

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Τμήμα Διδακτικής Τεχνολογίας και Ψηφιακών Συστημάτων

**ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΑΝΕΚΤΙΚΑ ΣΕ
ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΕΙΣ (DTN) ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΑ
ΔΙΚΤΥΑ**

Αθανάσιος Γρηγοριάδης

Η εργασία υποβάλλεται για την μερική κάλυψη των απαιτήσεων με στόχο την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Σπουδών στην Διδακτική Τεχνολογίας και Ψηφιακά Συστήματα του Πανεπιστημίου Πειραιώς

2008-9

РАНЕЕЗНАМО ПЕРПАА

Abstract

The notion of Delay Tolerant Networking (DTN) describes the ability of heterogeneous networks to enable efficient packet routing between nodes that are not always inbound or in operation. In order to increase the delivery probability of the messages, various routing protocols have been proposed by researchers. Moreover, basic concepts of delay-tolerant networking in social networks is studied in order to show the importance of this type of networking and the applications that are or will be using it in the near future.

Main goal of this M.Sc. Thesis is to study the corresponding routing protocols and show a comparison between them. Various routing protocols are tested through the Opportunistic Network Environment (ONE) Simulator. ONE simulates effectively the movement of nodes in delay-tolerant networks (DTNs) and provides to the user, the detailed results of the simulation. The DTN routing protocols that are tested and analyzed in the thesis are: Spray&Wait, MaxProp and Epidemic.

Keywords

Delay-tolerant networks, ONE simulator, opportunistic routing, nodes.

Περίληψη

Η έννοια των Δικτύων Ανεκτικών σε καθυστερήσεις (Delay Tolerant Networking -DTN) εμπεριέχει την ικανότητα ετερογενών δικτύων να δρομολογούν αποτελεσματικά και αξιόπιστα τα πακέτα μεταξύ κόμβων οι οποίοι βρίσκονται εκτός εμβέλειας ή/και εκτός λειτουργίας αρκετές ώρες της ημέρας. Επομένως, για να αυξηθεί η πιθανότητα παράδοσης των μηνυμάτων, έχουν προταθεί κατά καιρούς από την επιστημονική κοινότητα, κάποια πρωτόκολλα δρομολόγησης. Επιπροσθέτως, βασικές έννοιες της DTN δικτύωσης σε κοινωνικά δίκτυα μελετούνται ώστε να αποτυπωθεί η σημαντικότητα αυτού του τρόπου δικτύωσης και οι εφαρμογές οι οποίες θα χρησιμοποιούν αντίστοιχες τεχνικές στο προσεχές μέλλον.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη πρωτοκόλλων δρομολόγησης για δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών. Έτσι, διάφορα πρωτόκολλα ελέγχονται με τη χρήση του Opportunistic Network Environment (ONE) Simulator. Ο προσομοιωτής ONE, δύναται να προσομοιώσει επαρκώς την κίνηση κινούμενων κόμβων σε ένα δίκτυο πόλης και παρέχει στον χρήστη λεπτομερή αποτελέσματα προσομοίωσης. Τα DTN πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία αξιολογούνται και αναλύονται στην εργασία είναι τα: Spray&Wait, MaxProp και Epidemic.

Λέξεις κλειδιά

Δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις, ONE εξομοιωτής δικτύου, ευκαιριακή δρομολόγηση, κόμβοι.

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες στον Δρ κ. **Κώστα Τσαγκάρη** και στον συνάδελφό μου **Αντρέα** για την αμέριστη βοήθεια τους στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Περιεχόμενα

Abstract	3
Περίληψη	4
Ευχαριστίες	5
1. Εισαγωγή	10
1.1 Γενικά	10
2. Δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις	11
2.1 Γενικά	11
2.2 Ιστορικό	12
2.3 Εξέλιξη.....	12
2.4 Ανασκόπηση δικτύων.....	13
2.4.1 Κινητό ad-hoc δίκτυο (MANET)	13
2.4.2 Έξυπνο τροχαίο ad-hoc δίκτυο (InVANET).....	13
2.4.3 Δίκτυο mesh	14
2.4.4 Διαπλανητικό Διαδίκτυο	15
2.4.5 Προτυποποίηση πρωτοκόλλου διαστημικών επικοινωνιών.....	16
2.5 Ανασκόπηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης.....	17
2.5.1 Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV)	17
2.5.2 Dynamic Source Routing (DSR)	17
2.6 Δρομολόγηση δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις.....	19
2.6.1 Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε DTN	21
2.7 Αλγόριθμοι δρομολόγησης με αντιγραφή -πολλαπλή αποστολή	21
2.7.1 MaxProp.....	22
2.7.2 Resource Allocation Protocol for Intentional DTN routing (RAPID).....	25
2.7.3 Spray and Wait	26
2.7.4 Epidemic	27
2.7.5 PRoPHET.....	28
2.7.6 First Contact (Πρώτη Επαφή)	29
2.7.7 Direct Delivery (Απευθείας Παράδοση).....	30
3. Κοινωνικά δίκτυα	31
3.1 Γενικά	31
3.2 Ιστορικό	31
3.3 Βασικά χαρακτηριστικά.....	32
3.4 Αρχιτεκτονική	33
3.4.1 Δίκτυα αστέρα	33
3.4.2 Ολοκληρωμένα δίκτυα.....	34
3.4.3 Peer-to-Peer δίκτυα.....	35
3.4.4 Πλεονεκτήματα κοινωνικών δικτύων	36
3.5 Χρήση δρομολόγησης DTN σε κοινωνικά δίκτυα.....	37
3.5.1 Πρωτόκολλο Bundle για δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις.....	40
3.5.2 Χρόνος απόφασης δρομολόγησης και χρονοπρογραμματισμός	41
3.5.3 Παραδείγματα δρομολόγησης.....	43
3.5.4 Ενδεικτικό σενάριο δρομολόγησης	45
4. Προσομοίωση δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις	50
4.1 Γενικά	50

4.2 Παραμετροποίηση	50
4.3 Παραδοχές –Δομή αποτελεσμάτων.....	52
4.4 Spray & Wait.....	54
4.5 MaxProp.....	61
4.6 Epidemic	63
4.7 PRoPHET.....	66
4.8 First Contact (Πρώτη επαφή).....	68
4.9 Direct Delivery (Απευθείας παράδοση)	71
4.10 Σύγκριση σεναρίων.....	74
4.11 Διαπιστώσεις σεναρίων προσομοίωσης.....	79
5. Συμπεράσματα.....	83
5.1 Γενικά	83
5.2 Εργαλεία	83
5.3 Μελλοντικές δυνατότητες –Επεκτάσεις.....	83
Πηγές	85

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ενδεικτική αναδιοργάνωση τοπολογίας δικτύου mesh.....	15
Σχήμα 2.2: Ενδεικτική δρομολόγηση στο Διαπλανητικό Διαδίκτυο.....	16
Σχήμα 2.3: DSR μοντέλο επικοινωνίας.....	18
Σχήμα 2.4: Επίπεδα κινητικότητας κόμβων δικτύου.....	20
Σχήμα 2.5: Υπολογισμός κόστους διαδρομής στο MaxProp.....	24
Σχήμα 3.1: Ενδεικτική μορφή δικτύου αστέρα.....	33
Σχήμα 3.2: Ενδεικτική μορφή ολοκληρωμένου δικτύου.....	34
Σχήμα 3.3: Ενδεικτική μορφή δικτύου p2p.....	36
Σχήμα 3.4: Ενδεικτική διαδικασία ευκαιριακής αποθήκευσης και προώθησης με ενεργούς και ανενεργούς κόμβους.....	38
Σχήμα 3.5: Επίπεδο Bundle.....	40
Σχήμα 3.6: Κατηγοριοποίηση DTN ανά βαθμό βεβαιότητας.....	42
Σχήμα 3.7: Δρομολόγηση ανά επαφή.....	43
Σχήμα 3.8: Ενδεικτική ροή DTN δρομολόγησης.....	45
Σχήμα 3.9: Ενδεικτικό DTN δίκτυο.....	46
Σχήμα 3.10: Στρατηγική των 2 hops.....	47
Σχήμα 3.11: Epidemic Routing.....	48
Σχήμα 3.12: Επικοινωνία μεταξύ ετερογενών ασύρματων δικτύων.....	49
Σχήμα 4.1: ONE Simulator GUI (περίπτωση 7 κόμβων).....	55
Σχήμα 4.2: ONE Simulator GUI (περίπτωση 55 κόμβων).....	57
Σχήμα 4.3: ONE Simulator GUI (περίπτωση 100 κόμβων).....	59
Σχήμα 4.4: ONE Simulator GUI (περίπτωση 150 κόμβων).....	60
Σχήμα 4.5A: Σύγκριση σεναρίων –επιτυχείς παραδόσεις μηνυμάτων.....	74
Σχήμα 4.5B: Σύγκριση σεναρίων –πιθανότητα επιτυχούς παράδοσης.....	75
Σχήμα 4.6: Σύγκριση σεναρίων –μέση τιμή hops.....	76
Σχήμα 4.7: Σύγκριση σεναρίων –αριθμός μηνυμάτων (started-relayed-aborted).....	77
Σχήμα 4.8: Σύγκριση σεναρίων –λόγος relayed/delivered μηνυμάτων (overhead ratio).....	78
Σχήμα 4.9: Σύγκριση σεναρίων –μέση τιμή καθυστέρησης.....	79

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Σύγκριση συμβατικών IP-based δικτύων με DTN	39
Πίνακας 4.1: Αποτελεσματικότητα πρωτοκόλλων DTN	81

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η ραγδαία εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών σε συνδυασμό με την ανάγκη για εντατικοποίηση της εξερεύνησης του διαστήματος καθορίζουν το στόχο της παρούσας μελέτης ο οποίος είναι η εξέταση των δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις σε συνδυασμό με την τάση των κοινωνικών δικτύων.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά προσεγγίζονται και ορίζονται τα δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις, λαμβάνοντας υπόψη το ιστορικό τους, την εξέλιξη τους, τα νέα πρότυπα καθώς και τις τελευταίες πειραματικές εφαρμογές στη δρομολόγηση πακέτων σε τέτοιου είδους δίκτυα. Μεταξύ άλλων αναφέρονται το κινητό ad-hoc δίκτυο (MANET), το δίκτυο mesh, βασικά χαρακτηριστικά του διαπλανητικού διαδικτύου.

Μετάπειτα, ορίζονται τα χαρακτηριστικά των κοινωνικών δικτύων ενώ γίνεται και μία σύντομη ανασκόπηση στην ιστορική του εξέλιξη για να καταλήξουμε στις τεχνολογίες που εφαρμόζονται με έμφαση και σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις.

Τέλος, εκτός από το θεωρητικό μέρος της έρευνας, γίνεται προσπάθεια πρακτικής εφαρμογής των παραπάνω με την εκτέλεση χαρακτηριστικών προσομοιώσεων, υλοποιώντας πρωτόκολλα δρομολόγησης δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις.

2. Δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις

2.1 Γενικά

Τα δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις (Delay Tolerant Networks –DTN) ανήκουν στην κατηγορία των δικτύων υπολογιστών τα οποία αναλαμβάνουν τη διεκπεραίωση τεχνικών θεμάτων και τη διασύνδεση σε εξαιρετικά ετερογενή ασύρματα περιβάλλοντα ή μη-συμβατικά περιβάλλοντα όπως είναι για παράδειγμα [4]:

- Διασύνδεση κόμβων στο διαστημικό χώρο
- Διασύνδεση αμυντικών εφαρμογών υψηλής στρατηγικής σημασίας
- Αντιμετώπιση εξαιρετικών καταστροφών
- Υποθαλάσσια ασύρματη μετάδοση
- Κάποιες μορφές ad-hoc δικτύων
- Σύνδεση με το Διαδίκτυο σε περιοχές όπου η απόδοση με τους συμβατικούς τρόπους σύνδεσης κρίνεται αναξιόπιστη

Λόγω της ιδιομορφίας τους, η χρηματοδότηση τέτοιων έργων προωθείται από τους τομείς Έρευνας και Ανάπτυξης του Υπουργείου Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών και της Εθνικής Αεροναυτικής και Διαστημικής Διοίκησης των Ηνωμένων Πολιτειών (National Aeronautics and Space Administration). Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η καθυστέρηση ή διακοπή (disruption) της ροής μετάδοσης μπορεί να προκληθεί από παράγοντες όπως [4, 8]:

- Περιορισμοί στην ακτίνα εμβέλειας ασύρματης μετάδοσης
- Συχνή αποσύνδεση ή ευκαιριακή διαθεσιμότητα κόμβων
- Πολύ μεγάλη απόσταση μεταξύ κόμβων μετάδοσης
- Υψηλά ποσοστά σφαλμάτων μετάδοσης που οδηγούν σε αναξιόπιστία του καναλιού
- Περιορισμοί σε ενεργειακούς πόρους
- Θόρυβος
- Αστρικές /Ηλιακές καταιγίδες κτλ.

Για την κάλυψη των αναγκών ορισμού και προτυποποίησης των εν λόγω δικτύων, το 2007 συντάχθηκαν μελέτες (RFC –Request for Comments) οι οποίες εξετάζουν την αρχιτεκτονική [5] καθώς και πειραματικά πρωτόκολλα επικοινωνίας [6].

2.2 Ιστορικό

Οι πρώτες προσπάθειες διαπλανητικής επικοινωνίας μεταξύ δύο σημείων εντοπίζεται στη Σοβιετική Ένωση της δεκαετία του '50 με αφορμή την ανάπτυξη του δορυφόρου Sputnik 1. Μερικά έτη αργότερα, στην κούρσα κατάκτησης του διαστήματος εισέρχονται και οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, όπου συνέβαλαν στην κατανόηση της ιδέας σύνδεσης μεταξύ δύο σημείων επαφής σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα η οποία μάλιστα ενδέχεται να επηρεάζεται από διαπλανητικά εμπόδια (π.χ. άστρα, πλανήτες, φυσικοί δορυφόροι κ.ά.)

Επιπροσθέτως, κατά τις δεκαετίες '90-'00 εξελίχθηκε και η ιδέα του Διαπλανητικού Διαδικτύου (Interplanetary Internet) η οποία βασίζεται σε θεωρίες αιωρούμενων κόμβων αναμετάδοσης σε συγκεκριμένες αποστάσεις στον ευρύτερο διαστημικό χώρο. Έτσι, η επιστημονική κοινότητα στράφηκε στην ανάπτυξη αλγορίθμων αλλά και στην προσπάθεια κατανόησης και επίλυσης θεμάτων ασφάλειας, αξιοπιστίας και επιπέδου υπηρεσιών τα οποία στα συμβατικά δίκτυα υπολογιστών τείνουν να κατανοηθούν και να απαντηθούν.

2.3 Εξέλιξη

Κατά τις δεκαετίες '90-'00 πολλές προτάσεις που σχετίζονταν με τα πρωταρχικά στάδια της διαπλανητικής επικοινωνίας και την εξέλιξη των κινητών ad-hoc δικτύων συνδυάστηκαν με αποτέλεσμα τη δημιουργία ολοκληρωμένης δορυφορικής δικτύωσης για επικοινωνία γης-διαστήματος και παραπέρα. Επομένως οι τεχνολογικές καινοτομίες του επίγειου διαδικτύου πρέπει να εφαρμοστούν με την κατάλληλη διαμόρφωση [2] και στο διαπλανητικό με τη δημιουργία προτύπων και υποδομών στραμμένων προς αυτή την κατεύθυνση [3]. Οι πρόσφατες εξελίξεις βοηθούν στην ενοποίηση της έρευνας για τα κινητά ad-hoc δίκτυα με τη διαπλανητική δικτύωση προς επίτευξη του κοινού στόχου περί ανεκτικής σε καθυστερήσεις δικτύωσης.

Παράλληλα όμως, κρίνεται άκρως απαραίτητη η δημιουργία πρωτοκόλλων τα οποία θα υποστηρίζουν τις ιδιαιτερότητες της μετάδοσης στο

διάστημα αφού υπάρχει μεταξύ άλλων και ο περιορισμός της ταχύτητας του φωτός που στις επίγειες επικοινωνίες δεν λαμβάνεται υπόψη λόγω των μικρών συγκριτικά αποστάσεων. Αρκεί να αναλογιστούμε ότι χρειάζονται περίπου 1 δευτερόλεπτο για να ταξιδέψει το φως από τη γη στη σελήνη και 3 με 15 λεπτά για να φτάσει στον Άρη (αναλόγως τη θέση των πλανητών). Επομένως οι προσεγγίσεις δικτύωσης μεταξύ κόμβων από τη γη προς το διάστημα αλλά και προς άλλους κόμβους του διαστήματος δεν μπορούν να στηρίζονται στα σημερινά πρωτόκολλα TCP και IP επειδή δεν μπορεί εκ των προτέρων να διασφαλιστεί η συνεχής ζεύξη μεταξύ δύο σημείων [2].

2.4 Ανασκόπηση δικτύων

2.4.1 Κινητό ad-hoc δίκτυο (MANET)

Το κινητό ad-hoc δίκτυο είναι ένα αυτορρυθμιζόμενο δίκτυο κινητών δρομολογητών που συνδέονται μέσω ασύρματων ζεύξεων οι οποίες προκύπτουν από αυθαίρετη τοπολογία. Οι δρομολογητές έχουν την ικανότητα να κινούνται τυχαία και να οργανώνονται αυθαίρετα κάτι που οδηγεί στην εικόνα μίας δυναμικής τοπολογίας δικτύου η οποία αλλάζει γρήγορα και απροειδοποίητα [10]. Τέτοιου είδους δίκτυα μπορούν να λειτουργούν ως stand-alone ή να αποτελούν μέρος του ευρύτερου διαδικτύου και απέκτησαν ιδιαίτερη φήμη κατά τη δεκαετία του '90 όπου εντατικοποιήθηκε και προτυποποιήθηκε η ασύρματη δικτύωση υπολογιστών. Η IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) την τελευταία δεκαετία έχει αναπτύξει διάφορα πρότυπα για την ασύρματη δικτύωση κινητών συσκευών μεταξύ των οποίων και την ομάδα 802.11. Τα MANETs σχετίζονται άμεσα με τα mesh δίκτυα (δίκτυα τα οποία έχουν την ικανότητα να ανασχεδιάζουν τις διαδρομές δρομολόγησης όταν χάνονται ή εμφανίζονται νέοι κόμβοι στο δίκτυο –αναλύεται παρακάτω) με τη διαφορά ότι το MANET έχει να αντιμετωπίσει και ζητήματα που αφορούν την κινητικότητα των κόμβων [8].

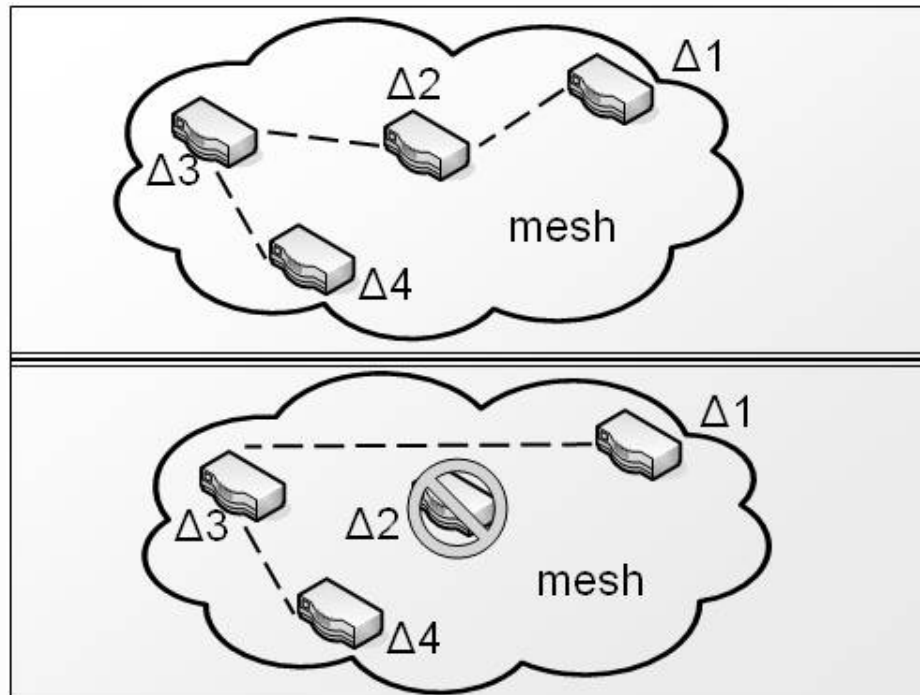
2.4.2 Έξυπνο τροχαίο ad-hoc δίκτυο (InVANET)

Το έξυπνο τροχαίο ad-hoc δίκτυο (InVANET) είναι μία διαφοροποίηση του VANET το οποίο χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων. Και σ' αυτού του είδους τα κινητά δίκτυα χρησιμοποιούνται πρότυπα της ομάδας

802.11 και 802.16 της IEEE για την παροχή εύκολων, αξιόπιστων και αποτελεσματικών επικοινωνιακών δυνατοτήτων μεταξύ πολλών οχημάτων εν κινήσει. Το InVANET έχει την ικανότητα να ανταποκρίνεται επιτυχώς και μεταξύ πυροβόλων οχημάτων κατά την περίοδο ασκήσεων των ενόπλων δυνάμεων. Άλλωστε η mesh δικτύωση (δίκτυα τα οποία έχουν την ικανότητα να ανασχεδιάζουν τις διαδρομές δρομολόγησης όταν χάνονται ή εμφανίζονται νέοι κόμβοι στο δίκτυο –αναλύεται παρακάτω) ήδη εφαρμόζεται σε κινητές εφαρμογές αμυντικού περιεχομένου.

