηγούμενου κεφαλαίου. Η σύγκριση των τιμών αυτών με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμβάλλει σημαντικά στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του δικτύου, προκειμένου να γίνεται εξαρχής μια όσο το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση της αναμενόμενης τιμής του μήκους μονοπατιού. Παρατίθεται αρχικά ένας πίνακας με τις θεωρητικές τιμές του μήκους μονοπατιού για διαφορετικές τιμές της ακτίνας, όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα Mathematica με εφαρμογή των τύπων της ενότητας 3.3.1. Στον ίδιο πίνακα, περιλαμβάνονται οι τιμές των  $z_1, z_2$  που είναι ο μέσος αριθμός γειτόνων εντός ενός και δύο βημάτων αντίστοιχα, με τον πρώτο να προκύπτει από την εξίσωση (3.8) και τον δεύτερο από το ολοκλήρωμα της σχέσης (3.12). Το μέσο μήκος μονοπατιού υπολογίζεται θεωρώντας το δίκτυο ομογενές, δηλαδή ότι κάθε κόμβος θα έχει την ίδια ακτίνα (αυτή της πρώτης στήλης). Οι τιμές έχουν επιλεγεί κατάλληλα για λόγους σύγκρισης, ενώ η γραφική παράσταση του Σχήματος 5.2.3 απεικονίζει τις μεταβολές των τιμών (εδώ έχουν θεωρηθεί περισσότερα σημεία, που φαίνονται στον

διπλανό πίνακα).

Πίνακας 5.1: Θεωρητικός Υπολογισμός Μέσου Μήκους Μονοπατιού

Ακτίνα(m)	Αριθμός γειτόνων 1 βήματος	Αριθμός γειτόνων 2 βημάτων	Μέσο μήκος μο- νοπατιού
120	7.92	12.74	<b>13.16</b>
150	12.37	23.71	<b>9.27</b>
200	21.99	49.16	<b>7.05</b>
250	34.36	83.24	<b>6.07</b>
300	49.48	125.79	<b>5.48</b>

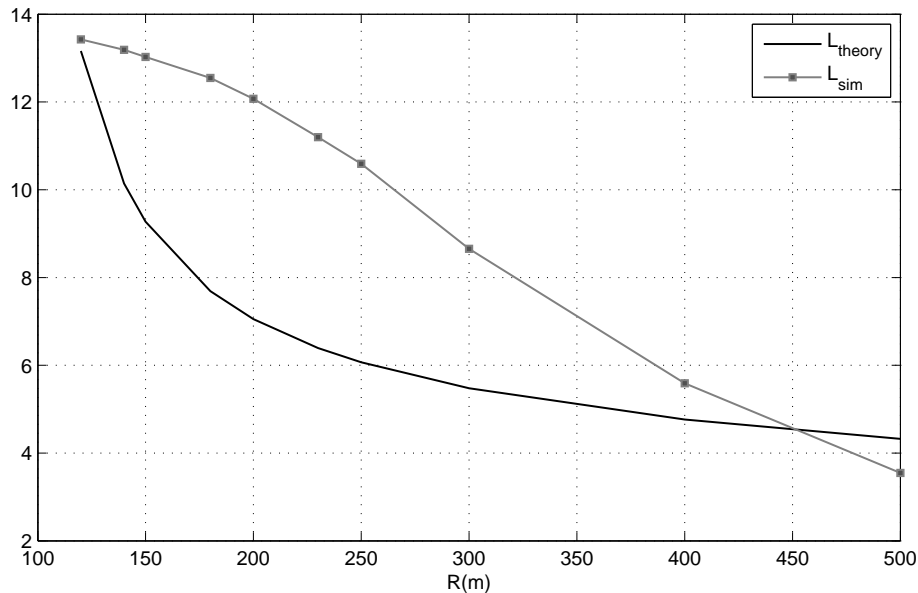
R(m)	APL
120	13.16
140	10.14
150	9.27
180	7.69
200	7.05
230	6.39
250	6.07
300	5.48
400	4.76
500	4.32



Σχήμα 5.13: Θεωρητικός Υπολογισμός Μέσου Μήκους Μονοπατιού

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.14 συγκρίνεται η αναμενόμενη τιμή του μήκους μονοπατιού για ομογενές δίκτυο και η τιμή που προκύπτει από την προσομοίωση συναρτήσει της ακτίνας μετάδοσης. Η απόκλιση των τιμών των δύο καμπυλών αιτιολογείται ως εξής: οι θεωρητικοί υπολογισμοί στηρίζονται στην υπόθεση ότι η ακτίνα μετάδοσης είναι ίδια για κάθε κόμβο, ενώ στο δίκτυο της προσομοίωσης μεταβάλλεται η ακτίνα μόνο ορισμένων κόμβων σε κάθε βήμα και η τιμή της είναι αυτή που φαίνεται στον οριζόντιο άξονα.

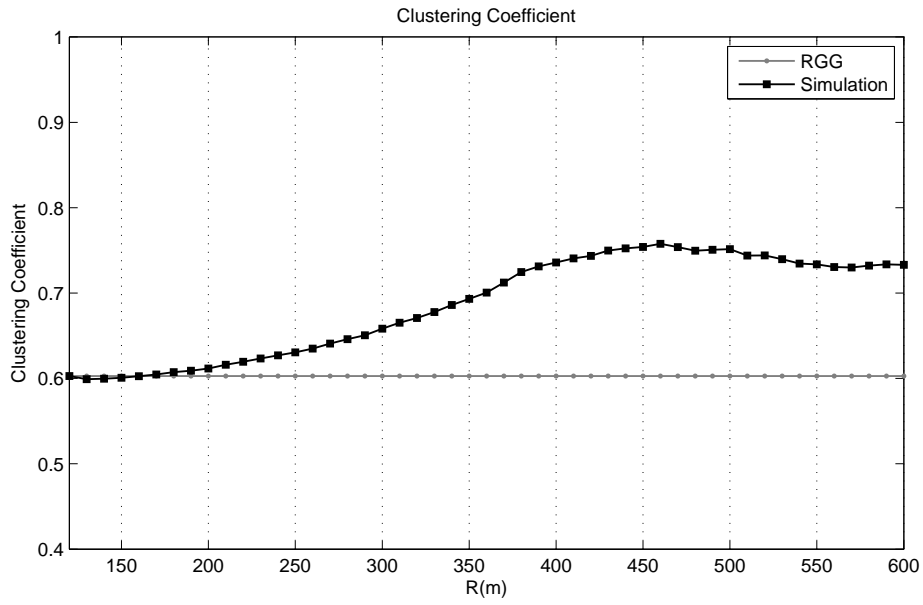
Υπολογίζοντας την απόκλιση για κάθε τιμή της ακτίνας, παρατηρείται ότι αρχικά είναι μεγάλη, αλλά καθώς αυξάνεται η ακτίνα (απαγορευτικά από το 600 και πάνω) η διαφορά εξαλείφεται.