2.4.3 Δίκτυο mesh

Αυτού του είδους η δικτύωση αποτελεί ένα τρόπο δρομολόγησης δεδομένων και φωνής μεταξύ κόμβων. Επιτρέπει τη συνεχή αναδιοργάνωση της διαδρομής μεταξύ των κόμβων σε περίπτωση προβληματικών σημείων μέχρι την άφιξη στον τελικό προορισμό των πακέτων. Η διαφορά τους με άλλα δίκτυα είναι ότι τα μέρη που το αποτελούν έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης μεταξύ των μέσω πολλαπλών βημάτων και συνήθως δεν βρίσκονται εν κινήσει (σε αντίθεση με τα προαναφερθέντα MANETs). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι πρόκειται για αυτοθεραπευόμενα δίκτυα [8] με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η κατάρρευση του δικτύου σε περιπτώσεις τεχνικών κολημάτων. Το Σχήμα 2.1 δείχνει μια τέτοια περίπτωση μετατροπής της δρομολόγησης μεταξύ $\Delta 1 \rightarrow \Delta 4$ σε περίπτωση αποσύνδεσης του $\Delta 2$ από το δίκτυο. Συγκεκριμένα αρχικά η διαδρομή αποτελείται από τους κόμβους/δρομολογητές $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3, \Delta 4$. Μόλις για οποιοδήποτε λόγο αποσυνδεθεί ο κόμβος $\Delta 2$, το δίκτυο αναδιοργανώνεται και περιλαμβάνει μόνο τους κόμβους/δρομολογητές $\Delta 1, \Delta 3, \Delta 4$ χωρίς να υπάρξει διακοπή λειτουργίας όλου του δικτύου. Συμπεραίνεται λοιπόν η δημιουργία αξιόπιστου ασύρματου ή ενσύρματου δικτύου. Τα ασύρματα mesh δίκτυα αναπτύχθηκαν πρωτίστως για κάλυψη μέρους των επικοινωνιακών αναγκών των ενόπλων δυνάμεων και εξελίχθηκαν την τελευταία δεκαετία ακολουθώντας την ευρύτερη τάση εξέλιξης των ασύρματων και κινητών επικοινωνιών σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας.

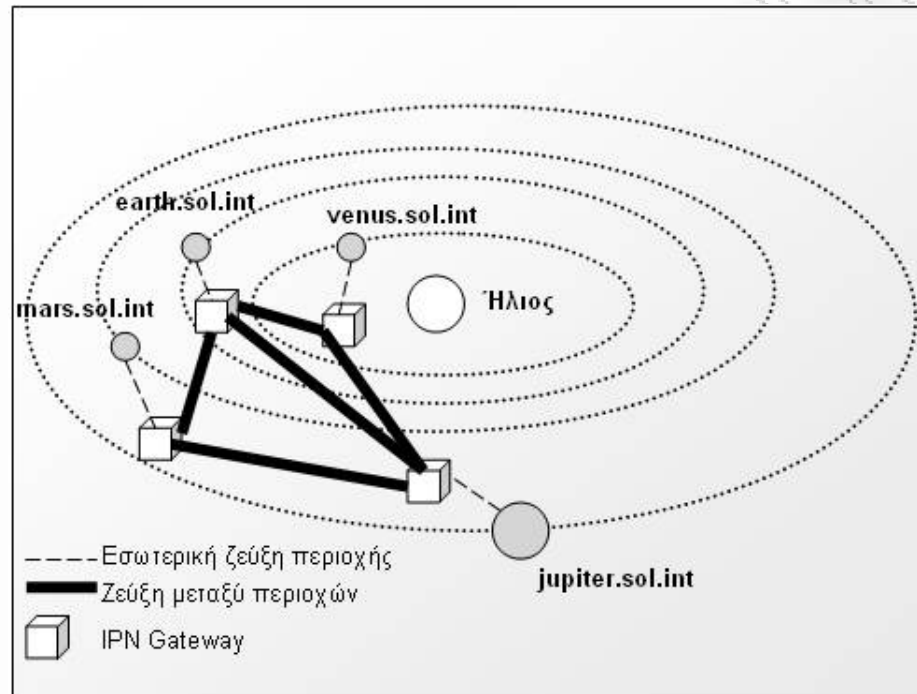


Σχήμα 2.1: Ενδεικτική αναδιοργάνωση τοπολογίας δικτύου mesh

2.4.4 Διαπλανητικό Διαδίκτυο

Το διαπλανητικό Διαδίκτυο ορίζεται ως ένα store-and-forward (αποθήκευσης και προώθησης) δίκτυο Διαδικτύων τα οποία ενδέχεται να βρίσκονται συχνά εκτός σύνδεσης, με μία ασύρματη ραχοκοκαλιά (backbone) επιρρεπή σε σφάλματα και καθυστερήσεις που διαρκούν από μερικά λεπτά μέχρι και ώρες ακόμα και στην περίπτωση όπου η σύνδεση κρίνεται ευνοϊκή (επειδή ακόμα και αν οι ενδιάμεσοι κόμβοι είναι σε λειτουργία και εντός εμβέλειας επικοινωνίας, το σήμα για να μεταδοθεί στο διάστημα με την ταχύτητα του φωτός απαιτεί αρκετές δεκάδες λεπτά λόγω των τεράστιων αποστάσεων) [8]. Αυτά λοιπόν τα 'υποδίκτυα' (μέρη του ευρύτερου διαπλανητικού δικτύου το οποίο είναι το κυρίως δίκτυο) αποτελούν περιοχές (regions) με συγκεκριμένα επικοινωνιακά χαρακτηριστικά. Κάθε περιοχή έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό το οποίο το γνωρίζουν και οι υπόλοιπες περιοχές, ενώ ο μόνος τρόπος για να ανταλλάξουν μηνύματα οι περιοχές μεταξύ τους είναι μέσω των DTN Gateways όπως απεικονίζει και το ακόλουθο σχήμα. Ενδεικτικά τα ονόματα περιοχών θα μπορούσαν να έχουν τη μορφή mars.sol.int ή earth.sol.int, όπου το πρώτο μέρος

είναι το αναγνωριστικό του πλανήτη (π.χ. mars, earth κτλ.), το δεύτερο προέρχεται από το ηλιακό σύστημα (solar system-sol), και το τρίτο από το διαπλανητικό διαδίκτυο (interplanetary internet –int) [7].



Σχήμα 2.2: Ενδεικτική δρομολόγηση στο Διαπλανητικό Διαδίκτυο

2.4.5 Προτυποποίηση πρωτοκόλλου διαστημικών επικοινωνιών

Το Space Communications Protocol (SCPS) είναι μία ομάδα υπαρχόντων και νέων πρωτοκόλλων η οποία αναπτύσσεται με απώτερο στόχο τη βελτίωση της απόδοσης των διαδικτυακών πρωτοκόλλων σε διαστημικές επικοινωνίες. Αποτελείται δε από τα [9]:

- SCPS/FP: Προέκταση του γνωστού FTP
- SCPS/TP: Προέκταση του γνωστού TCP το οποίο λαμβάνει υπόψη υψηλούς χρόνους καθυστέρησης, υψηλά ποσοστά σφαλμάτων, ασυμμετρία μετάδοσης κτλ. Ήδη χρησιμοποιείται για την βελτίωση της απόδοσης σε δορυφορικές ζεύξεις.
- SCPS/SP: Προέκταση του πρωτοκόλλου ασφάλειας IPsec.
- SCPS/NP: Βελτιωμένο πρωτόκολλο που ομοιάζει με το IP.

2.5 Ανασκόπηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης

2.5.1 Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV)

Αυτό το πρωτόκολλο δρομολόγησης σχεδιάστηκε πρωτίστως για κινητά ad-hoc δίκτυα (MANET) αλλά εφαρμόζεται και σε ασύρματα ad-hoc δίκτυα γενικότερα. Πρόκειται για ένα αντιδραστικό πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο δημιουργεί τις διαδρομές δρομολόγησης μετά από σχετικό αίτημα σε αντίθεση με άλλους αλγορίθμους δρομολόγησης του διαδικτύου οι οποίοι λειτουργούν προκαταβολικά (proactively), αναζητώντας διαδρομές ασχέτως αν πρόκειται να τις χρησιμοποιήσουν ή όχι [19]. Το AODV χρησιμοποιεί αύξοντες αριθμούς στις ανανεώσεις των διαδρομών, κάτι που πηγάζει από το Destination-Sequenced Distance Vector routing, το οποίο βασίζεται στον Bellman-Ford αλγόριθμο [8]. Επίσης, στο AODV, το δίκτυο παραμένει σε κατάσταση αναμονής μέχρι να χρειαστεί να δημιουργηθεί μια σύνδεση.

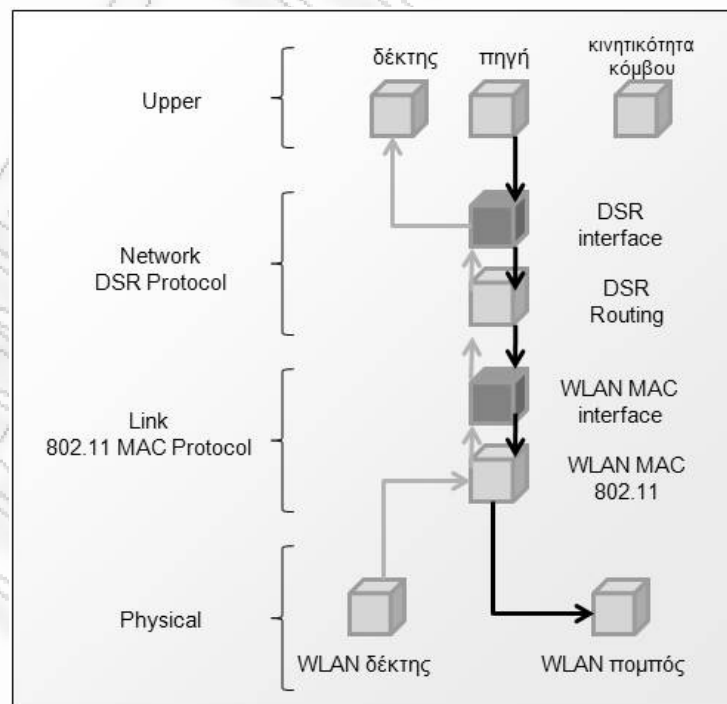
Μερικά από τα πλεονεκτήματα εντοπίζονται στο γεγονός ότι οι διαδρομές δημιουργούνται μετά από αιτήματα των κόμβων και έτσι γλιτώνεται η επιπρόσθετη συμφόρηση για επικοινωνία ανάμεσα σε ήδη υπάρχουσες διαδρομές. Επίσης η τεχνική θεωρείται σχετικά απλή, παρόλο που καμιά φορά ενδέχεται να χρειαστεί περισσότερος χρόνος για την δημιουργία μιας διαδρομής (επειδή δεν είναι γνωστές από πριν). Άλλο ένα σημείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι και οι αύξοντες αριθμοί του πίνακα δρομολόγησης, επειδή αν τύχει να μην έχουν ανανεωθεί πρόσφατα μπορεί να οδηγήσουν σε ακατάλληλες διαδρομές.