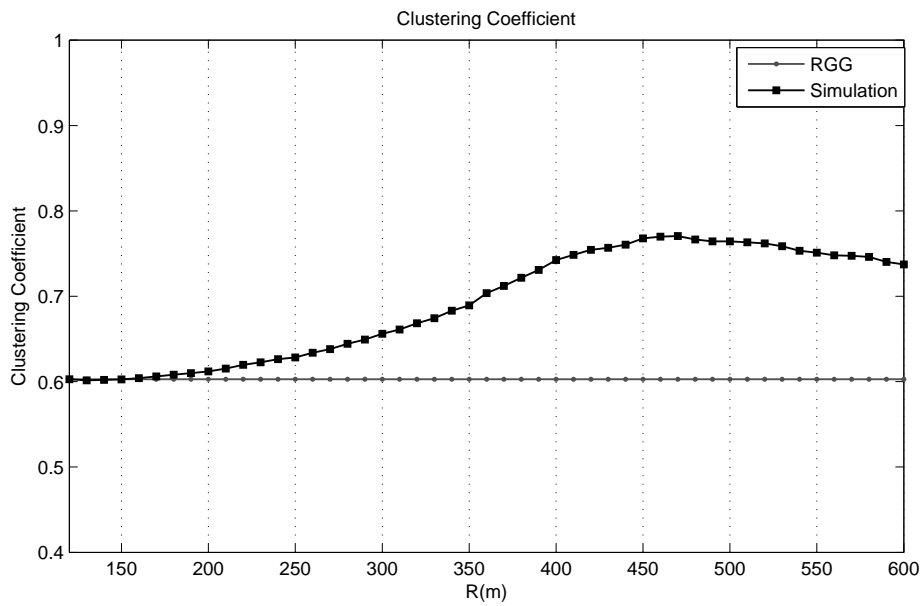
Σχήμα 5.14: Σύγκριση Μέσου Μήκους Μονοπατιού

#### 5.2.4 Παράγοντας ομαδοποίησης

Ο παράγοντας ομαδοποίησης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ακτίνα μετάδοσης ορισμένων κόμβων. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο αλγόριθμος τροποποίησης περιλαμβάνει μόνο την πρόσθεση συνδέσεων, και κατά συνέπεια το ήδη συνεκτικό δίκτυο ομαδοποιείται όλο και περισσότερο όσο αυξάνεται η ακτίνα. Θυμίζουμε εδώ ότι αύξηση της ακτίνας συνεπάγεται αύξηση του αριθμού των συνδέσεων ενός ποσοστού των κόμβων του δικτύου. Έτσι αυξάνεται ο παράγοντας ομαδοποίησης των κόμβων που επιλέγονται, γεγονός που συντελεί στην αύξηση του μέσου όρου των  $C_i$ , δηλαδή του τοπικού παράγοντα ομαδοποίησης. Υπάρχει βέβαια ένα κρίσιμο σημείο, πέραν του οποίου δεν επέρχεται περαιτέρω αύξηση,



(a)  $p = 1$



(b)  $p = .6$

Σχήμα 5.15: Παράγοντας ομαδοποίησης

και η τάση που ακολουθείται είναι σταθεροποιητική. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της ακτίνας εντός μίας γειτονιάς κόμβων παράγει έναν αριθμό συνδέσεων μεταξύ τους, πολύ κοντά στο μέγιστο δυνατό. Για τους εν λόγω κόμβους η τιμή του  $C_i$  είναι κοντά στη μονάδα, ενώ οι τιμές των υπολοίπων δεν μεταβάλλονται. Τελικά, ο μέσος όρος αυτών αυξάνεται κατά ένα ποσοστό ανάλογο του αριθμού των κόμβων που επιλέγονται.

### 5.3 Σύγκριση με Δίκτυα τύπου small-world

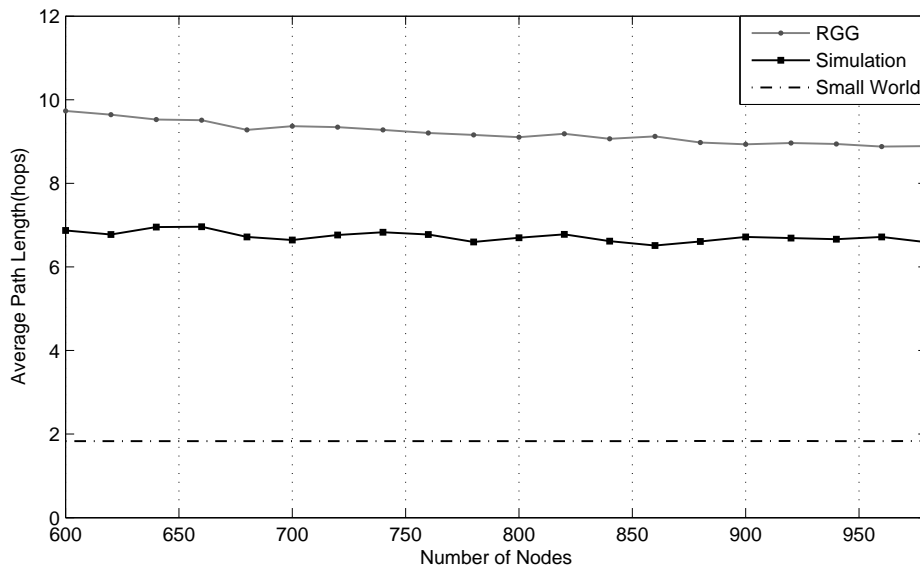
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων με δίκτυα τύπου 'small-world' όσον αφορά στο μέσο μήκος μονοπατιού και στον παράγοντα ομαδοποίησης. Οι γραφικές παραστάσεις αποτελούν συνάρτηση του αριθμού των κόμβων του δικτύου.

Κατά την προσομοίωση, εξετάστηκαν δίκτυα με διαφορετικό πλήθος κόμβων, σε περιοχή διαστάσεων  $2000 \times 2000 m^2$ , ενώ υλοποιήθηκαν πολλές τοπολογίες για τον ίδιο αριθμό κόμβων. Σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκαν οι δύο παράγοντες που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή το μέσο μήκος μονοπατιού και ο παράγοντας ομαδοποίησης, για το δίκτυο αισθητήρων (τυχαίος γεωμετρικός γράφος), το δίκτυο τύπου 'small-world' και το δίκτυο που παράγεται μετά τις επεμβάσεις που υπαγορεύει το μοντέλο της παρούσας εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, το παραγόμενο δίκτυο προκύπτει από έναν τυχαίο γεωμετρικό γράφο ακτίνας 150m, και αυξάνεται σταδιακά μέχρι τα 350m (που αποτελεί και την ακτίνα μετάδοσης ενός μικρού ποσοστού των κόμβων). Η πιθανότητα  $p$  έχει ληφθεί ίση με τη μονάδα.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, το πλήθος των κόμβων εκτείνεται στην περιοχή [600, 1000], ενώ οι τιμές αντιστοιχούν στο μέσο όρο των διαφορετικών τοπολογιών. Στο υπόμνημα τα δίκτυα σημειώνονται ως RGG (απεικονίζεται με γκρι χρώμα), που είναι ο τυχαίος γεωμετρικός γράφος με ομοιόμορφη ακτίνα μετάδοσης, small-world (διακεκομμένη γραμμή), που είναι ένα δίκτυο τύπου small-world, και Simulation (μαύρη γραμμή με τε-