2.5.2 Dynamic Source Routing (DSR)

Πρόκειται για πρωτόκολλο δρομολόγησης σε ασύρματα mesh δίκτυα το οποίο ομοιάζει με το AODV στο σημείο της δημιουργίας διαδρομών μετά από αίτημα κάποιου κόμβου. Διαφέρει όμως στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί τα δεδομένα δρομολόγησης της πηγής, δηλαδή ολόκληρη η διαδρομή γνωστοποιείται στον αποστολέα και αποστέλλεται μαζί με τα δεδομένα. Επομένως η πηγή αναλαμβάνει τις αποφάσεις δρομολόγησης για κάθε δρομολογητή που συναντάει στη διαδρομή του το πακέτο. Επειδή όμως αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο μέγεθος κεφαλίδων των πακέτων (λόγω μεγάλων διευθύνσεων, μεγάλων διαδρομών κτλ.), το DSR μπορεί να υλοποιηθεί

εναλλακτικά με τον καθορισμό ενός flow_id το οποίο δίνει τη δυνατότητα στα πακέτα να προωθούνται ανά hop. Πάντως και αυτό το πρωτόκολλο είναι αντιδραστικό με αποτέλεσμα να εξαλείφεται η ανάγκη ανεύρεσης διαδρομών προς όλους τους άλλους κόμβους του δικτύου από πριν, αν και το μειονέκτημά του εντοπίζεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης ανανέωσης των άκυρων ζεύξεων με αποτέλεσμα να ενδέχεται να δημιουργηθούν ακατάλληλες διαδρομές που να διέρχονται μέσω μη διαθέσιμων κόμβων [20].

Στο Σχήμα 2.3 που ακολουθεί χρησιμοποιείται το OSI μοντέλο για την κατανόηση λειτουργίας του πρωτοκόλλου ανά επίπεδο όπως έχει καθοριστεί από το ενδεικτικό μοντέλο που υλοποιήθηκε από το National Institute of Standards and Technology [21]. Το φυσικό επίπεδο αποτελείται από τον πομπό και τον δέκτη του WLAN. Στο Data Link Layer γίνεται χρήση του Media Access Control (MAC) πρωτοκόλλου ενώ έχουμε και τη διεπαφή η οποία αναλαμβάνει την επικοινωνία με το επόμενο επίπεδο. Στο επίπεδο δικτύου έχουμε το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSR μαζί με τη διεπαφή η οποία και εδώ ευθύνεται για την επικοινωνία με τα ανώτερα επίπεδα, στα οποία ορίζεται η πηγή που δημιουργεί τα πακέτα δεδομένων και ο δέκτης που καταστρέφει το μήνυμα μετά την επιτυχή παραλαβή και επεξεργασία αυτού.



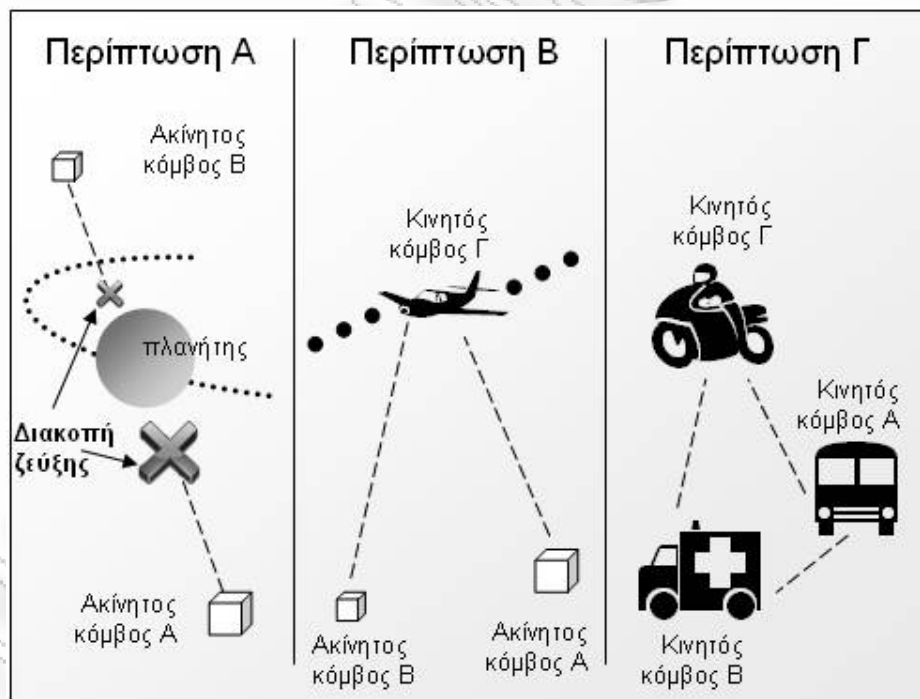
Σχήμα 2.3: DSR μοντέλο επικοινωνίας

2.6 Δρομολόγηση δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις

Το περιβάλλον στο οποίο καλούνται να ανταποκριθούν αυτού του είδους τα δίκτυα, χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες προκλήσεις στις οποίες ακόμη και οι δημοφιλείς αλγόριθμοι των ad hoc δικτύων αδυνατούν να φέρουν αποδεκτά αποτελέσματα όπως είναι π.χ. πρωτόκολλο δρομολόγησης Dynamic Source Routing που εφαρμόζεται στα ασύρματα mesh δίκτυα ή το Ad hoc On-Demand Distance Vector που εφαρμόζεται στα κινητά δίκτυα MANETs [11]. Αυτό το πρόβλημα συμβαίνει διότι τα παραπάνω πρωτόκολλα δρομολόγησης αναζητούν πρώτα να δημιουργήσουν μία ολοκληρωμένη διαδρομή και μετά την επιτυχή δημιουργία αυτής, προωθούν τα δεδομένα. Στις περιπτώσεις που μελετάμε όμως, γίνεται κατανοητό ότι είναι σχεδόν ανέφικτο να επιτευχθεί ολοκληρωμένη διαδρομή λόγω ιδιαίτερων συνθηκών και φυσικών περιορισμών, επομένως τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται πρέπει να ακολουθούν την τεχνική αποθήκευσης-και-προώθησης, μεταφέροντας έτσι τα δεδομένα από κόμβο σε κόμβο, όποτε αυτό κρίνεται εφικτό, με την ελπίδα ότι κάποια στιγμή θα φτάσουν στον τελικό προορισμό τους έστω και με μεγάλη καθυστέρηση. Για να επιτευχθούν αυξημένες μάλιστα πιθανότητες μεταφοράς θα μπορούσαν να παραχθούν μερικά αντίγραφα του μηνύματος τα οποία να αποστέλλονται ώστε κάποιο εξ' αυτών να καταφέρει να φτάσει στον τελικό προορισμό [8, 11].

Επιπροσθέτως, μελέτες εστιάζουν και στο κατά πόσο είναι εφικτό να γνωρίζουμε εκ των προτέρων αν η πληροφορία για μελλοντική σύνδεση μπορεί να προ-υπολογιστεί [11] ώστε να αποφύγουμε για παράδειγμα την παρεμβολή κάποιου πλανήτη στη διαδρομή μας. Επίσης λαμβάνεται υπόψη και η διαθεσιμότητα των κόμβων του δικτύου σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους. Για παράδειγμα στα κινητά τηλέφωνα υπάρχουν περιορισμοί αποθήκευσης [12], μπαταρίας κτλ., κάτι που δεν είναι πρόβλημα για τα κινητά οχήματα που χρησιμοποιούνται ως κόμβοι. Επομένως αποδεικνύεται άκρως σημαντική και η διαχείριση πόρων ώστε να μην περιορίζεται η επικοινωνία από κόμβους οι οποίοι αδυνατούν να διαχειριστούν τον εκάστοτε όγκο δεδομένων που μεταδίδεται.

Κάτι άλλο που δεν πρέπει να παρακαμφτεί είναι και ο εντοπισμός του επιπέδου κινητικότητας των κόμβων του δικτύου στο οποίο δραστηριοποιούμαστε. Ως προς αυτό λοιπόν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι κόμβοι είναι ακίνητοι και οι μόνες παρεμβολές προέρχονται από εξωτερικά εμπόδια όπως για παράδειγμα κίνηση πλανητών –διακοπή ζεύξης (Περίπτωση Α Σχήματος 2.4). Άλλη περίπτωση περιλαμβάνει κάποιους ακίνητους αλλά και κάποιους κινητούς κόμβους. Οι κινητοί κόμβοι είναι απαραίτητοι για την διαβίβαση του μηνύματος από τον ακίνητο κόμβο Α προς τον ακίνητο κόμβο Β επομένως πρέπει να αναρωτηθούμε πως θα γίνει η κατανομή των δεδομένων σ’ αυτούς τους κόμβους (Περίπτωση Β Σχήματος 2.4). Τέλος, ενδέχεται οι κόμβοι του δικτύου να είναι όλοι κινητοί [11], επομένως το πρωτόκολλο δρομολόγησης θα μπορούσε να έχει παραπάνω από μία επιλογές και να έχει τη δυνατότητα να μην χρησιμοποιεί όλους τους κόμβους προς την επίτευξη του αποτελέσματος (Περίπτωση Γ Σχήματος 2.4).



Σχήμα 2.4: Επίπεδα κινητικότητας κόμβων δικτύου

2.6.1 Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε DTN

Όπως προαναφέρθηκε, δεδομένων των ιδιοτήτων των δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις, γίνεται εφαρμογή τεχνικών:

- α) αντιγραφής και πολλαπλής αποστολής μηνύματος (πρωτόκολλα βασισμένα στην αντιγραφή) καθώς και
- β) αποθήκευσης-και-προώθησης όταν ο επόμενος αξιόπιστος κόμβος είναι σε λειτουργία και εντός εμβέλειας (πρωτόκολλα βασισμένα στην προώθηση).

Ένα ιδανικό σενάριο δρομολόγησης θα περιελάμβανε την αξιόπιστη αποστολή δεδομένων στον τελικό προορισμό ακόμα και όταν η συνδεσιμότητα του δικτύου παρουσιάζει διαλείψεις ή δεν υπάρχει (προσωρινά) ολοκληρωμένη διαδρομή end-to-end [11]. Παραταύτα, η ανωτέρω κατηγοριοποίηση των εν λόγω πρωτοκόλλων (δηλ. α)αντιγραφή και β)προώθηση) έχει κάποια μειονεκτήματα όπως για παράδειγμα [8]:

- Στην περίπτωση χρήσης προώθησης οι ρυθμοί παράδοσης μηνυμάτων δεν κρίνονται ιδιαίτερα αποδοτικοί σε αντίθεση με τη χρήση αντιγραφής (αφού υπάρχουν πολλαπλά αντίγραφα του μηνύματος στο δίκτυο.
- Στην περίπτωση χρήσης πρωτοκόλλων βασισμένα στην αντιγραφή, το μειονέκτημα επικεντρώνεται στην ενδεχόμενη κατάχρηση πολύτιμων δικτυακών πόρων (κάτι που αποφεύγεται με τη χρήση προώθησης).