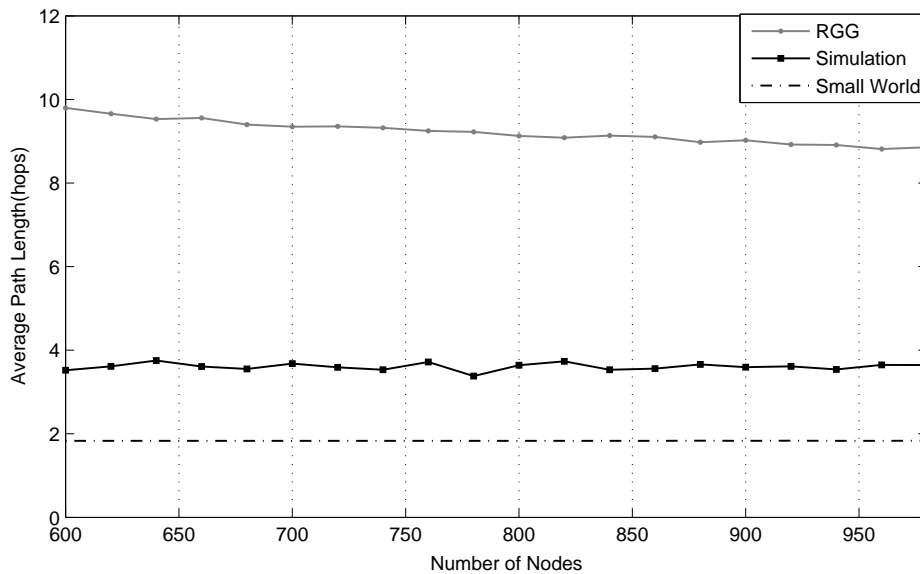
τράγωνα στα σημεία), το δίκτυο που προκύπτει από την προσομοίωση.



Σχήμα 5.16: Μέσο Μήκος Μονοπατιού: Σύγκριση τυχαίου γεωμετρικού γράφου, δικτύου τύπου small-world και ετερογενούς δικτύου διαφορετικών ακτινών μετάδοσης

Η τάση που παρατηρείται όσον αφορά στο μέσο μήκος μονοπατιού είναι μία ελαφρά μείωση καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των κόμβων του δικτύου αλλά σε γενικές γραμμές είναι σταθεροποιητική.

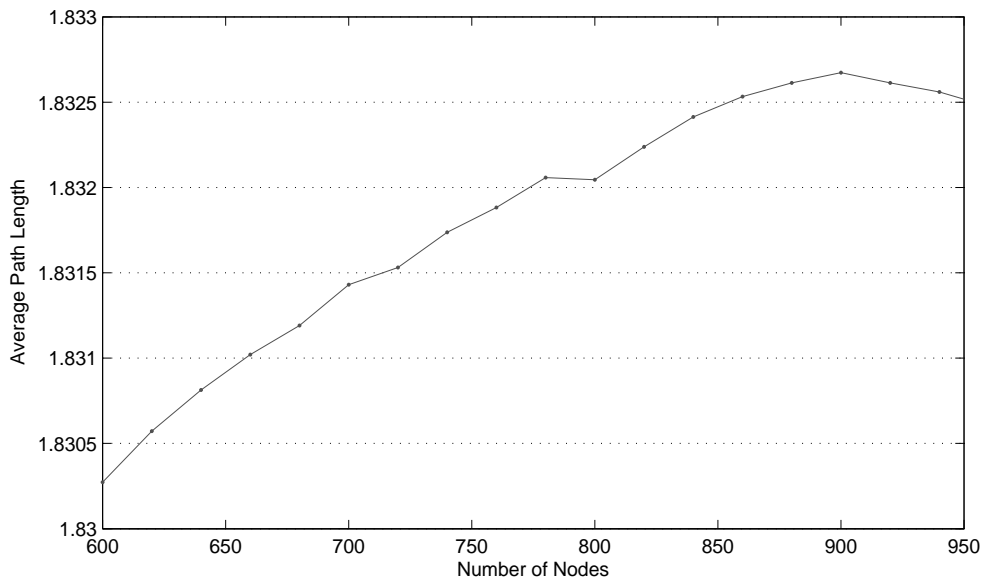
Το μέσο μήκος μονοπατιού για το small-world δίκτυο παραμένει σχεδόν σταθερό, και για την ακρίβεια αυξάνεται κατά ένα ποσοστό της τάξης του 0.01-0.02 %, σύμφωνα με τα ακριβή αποτελέσματα της προσομοίωσης, κάτι που δεν είναι εμφανές στο Σχήμα 5.16 εξαιτίας των υψηλών τιμών των άλλων δύο δικτύων. Προκειμένου να γίνει φανερή η μικρή αυτή αύξηση παρατίθεται το Σχήμα 5.18. Η αύξηση είναι μικρή αλλά συμβαίνει όπως είναι λογικό καθώς το δίκτυο μεγαλώνει. Το μέσο μήκος μονοπατιού του τυχαίου γεωμετρικού γράφου ακολουθεί πτωτική τάση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του αριθμού των κόμβων με την ίδια ακτίνα μετάδοσης, που κατανέμονται στην ίδια περιοχή. Με άλλα λόγια, αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου και οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων είναι περισσότερες, κάτι



Σχήμα 5.17: Μέσο Μήκος Μονοπατιού: Σύγκριση τυχαίου γεωμετρικού γράφου, δικτύου τύπου small-world και ετερογενούς δικτύου διαφορετικών ακτινών μετάδοσης

που οδηγεί σε μικρή μείωση των βημάτων.

Όσον αφορά στο δίκτυο της προσομοίωσης, το μέσο μήκος μονοπατιού μειώνεται σε σύγκριση με τον τυχαίο γεωμετρικό γράφο, κάτι που εξηγήθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Για τις ακτίνες που έχουν επιλεγεί, το μήκος μονοπατιού δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω, παρόλο που καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων παρατηρείται μία πτωτική τάση, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην αύξηση της πυκνότητας του δικτύου. Αυτή η αύξηση επιτρέπει την αύξηση του αριθμού των συνδέσεων σε κάθε βήμα του αλγορίθμου που εφαρμόζεται, εφόσον επιλέγονται περισσότεροι κόμβοι και η ακτίνα τους αυξάνεται. Η συμβολή τους στη μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού είναι ανάλογη του ποσοστού αύξησης της ακτίνας. Εδώ η ακτίνα μεταβάλλεται από 150m έως 330m, δηλαδή αυξάνεται κατά 120 %. Αν όμως θεωρήσουμε περαιτέρω αύξηση της ακτίνας, μέχρι και 650m, τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται. Η τιμή για το μέσο μήκος μονοπατιού τείνει να προσεγγίσει αυτή του δικτύου small-world, ενώ απέχει σημαντικά από το αρχικό δίκτυο, όπως

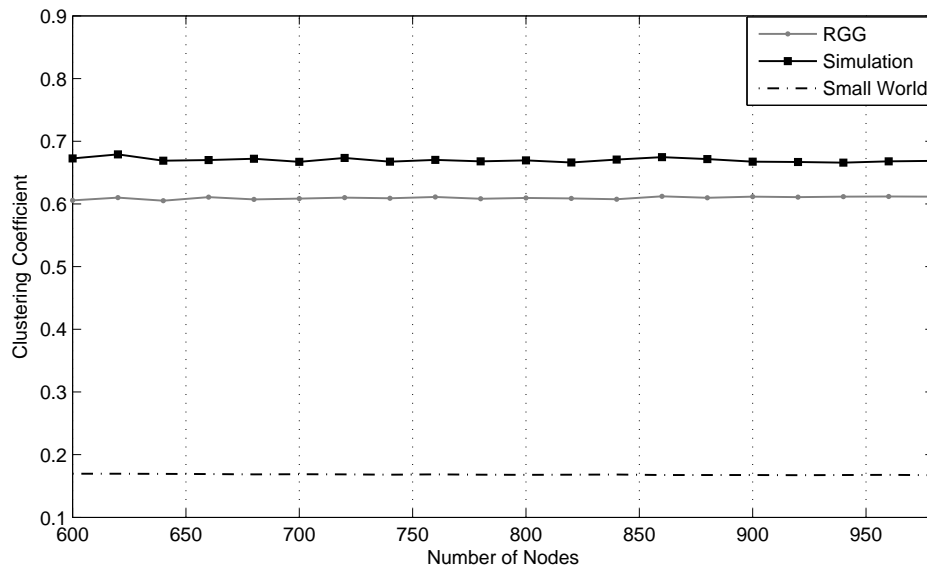


Σχήμα 5.18: Μέσο μήκος μονοπατιού σε δίκτυα τύπου small world

προκύπτει από το Σχήμα 5.17. Η αύξηση της ακτίνας σε τόσο μεγάλο βαθμό σημαίνει ότι πραγματοποιούνται συνδέσεις μεταξύ κόμβων που ενδεχομένως να απέχουν αρκετά ο ένας από τον άλλον, με αποτέλεσμα ο αριθμός των βημάτων μεταξύ τους να μειώνεται σημαντικά, σε ποσοστό έως και 70 %, όπως υποδεικνύει και το σχήμα. Το μέσο μήκος μονοπατιού για τα δίκτυα τύπου ‘μικρού-κόσμου’ παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα, κοντά στο 2, βάσει κατασκευής.

Όσον αφορά στον παράγοντα ομαδοποίησης, η συμπεριφορά είναι διαφορετική. Τα small-world δίκτυα, εξαιτίας της τυχαιότητας που τα χαρακτηρίζει έχουν μικρό παράγοντα ομαδοποίησης, προσεγγίζει αυτόν ενός τυχαίου γράφου. Από την άλλη, ο τυχαίος γεωμετρικός γράφος είναι ισχυρά ομαδοποιημένος δεδομένου ότι οι κόμβοι εντός της εμβέλειας των γειτόνων τους συνδέονται. Η προσθήκη συνδέσεων αναμένεται να αυξήσει τον παράγοντα ομαδοποίησης του αρχικού δικτύου, όπως και συμβαίνει. Αυτή η αύξηση δεν υπερβαίνει το 0.1 (απόλυτη τιμή) και καθιστά το δίκτυο ισχυρά ομαδοποιημένο.

Είναι σαφές ότι το παραγόμενο δίκτυο διατηρεί την ιδιότητα αυτή, ως γνήσιο δίκτυο

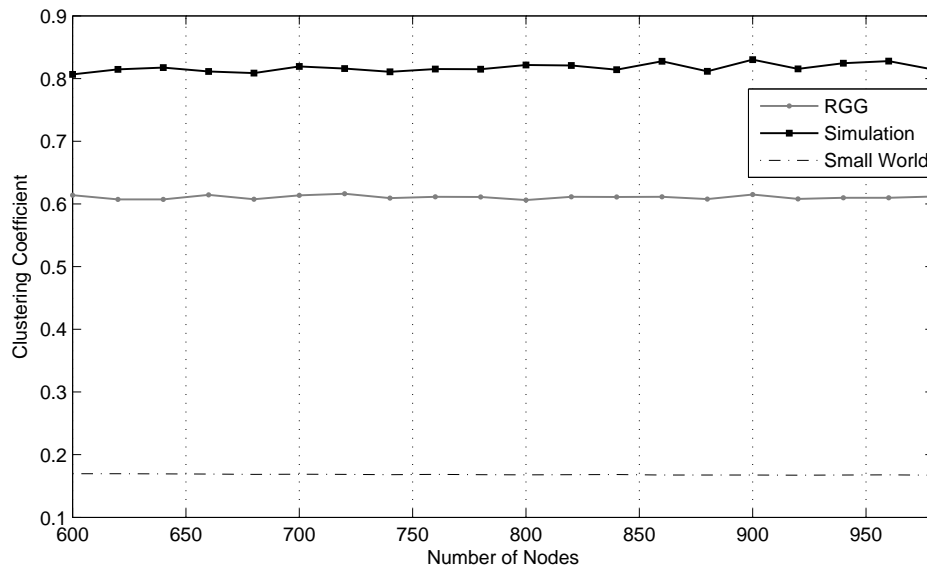


Σχήμα 5.19: Παράγοντας Ομαδοποίησης: Σύγκριση τυχαίου γεωμετρικού γράφου, δικτύου τύπου small-world και ετερογενούς δικτύου διαφορετικών ακτίνας μετάδοσης

αισθητήρων, αλλά παράλληλα τα μονοπάτια μειώνονται, όπως συμβαίνει στα δίκτυα τύπου small-world.

## 5.4 Σύγκριση Μοντέλων

Στην ενότητα αυτή γίνεται αντιπαράθεση του Μοντέλου Μεταβολής Βάσει Τοπολογίας, που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, με το Μοντέλο Μεταβολής Βάσει Βαθμού Κόμβου [20]. Η σύγκριση των δύο μοντέλων αποσκοπεί στην επιλογή του καταλληλότερου ανάλογα με την εφαρμογή και τις σχετικές απαιτήσεις. Στα Σχήματα 5.21, 5.22, παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα για το μέσο μήκος μονοπατιού και τον παράγοντα ομαδοποίησης αντίστοιχα. Το υπόμνημα αναφέρεται στην καμπύλη που προκύπτει με εφαρμογή του Μοντέλου Μεταβολής Βάσει Βαθμού Κόμβου, με τον όρο Node Degree Based Model, και στην καμπύλη του Μοντέλου Μεταβολής Βάσει Τοπολογίας ως