2.7 Αλγόριθμοι δρομολόγησης με αντιγραφή -πολλαπλή αποστολή

Η δρομολόγηση με αλγόριθμους αυτού του είδους κερδίζει έδαφος έναντι της προώθησης, διότι επιτρέπει υψηλότερα ποσοστά επιτυχούς παράδοσης των μηνυμάτων. Όπως προαναφέρθηκε, δημιουργούνται ακριβή αντίγραφα των μηνυμάτων και μαζί με το πρωτότυπο μήνυμα εκπέμπονται στο δίκτυο. Παραταύτα, δεν σημαίνει ότι τα πάντα κρίνονται θετικά, διότι στις περιπτώσεις εφαρμογής τέτοιων αλγορίθμων λόγω του συνεχώς αυξανόμενου όγκου πληροφοριών οδηγούμαστε σε [8]:

- Συμφόρηση δικτύου

- Κατάχρηση πολύτιμων πόρων δικτύου (bandwidth, αποθήκευση, ενέργεια, επεξεργασία και συνεχής αντιγραφή πακέτων μηνυμάτων)
- Ανάγκη για αυξημένες δυνατότητες όγκου μετάδοσης και διαχείρισης πληροφοριών από το δίκτυο

Επομένως λόγω της πάντα περιορισμένης δυνατότητας όγκου διαχείρισης δεδομένων στα δίκτυα, οι αλγόριθμοι πρέπει να έχουν την ικανότητα εκτός των άλλων να διαβλέπουν και να αναγνωρίζουν εκ των προτέρων ποιά μηνύματα είναι επείγοντα και πρέπει να μεταδοθούν πρώτα και με τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση και ποιά μηνύματα μπορούν να απορριφθούν ή να αναμένουν.

2.7.1 MaxProp

Το MaxProp [16] είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις, το οποίο παρουσιάστηκε το 2006 και βασίζεται στην τεχνική της αντιγραφής και πολλαπλής αποστολής μηνυμάτων. Αναπτύχθηκε από τον τομέα επιστήμης υπολογιστών του Πανεπιστημίου της Μασαχουσέτης –ΗΠΑ, ενώ κάνει χρήση της προτεραιοποίησης των σημαντικών μηνυμάτων που πρέπει να μεταδοθούν πρώτα και το διαχωρισμό τους από αυτά που πρέπει να απορριφθούν. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον υπολογισμό των πιθανών ενεργών διαδρομών ανάμεσα στους κόμβους με βάση ιστορικά στοιχεία ενεργοποίησης και απενεργοποίησης αυτών, αλλά και σε συμπληρωματικά στοιχεία όπως acknowledgments, κεφαλίδες πακέτων και λίστες προηγούμενων κόμβων.

Σε ένα πραγματικό DTN δίκτυο αναγνωρίζονται τρία στάδια στα οποία λαμβάνουν χώρα οι δραστηριότητες. Αυτά είναι [16]:

1. Ανακάλυψη γειτονικών κόμβων: Οι κόμβοι πρέπει να ανακαλύπτουν τους γείτονές τους πριν προσπαθήσουν να μεταδώσουν κάποιο πακέτο, χωρίς να γνωρίζουν ακριβώς το χρόνο έναρξης της επόμενης ευκαιρίας μετάδοσης.
2. Μεταφορά δεδομένων: Σε αυτό το στάδιο πρέπει να λάβουμε ότι ακόμα και μετά την ανακάλυψη και σύνδεση με τον πλησιέστερο διαθέσιμο κόμβο, ο όγκος και ο χρόνος μετάδοσης είναι

περιορισμένος, χωρίς να γνωρίζουν την ακριβή διάρκεια διαθεσιμότητας

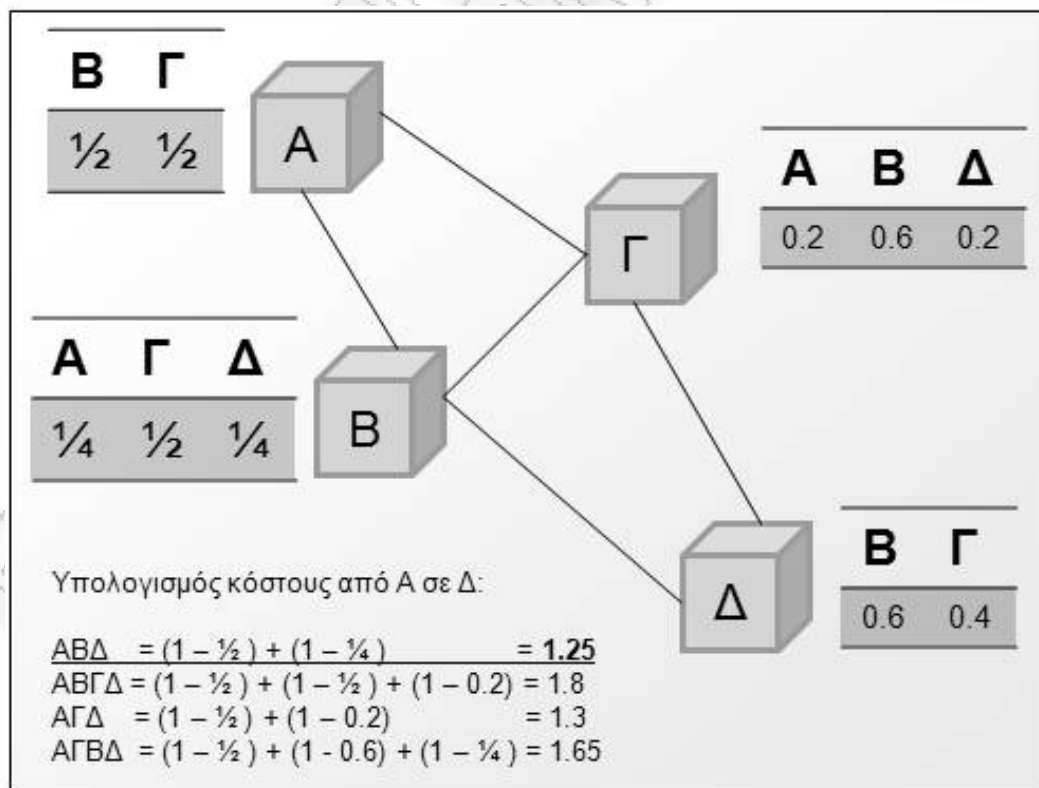
3. Διαχείριση αποθήκευσης: Καθώς τα πακέτα παραλαμβάνονται από κάποιο κόμβο, ο κόμβος πρέπει να έχει δυνατότητα να διαχειρίζονται με επάρκεια και ευελιξία το πεπερασμένο περιθώριο αποθήκευσης στο τοπικό buffer επιλέγοντας ποια πακέτα θα κρατήσει πρώτα και ποιά θα απορρίψει. Τα μηνύματα τα οποία αναμένονται ήδη από τον επόμενο διαθέσιμο κόμβο πρέπει να περάσουν στο επίπεδο εφαρμογής και να διαγραφούν από το τοπικό buffer.

Κάθε κόμβος μεταφέρει όλα τα μηνύματα μέχρι να συνδεθεί με κάποιον άλλο διαθέσιμο κόμβο. Το αντίγραφο μηνύματος θα συνεχίσει να προωθείται σε άλλους κόμβους μέχρι να φθάσει στον μέγιστο χρόνο ζωής του ή αν αποσταλεί στον προηγούμενο κόμβο ack ότι παραλήφθηκε επιτυχώς από τον επόμενο ή μέχρι να απορριφθεί λόγω γεμάτου buffer του κόμβου. Επιπροσθέτως, λαμβάνεται υπόψη το περιορισμένο και ασταθές bandwidth όταν οι δυνατότητες μετάδοσης χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μικρό χρόνο διαθέσιμης ζεύξης, ενώ και ο χώρος αποθήκευσης σε μικρές, κινητές, έξυπνες συσκευές όπως PDA ή κινητό τηλέφωνο δεν κρίνεται επαρκής για τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες αποθήκευσης των παραληφθέντων πακέτων.

Για τον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν τροποποιήσεις του αλγορίθμου Dijkstra. Όμως στην περίπτωση μας δεν υπάρχει στο δίκτυο καθολικός πίνακας που να υποδεικνύει μελλοντικές συνδέσεις. Επομένως το MaxProp χρησιμοποιεί την εξής τεχνική. Έστω ότι ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο ορίζεται ως s . Κάθε κόμβος i (όπου $i \in s$) παρακολουθεί την πιθανότητα σύνδεσης με τον κόμβο j (όπου $j \in s$) και διατηρεί έναν πίνακα μεγέθους $s - 1$. Για κάθε ένα από τα στοιχεία $s - 1$ του πίνακα, η πιθανότητα αρχικοποιείται σύμφωνα με τον τύπο $\frac{1}{|s|-1}$ και σημαίνει ότι ο κόμβος έχει την ίδια πιθανότητα να συνδεθεί αμέσως μετά με οποιοδήποτε άλλο κόμβο του δικτύου. Τη στιγμή που θα εντοπιστεί ο επόμενος κόμβος j το j -ιοστό στοιχείο του πίνακα αυξάνεται κατά 1 και ολόκληρος ο πίνακας

επανακανονικοποιείται, ώστε το άθροισμα των πιθανοτήτων να είναι ίσο με τη μονάδα. Να σημειωθεί σ' αυτό το σημείο ότι η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται τοπικά στον πίνακα του κάθε κόμβου και δεν μεταδίδονται στο δίκτυο στοιχεία για τη δρομολόγηση μεταξύ των κόμβων.

Όταν λοιπόν συνδεθούν επιτυχώς οι δύο κόμβοι πρώτα ανταλλάσσουν τους εκτιμώμενους πίνακες πιθανοτήτων σύνδεσης που έχει ο καθένας υπολογίσει. Με αυτούς τους s πίνακες λοιπόν (επειδή s είναι ο αριθμός των κόμβων του δικτύου), ο κόμβος μπορεί να υπολογίσει τη συντομότερη διαδρομή μέσω της βαρύτητας της κάθε διαδρομής. Ως βαρύτητα ορίζεται η διαφορά της μονάδας με την πιθανότητα σύνδεσης του κόμβου A με τον κόμβο B κ.ο.κ. Οι βαρύτητες προστίθενται ώστε να προκύψει το ολικό κόστος διαδρομής και υπολογίζονται για όλες τις πιθανές διαδρομές μέχρι το τελικό σημείο προορισμού του πακέτου. Η διαδρομή με τη μικρότερη ολική βαρύτητα επιλέγεται ως το κόστος για να φτάσουμε στο συγκεκριμένο προορισμό. Τα μηνύματα μετά ταξινομούνται σύμφωνα με τα κόστη προορισμού και μεταδίδονται ή απορρίπτονται σύμφωνα με αυτή τη σειρά.



Σχήμα 2.5: Υπολογισμός κόστους διαδρομής στο MaxProp

Το Σχήμα 2.5 δείχνει ότι σύμφωνα με τους πίνακες των κόμβων για να φθάσει ένα πακέτο από τον αρχικό κόμβο A στον τελικό κόμβο Δ θα βόλευε να ακολουθήσει τη διαδρομή ABΔ, επειδή το άθροισμα της βαρύτητας είναι μικρότερο από τις υπόλοιπες τρεις διαδρομές (1.25). Για να προκύψει αυτό το αποτέλεσμα υπολογίζεται πρώτα η βαρύτητα της διαδρομής $A \rightarrow B$ από τον τύπο:

$$\text{Βαρύτητα}_{A \rightarrow B} = (1 - P_{A \rightarrow B})$$

όπου στην περίπτωσή μας $P_{A \rightarrow B} = 0.5$.

Μετά ακολουθεί ο υπολογισμός βαρύτητας του σκέλους $B \rightarrow \Delta$ από τον τύπο:

$$\text{Βαρύτητα}_{B \rightarrow \Delta} = (1 - P_{B \rightarrow \Delta})$$

όπου στην περίπτωσή μας $P_{B \rightarrow \Delta} = 0.25$.