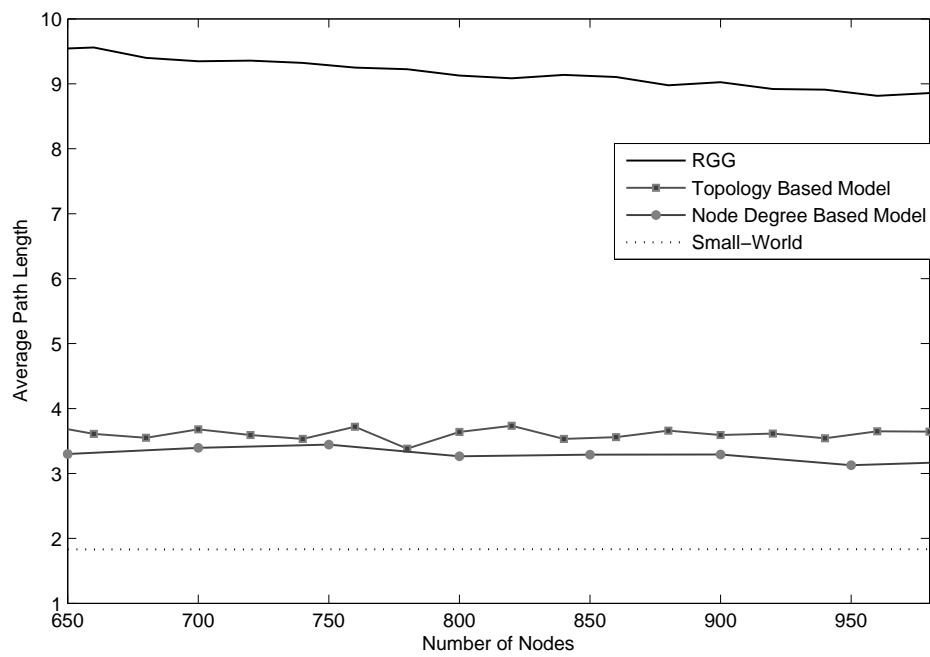


Σχήμα 5.20: Παράγοντας Ομαδοποίησης: Σύγκριση τυχαίου γεωμετρικού γράφου, δικτύου τύπου small-world και ετερογενούς δικτύου διαφορετικών ακτινών μετάδοσης

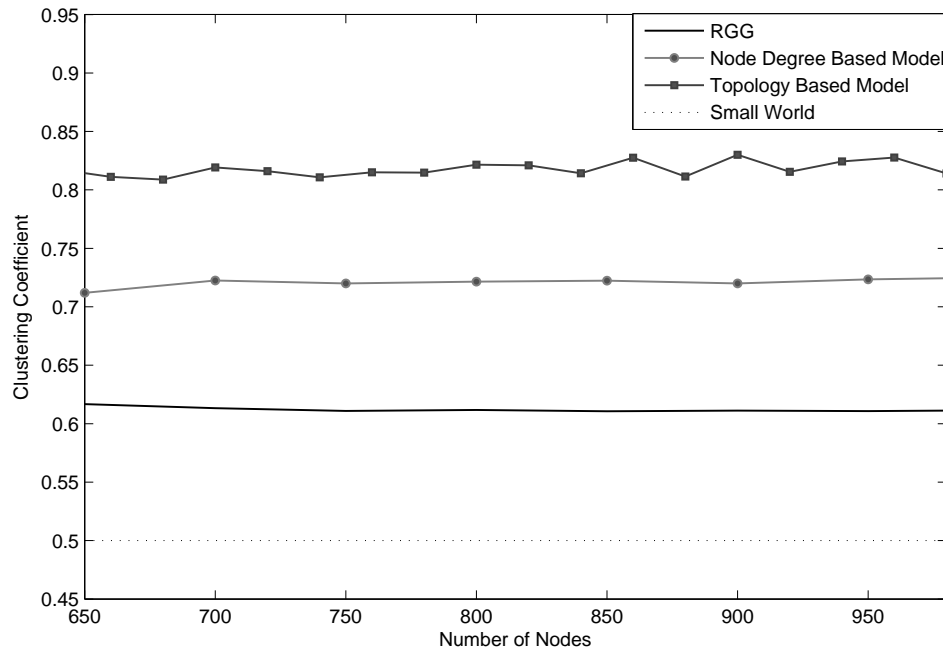
#### Topology Based Model.

Όσον αφορά στη μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού, παρατηρείται ότι τα δύο μοντέλα είναι εξίσου αποτελεσματικά. Οι τιμές που προκύπτουν για το μέσο μήκος μονοπατιού μετά την εφαρμογή κάθε μοντέλου βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, και προσεγγίζουν αυτές του small-world δικτύου. Δεδομένου ότι τα τελικά αποτελέσματα ταυτίζονται για τις δύο μεθόδους, συμπεραίνουμε ότι η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου επαφίεται 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, οι τιμές για τα δύο μοντέλα είναι μεν κοντά, παρουσιάζοντας όμως 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



Σχήμα 5.21: Μέσο Μήκος Μονοπατιού: Σύγκριση Μοντέλων



Σχήμα 5.22: Παράγοντας Ομαδοποίησης: Σύγκριση Μοντέλων

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. 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 σχετίζονται με το περιβάλλον εφαρμογής και το 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 συγκέντρωσης κόμβων σε ορισμένες 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 συστάδες είναι περισσότερο κατανεμημένες, σε όλη την περιοχή δικτύου.



# Κεφάλαιο 6

## Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα κύρια σημεία της μελέτης που πραγματοποιήθηκε και εξετάζονται οι δυνατότητες εφαρμογής ή και εξέλιξης του προτεινόμενου μοντέλου στα πλαίσια μελλοντικών εργασιών.

Η μοντελοποίηση των δικτύων του πραγματικού κόσμου αποτελεί καίριο αντικείμενο μελέτης διαφόρων επιστημονικών κλάδων. Η εστίαση στα βασικά χαρακτηριστικά των κοινωνικών δικτύων οδηγεί στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά και την εξέλιξη τους, αλλά κυρίως την χρησιμοποίησή τους στον τομέα επικοινωνιών.

Στην υλοποίηση που προτάθηκε, ένα τυπικό δίκτυο αισθητήρων υπέστη μια σειρά τροποποιήσεων με στόχο την απόκτηση χρήσιμων ιδιοτήτων, εμπνευσμένων από τα δίκτυα τύπου 'μικρού-κόσμου'. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων ανέδειξε την επίδραση της εφαρμογής του Μοντέλου Μεταβολής σε δύο βασικά μεγέθη του δικτύου: το μήκος μονοπατιού και τον παράγοντα ομαδοποίησης. Παρατηρήθηκε ότι το δίκτυο εμφάνισε αμιγώς συμπεριφορά δικτύου 'μικρού-κόσμου' παρόλο που δεν αλλοιώθηκε ο αρχικός του χαρακτήρας.

Το Μοντέλο Μεταβολής των Ιδιοτήτων Δικτύου Βάσει Τοπολογίας που αφορά κυρίως στα δίκτυα αισθητήρων - τα οποία αναπαρίστανται με τυχαίους γεωμετρικούς γράφους - συνίσταται στην διαδοχική αύξηση της ακτίνας μετάδοσης ορισμένων κόμβων οι οποίοι

επιλέγονται με κριτήριο τη θέση τους (τοπολογικά κριτήρια). Ο αριθμός των κόμβων που επιλέγονται κάθε φορά αποτελεί συνάρτηση του ρυθμού αύξησης της ακτίνας κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου και της πιθανότητας  $p$  (η οποία καθορίζει τον αριθμό των κόμβων που επιλέγονται σε δεύτερο επίπεδο για κάθε στάδιο εκτέλεσης). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα από τον χρήστη, μέσω του καθορισμού του αριθμού των σταδίων εκτέλεσης και της τιμής της πιθανότητας  $p$ .

Στο κύριο τμήμα της μελέτης πραγματοποιήθηκε μια σειρά προσομοιώσεων για διαφορετικές τιμές των μεγεθών αυτών καθώς και διαφορετικές τοπολογίες δικτύων. Τα δίκτυα που εξετάστηκαν, στην πλειοψηφία τους, παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά κατά την εφαρμογή του μοντέλου, με τις κύριες παραμέτρους τους να προσεγγίζουν τις επιθυμητές. Οι μηχανισμοί μετατροπής συντέλεσαν επιτυχώς στη μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού και την αύξηση του παράγοντα ομαδοποίησης, δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες των 'small-world' δικτύων. Από την άλλη, η κατανομή του βαθμού των κόμβων δεν επηρεάστηκε όσον αφορά στη μορφή της, γεγονός το οποίο συνεπάγεται τη διατήρηση του αυθεντικού χαρακτήρα του δικτύου αισθητήρων (η πλειοψηφία των κόμβων έχει βαθμό ίσο με τον μέσο βαθμό κόμβων του δικτύου - σχήμα καμπάνας).

Η ευελιξία του μοντέλου επιτρέπει την προσαρμογή του στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, με γνώμονα τις δυνατότητες των κόμβων και την επεκτασιμότητα του δικτύου. Οι διαδικασίες που περιλαμβάνονται στο μοντέλο απαιτούν εκ των προτέρων γνώση ορισμένων μεγεθών, γεγονός που ενδεχομένως να αποτελέσει στενωπό κατά την εφαρμογή του. Ανασταλτικό παράγοντα αποτελούν, επίσης, οι περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι του αρχικού δικτύου. Ωστόσο, η μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού υπαγορεύεται από τις απαιτήσεις της ταχείας και αποτελεσματικής μετάδοσης δεδομένων, που αποτελεί κίνητρο μεταβολής των ιδιοτήτων των σύγχρονων δικτύων αισθητήρων. Επίσης, είναι πιθανή η εφαρμογή του σε ανώτερα στρώματα της αρχιτεκτονικής δικτύων. Για παράδειγμα, μία παραλλαγή του μοντέλου ίσως να εξυπηρετούσε μελέτες σε επίπεδο δρομολόγησης.

Η δυνατότητα επέκτασης του μοντέλου αφήνει πολλά περιθώρια μελλοντικής εργασίας καθώς πολλές παράμετροι είναι δυνατόν να μεταβληθούν προς την επιθυμητή κατεύθυνση κατά περίπτωση. Μπορεί να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα του όταν αλλάζουν τα κριτήρια επιλογής των κόμβων, ή με τη θεώρηση κατευθυντικών εκπομπών. Θα μπορούσε επίσης να εξεταστεί η επίδρασή του σε δίκτυα αισθητήρων διαφορετικής τοπολογίας, δηλαδή κατανομής των κόμβων στον χώρο (εκθετική, τυχαία κτλ.). Παρά τον καθοριστικό ρόλο της ακτίνας μετάδοσης στην ανάλυση, δεν αποκλείεται η εφαρμογή του ακόμα και σε διαφορετικού τύπου δίκτυα, καθώς μία γνωστή τοπολογία επιτρέπει τη θεώρηση μιας δεδομένης εμβέλειας γύρω από έναν κόμβο για προσθήκη συνδέσεων.

## 6.1 Εφαρμογές

Συνοψίζοντας, η διαδικασία που έλαβε χώρα αφορούσε στο μοντέλο με έναν τυχαίο γεωμετρικό γράφο, του οποίου οι ιδιότητες μεταβάλλονται με τέτοιο τρόπο ώστε να καταλήξει σε ένα διαφοροποιημένο δίκτυο με χαρακτηριστικά small-world. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, πολλά από τα δίκτυα που συναντώνται στον πραγματικό κόσμο εμφανίζουν ιδιότητες που δεν αιτιολογούνται βάσει των μοντέλων του τυχαίου και του κανονικού γράφου, με αποτέλεσμα να μην εμπίπτουν σε καμία από τις κατηγορίες που ήταν γνωστές ως τώρα. Στην ενότητα 2.4 του Κεφαλαίου 2, αναφέρονται παραδείγματα τέτοιων δικτύων.

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα κύρια σημεία της μελέτης που πραγματοποιήθηκε και εξετάζονται οι δυνατότητες εφαρμογής ή και εξέλιξης του προτεινόμενου μοντέλου στα πλαίσια μελλοντικών εργασιών. Η μοντελοποίηση των δικτύων του πραγματικού κόσμου αποτελεί καίριο αντικείμενο μελέτης διάφορων επιστημονικών κλάδων. Η εστίαση στα βασικά χαρακτηριστικά των κοινωνικών δικτύων οδηγεί στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά και την εξέλιξη τους, αλλά κυρίως την χρησιμο-