Τέλος αθροίζονται τα αποτελέσματα σύμφωνα με τον τύπο:

$$\text{Τελικό κόστος}_{AB\Delta} = \text{Βαρύτητα}_{A \rightarrow B} + \text{Βαρύτητα}_{B \rightarrow \Delta} = 1.25$$

και έτσι καταλήγουμε στον υπολογισμού κόστους διαδρομών από τον αρχικό κόμβο A στον τελικό κόμβο Δ. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.5, θεωρώντας πιθανές διαδρομές τις ABΔ, ABΓΔ, AΓΔ και AΓΒΔ, υπολογίζονται τα τέσσερα κόστη δρομολόγησης και επιλέγεται το μικρότερο εκ των τεσσάρων. Στην περίπτωση μας επιλέγεται η διαδρομή ABΔ.

2.7.2 Resource Allocation Protocol for Intentional DTN routing (RAPID)

Το RAPID [17] παρουσιάστηκε το 2007 και αναπτύχθηκε όπως το προηγούμενο, από τον τομέα επιστήμης υπολογιστών του Πανεπιστημίου της Μασαχουσέτης. Ακολουθεί κι αυτό την τεχνική αντιγραφής και πολλαπλής αποστολής του MaxProp. Η διαφορά του είναι ότι το RAPID στηρίζεται σε μία συνάρτηση χρησιμότητας. Η συνάρτηση αυτή δίνει μία τιμή στη μεταβλητή U_i για κάθε πακέτο i βασισόμενη σε κάποιο μέτρο z . Το U_i ορίζεται ως η αναμενόμενη συμβολή του πακέτου i στο μέτρο z . Έτσι, το RAPID καταφέρνει να αντιγράψει πρώτα τα μηνύματα τα οποία στον συγκεκριμένο κόμβο πετυχαίνουν την υψηλότερη αύξηση στην τιμή της χρησιμότητας U .

Αν για παράδειγμα το μέτρο που θέλαμε να υπολογίσουμε είναι η μέση καθυστέρηση τότε η συνάρτηση χρησιμότητας σύμφωνα με τη μελέτη [17] ορίζεται ως $U_i = -D(i)$, δηλαδή στην αρνητική τιμή της μέσης καθυστέρησης. Επομένως, σύμφωνα με τον αλγόριθμο, θα αντιγραφεί πρώτο το πακέτο που δίνει τη μεγαλύτερη μείωση της καθυστέρησης. Αν το μέτρο που θέλουμε να υπολογίσουμε είναι τα χαμένα deadlines τότε θέλουμε να πετύχουμε ελαχιστοποίηση αυτών των απωλειών. Η συνάρτηση χρησιμότητας έχει την εξής

μορφή: $U_i \begin{cases} P[a(i) < L(i) - T(i)], L(i) > T(i) \\ 0, L(i) < T(i) \end{cases}$, όπου $L(i)$ ο χρόνος ζωής του

πακέτου και $T(i)$ ο 'τρέχων' χρόνος. Το πακέτο που έχει ξεπεράσει το χρόνο ζωής (δηλ. $L(i) < T(i)$) δίνει στη συνάρτηση χρησιμότητας την τιμή 0, επειδή δεν μπορεί πλέον να αποδώσει κάτι. Τελικά, θα αντιγραφεί πρώτο το πακέτο που δίνει την υψηλότερη βελτίωση ανάμεσα στα πακέτα του buffer του κόμβου.

Γενικά στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο εντοπίζονται τέσσερα στάδια εκτέλεσης ως εξής:

- Αρχικοποίηση: εκτιμήσεις αρχικής χρησιμότητας πακέτων
- Απευθείας παράδοση: τα πακέτα που προορίζονται για άμεσους γειτονικούς κόμβους μεταδίδονται
- Αντιγραφή: τα πακέτα αντιγράφονται σύμφωνα με την τιμή της οριακής χρησιμότητας (δηλαδή τη χρησιμότητα πάνω στο μέγεθος του πακέτου)
- Τερματισμός: η διαδικασία τερματίζεται όταν χάνεται η σύνδεση των κόμβων ή όταν όλα τα πακέτα έχουν αντιγραφεί.

2.7.3 Spray and Wait

Το Spray and Wait [18] είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις το οποίο παρουσιάστηκε το 2005 και έχει υλοποιηθεί από το Πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνια, ΗΠΑ. Η διαφορά του εντοπίζεται στο γεγονός ότι επιτυγχάνει αποδοτική διαχείριση δικτυακών πόρων, θέτοντας ένα όριο στον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό των αντιγράφων ανά μήνυμα του δικτύου. Το πρωτόκολλο αποτελείται από δύο φάσεις. Την πρώτη φάση (spray) και τη δεύτερη φάση (wait). Με τη δημιουργία ενός νέου μηνύματος στο

σύστημα, ένα νούμερο L επισυνάπτεται στο μήνυμα, το οποίο υποδεικνύει το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό αντιγράφων που μπορούν να κινούνται στο δίκτυο. Έτσι, κατά την πρώτη φάση, το αρχικό μήνυμα διοχετεύει στο δίκτυο ένα αντίγραφο σε L ξεχωριστά 'relays'. Όταν κάποιο 'relay' λαμβάνει κάποιο αντίγραφο, τότε εισερχόμαστε στη δεύτερη φάση (της αναμονής), όπου το μήνυμα διατηρείται εκεί μέχρι να εντοπιστεί ο κόμβος προορισμού στο δίκτυο. Λόγω του ορισμού άνω ορίου αντιγράφων για κάθε μήνυμα επιτυγχάνεται αποδοτικότερη διαχείριση δικτυακών πόρων αποφεύγοντας το συνεχές και άσκοπο ενίοτε replication μηνυμάτων. Επομένως, μετρήσεις έχουν δείξει ότι έχει καλά επίπεδα επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων, χωρίς πολλά hops, χωρίς υψηλό overhead ratio και χωρίς υπερβολικό αριθμό μηνυμάτων που κινούνται στο δίκτυο (πρωτοτύπων και αντιγράφων). Ανάλυση και ποσοτικά στοιχεία δίδονται στο 4^ο Κεφάλαιο της παρούσας μελέτης.

2.7.4 Epidemic

Στόχοι του εν λόγω πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι:

- Η αποτελεσματική διανομή μηνυμάτων μεταξύ ευκαιριακών και πιθανολογικών συνδέσεων σε ad-hoc δίκτυα
- Η ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων αναγκών δικτυακών πόρων για την επιτυχή μετάδοση μηνυμάτων
- Μεγιστοποίηση της πιθανότητας επιτυχούς παράδοσης των μηνυμάτων (δηλαδή από την αφετηρία μέχρι τον τελικό προορισμό)

Στην epidemic δρομολόγηση, οι κόμβοι συνεχώς αντιγράφουν και μεταδίδουν μηνύματα σε νέους κόμβους οι οποίοι δεν έχουν ακόμα αποκτήσει κάποιο αντίγραφο του μηνύματος που μεταδίδουν. Για να επιτευχθεί αυτό, οι κόμβοι διατηρούν στο buffer τα μηνύματα ακόμα και όταν δεν υπάρχει ολοκληρωμένη διαδρομή μέχρι τον τελικό προορισμό. Ευρετήριο αυτών των μηνυμάτων καλείται summary vector και ανταλλάσσεται μεταξύ των κόμβων όταν αυτοί έλθουν σε επαφή. Μετά την ανταλλαγή κάθε κόμβος μπορεί να αξιολογήσει αν ο άλλος κόμβος έχει κάποιο μήνυμα το οποίο μέχρι τώρα ήταν άγνωστο σ' αυτό τον κόμβο. Σ' αυτή την περίπτωση ο κόμβος ζητεί το μήνυμα από τον άλλο κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι όσο υπάρχει διαθέσιμος χώρος στο buffer, τα μηνύματα

μπορούν να διαχέονται στο δίκτυο σαν επιδημία καθώς οι κόμβοι συναντιούνται και 'μολύνουν' ο ένας τον άλλον. Βασική προϋπόθεση αποτελεί το γεγονός παρουσίας ενός μοναδικού αναγνωριστικού σε κάθε μήνυμα, ώστε οι κόμβοι να αντιλαμβάνονται ποια μηνύματα έχουν και ποια όχι. Επιπροσθέτως γίνεται χρήση και ενός hop counter ώστε να γνωρίζουμε και να περιορίζουμε τα hops από την αφετηρία μέχρι τον τελικό προορισμό. Μηνύματα με 1 hop παραδίδονται μόνο στον τελικό προορισμό εφόσον υπάρξει ζεύξη. [31, 32, 33]

Μειονέκτημα της παρούσας μεθόδου δρομολόγησης αποτελεί το γεγονός ότι κατά την ανταλλαγή των μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων δεν λαμβάνεται υπόψη κάποια πληροφορία η οποία να δείχνει ότι ο νέος κόμβος που παραλαμβάνει αντίγραφο του μηνύματος θα συμβάλει και στην παράδοση μέχρι τον τελικό προορισμό. Δηλαδή, λαμβάνει το αντίγραφο μόνο και μόνο επειδή συναντήθηκε και μετά ενδέχεται να μην το παραδώσει κάπου αλλού ή εν τέλει να το απορρίψει μόλις γεμίσει το buffer. Έτσι δημιουργούνται αρκετά άσχετα αντίγραφα τα οποία δεν βοηθούν στην παράδοση στον τελικό προορισμό με αποτέλεσμα να αυξάνεται η χρήση πολύτιμων δικτυακών πόρων (αποθήκευση, επεξεργαστική ισχύς –αυξημένο overhead ratio) για ανούσια παραγωγή και αποθήκευση αντιγράφων.