ποίησή τους στον τομέα επικοινωνιών. Στην υλοποίηση που προτάθηκε, ένα τυπικό δίκτυο αισθητήρων υπέστη μια σειρά τροποποιήσεων με στόχο την απόκτηση χρήσιμων ιδιοτήτων, εμπνευσμένων από τα δίκτυα τύπου 'μικρού-κόσμου'. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων ανέδειξε την επίδραση της εφαρμογής του Μοντέλου Μεταβολής σε δύο βασικά μεγέθη του δικτύου: το μήκος μονοπατιού και τον παράγοντα ομαδοποίησης. Παρατηρήθηκε ότι το δίκτυο εμφάνισε αμιγώς συμπεριφορά δικτύου 'μικρού-κόσμου' παρόλο που δεν αλλοιώθηκε ο αρχικός του χαρακτήρας. Το Μοντέλο Μεταβολής των Ιδιοτήτων Δικτύου Βάσει Τοπολογίας που αφορά κυρίως στα δίκτυα αισθητήρων - τα οποία αναπαρίστανται με τυχαίους γεωμετρικούς γράφους - συνίσταται στην διαδοχική αύξηση της ακτίνας μετάδοσης ορισμένων κόμβων οι οποίοι επιλέγονται με κριτήριο τη θέση τους (τοπολογικά κριτήρια). Ο αριθμός των κόμβων που επιλέγονται κάθε φορά αποτελεί συνάρτηση του ρυθμού αύξησης της ακτίνας κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου και της πιθανότητας  $p$  (η οποία καθορίζει τον αριθμό των κόμβων που επιλέγονται σε δεύτερο επίπεδο για κάθε στάδιο εκτέλεσης). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα από τον χρήστη, μέσω του καθορισμού του αριθμού των σταδίων εκτέλεσης και της τιμής της πιθανότητας  $p$ . Στο κύριο τμήμα της μελέτης πραγματοποιήθηκε μια σειρά προσομοιώσεων για διαφορετικές τιμές των μεγεθών αυτών καθώς και διαφορετικές τοπολογίες δικτύων. Τα δίκτυα που εξετάστηκαν, στην πλειοψηφία τους, παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά κατά την εφαρμογή του μοντέλου, με τις κύριες παραμέτρους τους να προσεγγίζουν τις επιθυμητές. Οι μηχανισμοί μετατροπής συντέλεσαν επιτυχώς στη μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού και την αύξηση του παράγοντα ομαδοποίησης, δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες των 'small-world' δικτύων. Από την άλλη, η κατανομή του βαθμού των κόμβων δεν επηρεάστηκε όσον αφορά στη μορφή της, γεγονός το οποίο συνεπάγεται τη διατήρηση του αυθεντικού χαρακτήρα του δικτύου αισθητήρων (η πλειοψηφία των κόμβων έχει βαθμό ίσο με τον μέσο βαθμό κόμβων του δικτύου - σχήμα καμπάνας). Η ευελιξία του μοντέλου επιτρέπει την προσαρμογή του στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, με γνώμονα τις

δυνατότητες των κόμβων και την επεκτασιμότητα του δικτύου. Οι διαδικασίες που περιλαμβάνονται στο μοντέλο απαιτούν εκ των προτέρων γνώση ορισμένων μεγεθών, γεγονός που ενδεχομένως να αποτελέσει στενωπό κατά την εφαρμογή του. Ανασταλτικό παράγοντα αποτελούν, επίσης, οι περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι του αρχικού δικτύου. Ωστόσο, η μείωση του μέσου μήκους μονοπατιού υπαγορεύεται από τις απαιτήσεις της ταχείας και αποτελεσματικής μετάδοσης δεδομένων, που αποτελεί κίνητρο μεταβολής των ιδιοτήτων των σύγχρονων δικτύων αισθητήρων. Επίσης, είναι πιθανή η εφαρμογή του σε ανώτερα στρώματα της αρχιτεκτονικής δικτύων. Για παράδειγμα, μία παραλλαγή του μοντέλου ίσως να εξυπηρετούσε μελέτες σε επίπεδο δρομολόγησης.

Η δυνατότητα επέκτασης του μοντέλου αφήνει πολλά περιθώρια μελλοντικής εργασίας καθώς πολλές παράμετροι είναι δυνατόν να μεταβληθούν προς την επιθυμητή κατεύθυνση κατά περίπτωση. Μπορεί να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα του όταν αλλάζουν τα κριτήρια επιλογής των κόμβων, ή με τη θεώρηση κατευθυντικών εκπομπών. Θα μπορούσε επίσης να εξεταστεί η επίδρασή του σε δίκτυα αισθητήρων διαφορετικής τοπολογίας, δηλαδή κατανομής των κόμβων στον χώρο (εκθετική, τυχαία κτλ.). Παρά τον καθοριστικό ρόλο της ακτίνας μετάδοσης στην ανάλυση, δεν αποκλείεται η εφαρμογή του ακόμα και σε διαφορετικού τύπου δίκτυα, καθώς μία γνωστή τοπολογία επιτρέπει τη θεώρηση μιας δεδομένης εμβέλειας γύρω από έναν κόμβο για προσθήκη συνδέσεων.

Τα περισσότερα κοινωνικά δίκτυα μοντελοποιούνται με ακρίβεια μέσω τυχαίων γραφών, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως η ύπαρξη κόμβων με πολλές συνδέσεις, αλλά και ο μικρός μέσος αριθμός βημάτων που μεσολαβούν μεταξύ των κόμβων. Είναι, ωστόσο, δυνατόν να εμφανιστούν δίκτυα, τα οποία έπειτα από μία σειρά τροποποιήσεων και αναδιατάξεων να αποκτήσουν επιπρόσθετες ιδιότητες, με επίπτωση στη συνολική τους συμπεριφορά. Οι αλλαγές αυτές ενδεχομένως να οφείλονται σε εσωτερικές δυνάμεις (κατά τη φυσική εξέλιξη των δικτύων) ή να προέρχονται από εξωτερική παρέμβαση. Μία περίπτωση παρέμβασης μπορεί να ταυτιστεί με το μοντέλο που πραγματεύεται η παρούσα διπλωμα-

τική. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο παραδείγματα δικτύων, τα οποία θα μπορούσαν να μοντελοποιηθούν με τον τρόπο που παρουσιάστηκε προηγουμένως.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία ομάδα ανθρώπων, έστω οι επιβάτες μίας αεροπορικής πτήσης. Κάθε ένας από αυτούς αποτελεί κόμβο του δικτύου ενώ η σύνδεση μεταξύ τους πραγματοποιείται μόνο όταν δύο επιβάτες γνωρίζονται μεταξύ τους. Σε μία τυχαία πτήση, όταν δεν πρόκειται για μία οργανωμένη εκδρομή, η πιθανότητα να γνωρίζονται δύο επιβάτες που επιλέγονται τυχαία είναι μικρή. Κατά πάσα πιθανότητα, θα υπάρχουν ομάδες επιβατών αποτελούμενες από 2, 4 ή και παραπάνω άτομα με αυτήν την πιθανότητα να μειώνεται εκθετικά όσο αυξάνεται ο αριθμός. Μερικά παραδείγματα είναι δύο φίλοι που ταξιδεύουν μαζί, ένα ζευγάρι, δύο συγγενείς, μία τετραμελής οικογένεια, μία παρέα 5 ατόμων, κτλ. Κατά τη διάρκεια της πτήσης, δεν επιτρέπονται οι μετακινήσεις στους διαδρόμους. Οι θέσεις είναι αριθμημένες, και κάθε μια αντιστοιχεί σε έναν επιβάτη, γεγονός που καθορίζεται κατά τη διάρκεια του ελέγχου και είναι δεδομένο πριν την επιβίβαση. Άρα και η θέση του κάθε κόμβου είναι αυστηρά καθορισμένη, και γνωστή εκ των προτέρων. Η πιθανότητα να κάθονται πολύ κοντά δύο επιβάτες που γνωρίζονται είναι υψηλή, καθώς το πιθανότερο είναι να έβγαλαν τα εισιτήρια μαζί ή να έκαναν ταυτόχρονα check-in. Επομένως κόμβοι που συνδέονται βρίσκονται σε κοντινές θέσεις. Ως εδώ, το δίκτυο είναι αραιό και θυμίζει ένα δίκτυο αισθητήρων εφόσον έχουμε υποθέσει ότι οι γνωστοί κάθονται σε διπλάνες θέσεις. Υπάρχουν, σχεδόν σίγουρα, αρκετοί απομονωμένοι κόμβοι, ορισμένοι με βαθμό 2, 3 και λίγοι με βαθμό από 4 και πάνω.