2.7.5 PRoPHET

Το PRoPHET (Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity) εντάσσεται στην ομάδα των DTN πρωτοκόλλων πιθανολογικής δρομολόγησης (probabilistic routing). Η ομάδα ανάπτυξης βασίστηκε στην υπόθεση ότι οι χρήστες δεν κινούνται και τόσο τυχαία όσο πιστεύεται αλλά ακολουθούν καθημερινώς συγκεκριμένες διαδρομές οι οποίες μπορούν να προβλεφθούν. Επομένως, αν ένας κόμβος έχει ήδη επισκεφθεί μία περιοχή αρκετές φορές τότε θεωρείται αρκετά πιθανό να την ξαναεπισκεφθεί. Για τον υπολογισμό αυτής της πιθανότητας ορίζεται το μέτρο της προβλέψιμης παράδοσης $P_{(a,b)} \in [0,1]$ σε κάθε κόμβο a για κάθε γνωστό προορισμό b . Με αυτό το μέτρο δείχνουμε το πόσο πιθανό είναι ο κόμβος να παραδώσει κάποιο μήνυμα σ' αυτό τον προορισμό. Ο τρόπος υλοποίησης ομοιάζει με τον τρόπο υλοποίησης του epidemic, επειδή όταν συναντηθούν δύο κόμβοι ανταλλάσσουν summary

vectors οι οποίοι όμως στην περίπτωση του Prophet περιλαμβάνεται και η πιθανότητα πρόβλεψης παράδοσης που υπολογίζεται πρωτύτερα. Ο υπολογισμός της πιθανότητας $P_{(a,b)}$ πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Αρχικά πρέπει να ανανεωθεί η πιθανότητα κάθε φορά που συναντάμε έναν κόμβο ώστε οι κόμβοι που συναντιούνται πολύ συχνά να έχουν υψηλή πιθανότητα. Αυτό μπορεί να υπολογισθεί από τον ακόλουθο τύπο (όπου $P_{init} \in [0,1]$ είναι κάποια μεταβλητή αρχικοποίησης):

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)old} + (1 - P_{(a,b)old}) \times P_{init}$$

Στην περίπτωση που κάποιο ζεύγος κόμβων δεν συναντηθεί για αρκετό χρονικό διάστημα η πιθανότητα ‘ωριμάζει’ και μειώνεται. Ακολουθεί η συνάρτηση ωρίμανσης όπου $\gamma \in [0,1]$ είναι η μεταβλητή ωρίμανσης και, k ο αριθμός της μονάδας χρόνου που έχει περάσει από την στιγμή που έλαβε χώρα η τελευταία ‘ωρίμανση’ του μέτρου:

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)old} \times \gamma^k$$

Επίσης μπορεί να ισχύσει και η ιδιότητα ότι αν ο κόμβος A συναντά συχνά τον B και ο B με τη σειρά του τον Γ, τότε είναι αρκετά πιθανό ο κόμβος Γ να θεωρηθεί κατάλληλος κόμβος για λήψη μηνυμάτων που προορίζονται για τον κόμβο A. Ο τύπος που ακολουθεί δείχνει την επίδραση της ιδιότητας στην πιθανότητα πρόβλεψης παράδοσης, όπου $\beta \in [0,1]$ είναι μία μεταβλητή η οποία αποφασίζει τη βαρύτητα που θα έχει η προαναφερθείσα ιδιότητα στον υπολογισμό της πιθανότητας:

$$P_{(a,c)} = P_{(a,c)old} + (1 - P_{(a,c)old}) \times P_{(a,b)} \times P_{(b,c)} \times \beta$$

Πλεονέκτημα του Prophet έναντι του Epidemic αποτελεί το μικρότερο overhead ratio και η κάπως υψηλότερη πιθανότητα παράδοσης καθώς τα μηνύματα αποστέλλονται σε ‘καλούς’ κόμβους με υψηλή πιθανότητα επικοινωνίας με τον κόμβο του τελικού προορισμού σε αντίθεση με το Epidemic το οποίο απλώς αποστέλλει σε όποιο κόμβο συναντήσει [32].

2.7.6 First Contact (Πρώτη Επαφή)

Σε αυτή τη μέθοδο δρομολόγησης τα μηνύματα δεν αντιγράφονται και ακολουθούν τυχαίες διαδρομές. Το επόμενο hop επιλέγεται τυχαία μεταξύ των διαθέσιμων γειτονικών κόμβων, αν υπάρχουν. Αλλιώς μεταδίδεται στον πρώτο

κόμβο που θα αναγνωρισθεί. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει αλληπάλληλα hops μεταξύ των κόμβων για αρκετή ώρα με αποτέλεσμα να αυξάνεται υπέρμετρα το hop count. Η επιλογή του επόμενου hop δεν εξαρτάται από το αν θα συμβάλει στην παράδοση στον τελικό προορισμό, αλλά απλώς μεταδίδει, οδηγώντας στην ανούσια μετάδοση μηνυμάτων στο δίκτυο καταναλώνοντας παράλληλα πολύτιμους δικτυακούς πόρους [33].

2.7.7 Direct Delivery (Απευθείας Παράδοση)

Στην απευθείας μετάδοση η πηγή του μηνύματος διατηρεί το μήνυμα (χωρίς αντίγραφα) μέχρι να έλθει σε επαφή με τον κόμβο τελικού προορισμού του μηνύματος. Σε αυτή τη μέθοδο γίνεται χρήση ελαχίστων πόρων καθώς τα μηνύματα μεταδίδονται μία και μόνο φορά (κατευθείαν στον κόμβο προορισμού). Μειονέκτημα είναι ότι εμφανίζονται υψηλές καθυστερήσεις περιμένοντας τη συνάντηση με τον τελικό κόμβο προορισμού και η πιθανότητα επιτυχούς παράδοσης είναι πάρα πολύ μικρή διότι είναι δύσκολο σε DTN περιβάλλον να συναντήσουμε αμέσως τον τελικό παραλήπτη. [33].

3. Κοινωνικά δίκτυα

3.1 Γενικά

Τα κοινωνικά δίκτυα εμφανίζουν την τάση να δημιουργούνται και να εξελίσσονται χωρίς να είναι προσχεδιασμένα [15]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Διαδίκτυο, το οποίο έχει εξελιχθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες παρεκκλίνοντας από τους αρχικούς λόγους δημιουργίας του. Μάλιστα αποτελεί υβριδικό μοντέλο κοινωνικού δικτύου, καθώς ενώ πρόκειται για ένα φυσικό δίκτυο, το κόστος δημιουργίας σύνδεσης προς αυτό δεν είναι υψηλό (σε σχέση με άλλα φυσικά δίκτυα, στα οποία πρέπει να επενδύσουμε σε υποδομές). Επιπροσθέτως, δίδεται έμφαση στην πολυπλοκότητα και την εξωστρέφεια αυτού επειδή το Διαδίκτυο αφενός είναι ένα ανοιχτό δίκτυο το οποίο επιτρέπει εύκολα την εισαγωγή και εξαγωγή κόμβων από οπουδήποτε και αφετέρου αποτελείται από πάρα πολλούς κόμβους, διαδρομές, τοπολογίες κάνοντας πολύπλοκο τον έλεγχο του από οποιοδήποτε προσπαθήσει να το ελέγξει (κακόβουλα ή καλόβουλα).

Γενικότερα, με την ανάλυση κοινωνικών δικτύων γίνεται προσπάθεια εντοπισμού και απεικόνισης σχέσεων ανάμεσα σε ξεχωριστές οντότητες κοινωνικών δικτύων. Τέτοιες οντότητες μπορεί να είναι άτομα, οργανισμοί, ιστοσελίδες κτλ. Επίσης, η εν λόγω ανάλυση κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη και για την παρακολούθηση δικτύων, καθώς μέσω του εντοπισμού των επικοινωνιακών ροών, υπάρχει η δυνατότητα αναγνώρισης της δομής του δικτύου. Υποκατηγορία της ανάλυσης κοινωνικών δικτύων αποτελεί και η ανάλυση ζεύξης η οποία ερευνά σχέσεις μεταξύ αντικειμένων, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα εφαρμογής της στις επιστήμες επικοινωνιών και πληροφοριών με απώτερο στόχο την κατανόηση των δομών των συλλογών από ιστοσελίδες [8].

3.2 Ιστορικό

Το διαδίκτυο, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα κοινωνικού δικτύου ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας '60 με την ονομασία ARPANET υπό την υποστήριξη του Defense Advanced Research Projects Agency και του Υπουργείου Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών. Στις αρχές της δεκαετίας '80 το

ARPANET υιοθέτησε ως δικτυακό πρωτόκολλο επικοινωνίας το TCP/IP, θέτοντας τις βάσεις για την ανάπτυξη του παγκοσμίου ιστού. Παράλληλα η ικανότητα “generic” ανάπτυξης του έχει οδηγήσει στην τεράστια εξέλιξη και αναγνώριση του από το ευρύ κοινό τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ υπολογίζεται ότι μέχρι το 2011 το ¼ του πληθυσμού της γης θα απολαμβάνει διαδικτυακές υπηρεσίες, ενώ υψηλότεροι ρυθμοί ανάπτυξης αναμένονται σε Κίνα, Ινδία, Βραζιλία. Επιπροσθέτως, το όραμα του Tim Berners-Lee για το World Wide Web, πλησιάζει στη μορφή ενός p2p ad-hoc δικτύου, θεωρώντας ότι κάθε χρήστης είναι ενεργός συντάκτης και δημιουργός υπερσυνδέσεων με απώτερο στόχο τη δημιουργία ιστού συνδέσεων. Σήμερα, η p2p αρχιτεκτονική περιλαμβάνει βασικά χαρακτηριστικά του διαδικτύου, τα οποία είχαν ειπωθεί το 1969 από τον Steve Crocker [23] και είναι ευρέως γνωστά με κάποιες μικρές παραλλαγές όπως η ανταλλαγή πολυμεσικών αρχείων με την απουσία κεντρικών indexing servers.

3.3 Βασικά χαρακτηριστικά

Βασικό στοιχείο στη χρήση του διαδικτύου αποτελεί και η ταχύτητα με την οποία μπορεί να προσπελαστεί η πληροφορία, όπως για παράδειγμα πόσα clicks χρειάζονται για να βρούμε αυτά που χρειαζόμαστε σε μία ιστοσελίδα. Για τη μεγιστοποίηση της χρηστικότητας των ιστοσελίδων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη μερικές από τις ακόλουθες παραμέτρους:

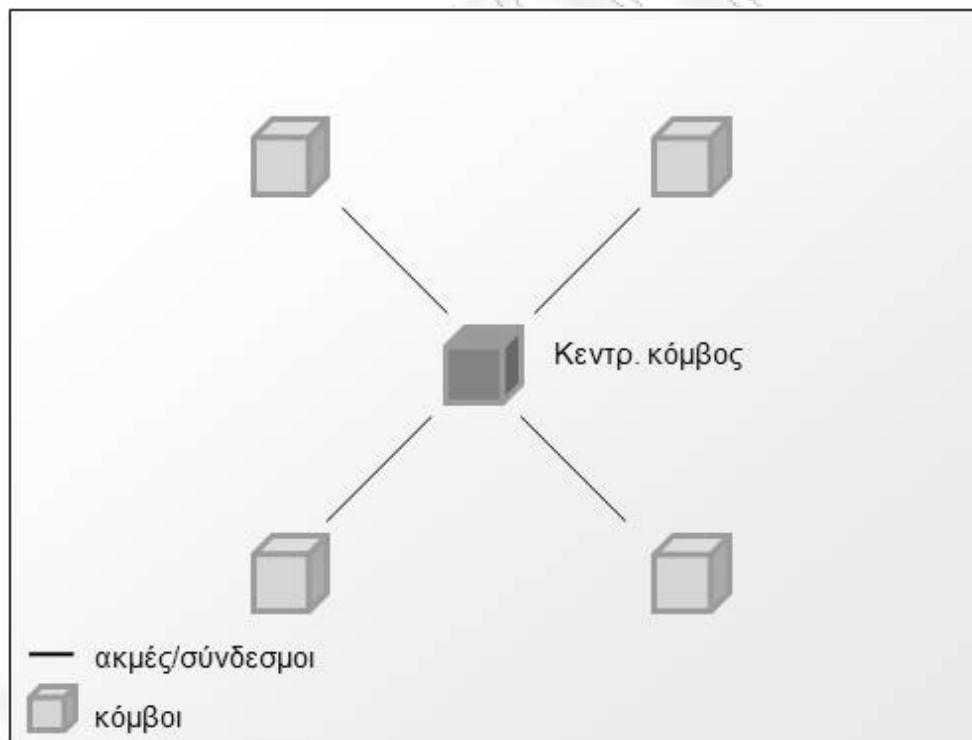
- Ο αριθμός των clicks και των σελίδων που πρέπει να προσπελαστούν. Πιο συγκεκριμένα αυτή η παράμετρος ονομάζεται και απόσταση μεταξύ των κόμβων και ορίζεται ως ο ελάχιστος των clicks που χωρίζουν τον χρήστη από το σημείο που βρίσκεται η πληροφορία.
- Ο βαθμός πολυπλοκότητας των σελίδων, όπου στην περίπτωση υψηλού βαθμού πολυπλοκότητας (δηλ. όταν ο αριθμός των υπερσυνδέσεων σε κάθε σελίδα είναι υψηλός) αυξάνεται και ο χρόνος αναζήτησης του χρήστη.
- Το απευθείας κόστος διατήρησης και συντήρησης υπερσυνδέσεων από το homepage του χρήστη προς άλλες σελίδες.
- Η πραγματική ταχύτητα σύνδεσης μεταξύ των κόμβων σε συνδυασμό με την απόσταση μεταξύ των κόμβων (που ορίστηκε παραπάνω).