Μετά την απογείωση, είναι πολύ πιθανό να γίνουν νέες γνωριμίες, ιδιαίτερα ανάμεσα σε δύο απομονωμένους επιβάτες που κάθονται σε διπλάνες θέσεις. Είναι λογικό να συμμετέχουν σε μια κοινή συζήτηση ή να μοιραστούν τις ανησυχίες τους. Καθώς περνάει η ώρα, ενδεχομένως να προστεθούν στην ίδια συζήτηση και οι επιβάτες των μπροστινών καθισμάτων. Έτσι, πολύ γρήγορα σχηματίζονται ομάδες. Αν οι μπροστινοί επιβάτες έχουν γνωρίσει και ένα ζευγάρι που κάθεται λίγο πιο δίπλα δημιουργούνται πιο μακρινές συνδέ-

σεις με αποτέλεσμα η ακτίνα των κόμβων να αυξάνεται. Ωστόσο, αν κάποιος βρίσκεται σε διαφορετικό θάλαμο, δεν είναι δυνατόν να πάρει μέρος στη συζήτηση άρα η σύνδεση δεν είναι εφικτή. Το δίκτυο που σχηματίζεται έχει υψηλό παράγοντα ομαδοποίησης αλλά το μέσο μήκος μονοπατιού παραμένει υψηλό.

Προκειμένου να αυξηθεί, θα μπορούσε να συμβεί το εξής. Μία αεροσυνοδός μοιράζει ενημερωτικά φυλλάδια αλλά εξαιτίας ενός απρόβλεπτου συμβάντος αναγκάζεται να αποχωρήσει. Προκειμένου να μην καθυστερήσει η διανομή, επιλέγει ορισμένους από τους επιβάτες δίνοντας τους έναν αριθμό φυλλαδίων για να τα διανεύουν, είτε οι ίδιοι ή οι διπλανοί τους σε μερικές θέσεις μπροστά και πίσω. Έτσι, η ακτίνα τους αυξάνεται και μέσω της διαπροσωπικής επαφής, δημιουργούνται και νέες συνδέσεις. Αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει κάποιου είδους συντόμευση. Υπάρχουν κι άλλα πιθανά περιστατικά που ενδεχομένως να πυροδοτούσαν τη δημιουργία συνδέσεων, όπως η συμπλήρωση κάποιας αίτησης όπου οι επιβάτες ενδεχομένως να ανταλλάξουν πληροφορίες ή να εκφράσουν τις απορίες τους προκειμένου να μην γίνει κάποιο λάθος. Οτιδήποτε κι αν προκάλεσε την ανάπτυξη σχέσεων μεταξύ των επιβατών, και κατ' επέκταση την αύξηση του μέσου αριθμού των συνδέσεων του δικτύου, το μέσο μήκος μονοπατιού του δικτύου μειώνεται συνεχώς και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο γράφος είναι μη κατευθυνόμενος, άρα κάθε σύνδεση είναι αμφίδρομη, η πτώση είναι ταχύτερη συγκριτικά με το δίκτυο της προσομοίωσης.

Ένα δεύτερο παράδειγμα αφορά ένα σιδηροδρομικό δίκτυο σε μία αραιοκατοικημένη περιοχή. Ας υποθέσουμε ότι μία κατασκευαστική εταιρία αναλαμβάνει την επέκταση του σιδηροδρομικού δικτύου ενός νομού, μέσω της δημιουργίας νέων γραμμών που θα συνδέουν άλλοτε απομονωμένες πόλεις, ή χωριά. Για τους ορεινούς οικισμούς, η επέκταση κρίνεται απαραίτητη για τον ανεφοδιασμό των κατοίκων, δεδομένου ότι η πρόσβαση με άλλα μέσα είναι δύσκολη. Στην περίπτωση αυτή, η δημιουργία μίας σήραγγας που διαπερνά το βουνό αποτελεί την πλέον κατάλληλη λύση. Έτσι, αφενός τα δρομολόγια δεν θα ακυρώνονται εξαιτίας δυσμενών καιρικών συνθηκών και αφετέρου η σύνδεση θα μπορεί να εξυπηρετήσει

περισσότερα από ένα γειτονικά χωριά, ίσως ακόμα και περιοχές που βρίσκονται από την άλλη πλευρά του ορεινού όγκου. Η νέα γραμμή μειώνει σημαντικά την απόσταση μεταξύ οποιονδήποτε γειτονικών χωριών που βρίσκονται στις ενδιάμεσες στάσεις. Ακόμα, η πρόσβαση σε πιο απομακρυσμένες περιοχές καθίσταται συντομότερη καθώς δεν είναι πλέον απαραίτητη η ανάβαση και κατάβαση ορεινών όγκων με οδικά μέσα.



# Βιβλιογραφία

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] C. Perkins and P. Bhagwat, “Highly dynamic destination-sequenced distancevector routing (DSDV) for mobile computers,” *Proc. of the Communications architectures, protocols and applications conference*, pp. 234-244, Aug. 1994.
- [5] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized link state routing protocol (OLSR),” IETF Request for Comments 3626, 2003.
- [6] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, “Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing,” IETF Request for Comments 3561, 2003.

- [7] S. Basagni, I. Chlamtac, V. R. Syrotiuk, and B. A. Woodward, “A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM),” *Proc. of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pp. 76-84, Oct. 1998.
- [8] D. Johnson, D. Maltz, and J. Broch, “DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks”, *in Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley, ch. 5, pp. 139-172, 2001.
- [9] R. Morris, F. Kaashoek, D. Karger, D. Aguayo, J. Bicket, S. Biswas, D. De Couto, and J. Li, “The grid ad hoc networking project”, <http://pdos.csail.mit.edu/grid/>, 2003.
- [10] 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.
- [11] R. Ramanathan, J. Redi, C. Santivanez, D. Wiggins, and S. Polit, “Ad hoc networking with directional antennas: A complete systems solution,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 3, pp. 496-506, Mar. 2005.
- [12] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, Aug. 2002.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] R. Albert and A-L Barabasi, “Emergence of Scaling in Random Networks”, *Science*, Vol. 286, No. 5439, pp. 509-512, Oct 1999.
- [17] Barabasi, Albert-Laszlo, “Scale-Free Networks”, *Scientific American*, 288:60-69, May 2003.
- [18] D.J.Watts and S.H.Strogatz, “Collective Dynamics of ‘Small-World’ Networks”, *Nature*, Vol. 393, pp. 440-442, Jun. 1998.
- [19] 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.
- [20] E. Stai, “Μηχανισμοί Μετατροπής Ιδιοτήτων Δικτύων Βασιζόμενοι στο Βαθμό Κόμβου με Εφαρμογές στα Αυτοργανούμενα και Κοινωνικά Δίκτυα ”, Diploma Thesis, National Technical University of Athens, Oct. 09.