3.4 Αρχιτεκτονική

Στα κοινωνικά δίκτυα, όπως στην περίπτωση του παγκοσμίου ιστού, οι αρχιτεκτονικές μορφές των μπορούν σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα να ορισθούν ως: α) αστέρα, β) ολοκληρωμένο δίκτυο. Βέβαια στο μέλλον δεν αποκλείεται να εμφανιστούν και άλλες αρχιτεκτονικές οι οποίες ίσως θα έχουν καλύτερη απόδοση και αποτελέσματα.

3.4.1 Δίκτυα αστέρα

Στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί εμφανίζεται μία ενδεικτική μορφή δικτύου αστέρα, στην οποία οι ιστοσελίδες απεικονίζονται ως κόμβοι, ενώ οι υπερσύνδεσμοι που οδηγούν σε άλλες ιστοσελίδες απεικονίζονται ως ακμές/σύνδεσμοι.



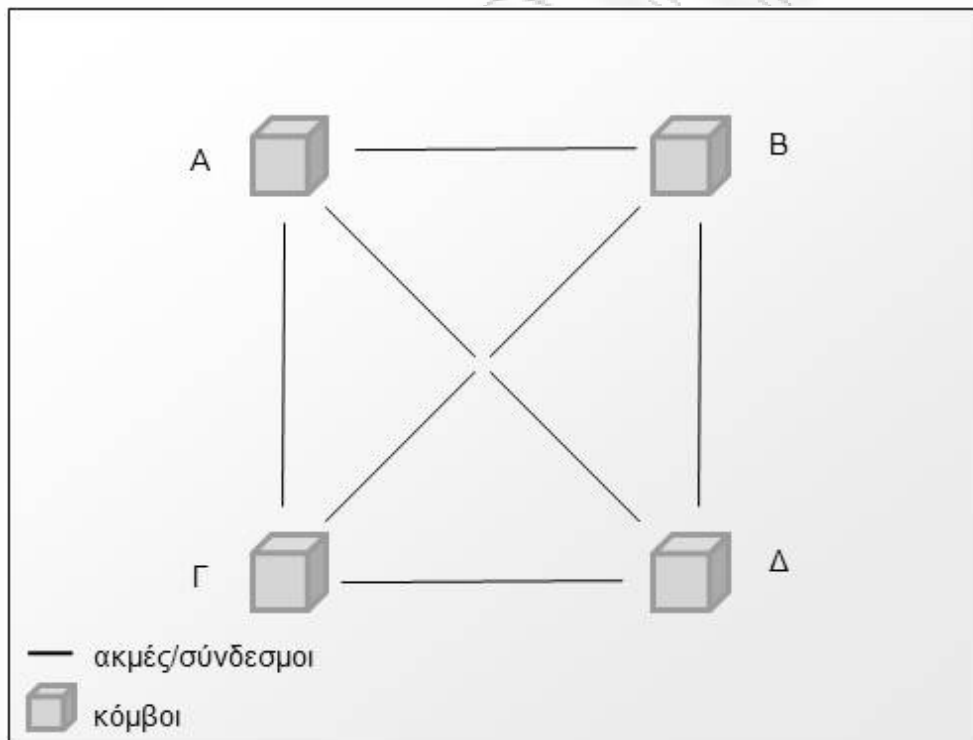
Σχήμα 3.1: Ενδεικτική μορφή δικτύου αστέρα

Στην περίπτωση εφαρμογής του δικτύου μορφής αστέρα με χρήση κάποιου κεντρικού κόμβου, ο κεντρικός κόμβος δεν λειτουργεί ως απλή ιστοσελίδα όπως οι υπόλοιποι αλλά ως κόμβος αναζήτησης και καταχώρησης υπερσυνδέσεων προς άλλες ιστοσελίδες (π.χ. Google, Yahoo). Επομένως, σε αυτόν τον κόμβο όσο πιο υψηλός είναι ο αριθμός των διαθέσιμων υπερσυνδέσεων, τόσο πιο υψηλός είναι και ο βαθμός επισκεψιμότητας. Αν αυτά

τα χαρακτηριστικά συνδεθούν με ανάλογη συνάρτηση αποδοτικότητας, όσο περισσότεροι οι υπερσύνδεσμοι του κεντρικού κόμβου, τόσο περισσότερα τα έσοδα από διαφήμιση ή από υπηρεσίες εξυπηρέτησης επισκεπτών ή ακόμα και από έλεγχο και επεξεργασία περιεχομένου [15].

3.4.2 Ολοκληρωμένα δίκτυα

Το Σχήμα 3.2 εμφανίζει μία ενδεικτική μορφή ολοκληρωμένου δικτύου, στην οποία οι ιστοσελίδες και σε αυτή την περίπτωση απεικονίζονται ως κόμβοι, ενώ οι υπερσύνδεσμοι που οδηγούν σε άλλες ιστοσελίδες απεικονίζονται ως ακμές/σύνδεσμοι. Η διάφορα με την προηγούμενη μορφή δικτύου είναι ότι σ' αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει κεντρικός κόμβος στο δίκτυο μας.



Σχήμα 3.2: Ενδεικτική μορφή ολοκληρωμένου δικτύου

Στη μορφή του ολοκληρωμένου δικτύου η αρχιτεκτονική είναι αποκεντρωμένη (δεν υπάρχει κεντρικός κόμβος) και έχουμε ιστοσελίδες (κόμβους) οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα επίσκεψης σε άλλες ιστοσελίδες μέσω των υπερσυνδέσμων που περιέχουν. Επομένως οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα πλοήγησης μεταξύ των ιστοσελίδων ελαχιστοποιώντας τη χρήση κεντρικών ιστοσελίδων/κόμβων (π.χ. διαδικτυακή μηχανή αναζήτησης). Πλεονέκτημα του

αποκεντρωμένου δικτύου αποτελεί το γεγονός ότι υπάρχει μειωμένη δυνατότητα επιρροής στο δίκτυο από τα λίγα, κεντρικά sites που θα υπήρχαν στην περίπτωση του δικτύου μορφής αστέρα [15].

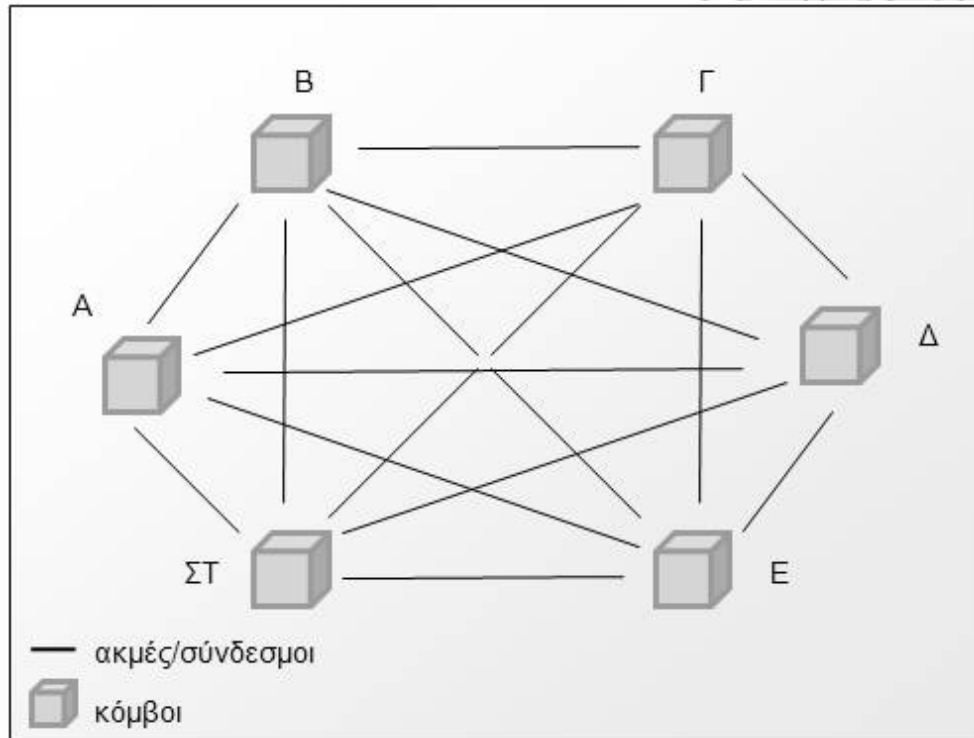
3.4.3 Peer-to-Peer δίκτυα

Ένα δίκτυο peer-to-peer (p2p) είναι ένα ad-hoc δίκτυο που επιτρέπει σε δύο ή περισσότερους υπολογιστές να μοιράζονται τους πόρους τους ισοδύναμα. Το δίκτυο χρησιμοποιεί τους κόμβους για αποθήκευση και μεταφορά των δεδομένων. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι ομότιμοι (peers). Οι κατηγορίες των p2p δικτύων διαχωρίζονται σύμφωνα με τον βαθμό αποκέντρωσης αυτών. Έτσι έχουμε:

- Συγκεντρωτικά δίκτυα (1^{ης} γενεάς): Υπάρχει ένας Indexing Server στον οποίο αποθηκεύονται οι πληροφορίες για τα περιεχόμενα των καταλόγων που οι συμμετέχοντες επιθυμούν να μοιράζονται. Οι χρήστες μπορούν να αναζητήσουν στον Indexing Server τα αρχεία που ψάχνουν, χρησιμοποιώντας εφαρμογές p2p. Όταν το αρχείο βρεθεί, ανοίγει μια σύνδεση μεταξύ των δύο χρηστών για τη μεταφορά του. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν το Napster, το DC++, το WinMX κτλ.
- Αποκεντρωμένα δίκτυα (2^{ης} γενεάς): Κάθε σύστημα που συμμετέχει αποτελεί ταυτόχρονα client και server. Μόλις κάποιος συνδεθεί μέσω της p2p εφαρμογής, το γνωστοποιεί στους ήδη συνδεδεμένους υπολογιστές οι οποίοι με τη σειρά τους ενημερώνουν άλλους υπολογιστές κ.ο.κ. Έτσι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αναζητήσει οποιαδήποτε πληροφορία μεταξύ των διαμοιραζόμενων αρχείων. Η μεταφορά των αρχείων είναι όμοια με την προηγούμενη κατηγορία. Εδώ ανήκουν το Kazaa, το Gnutella κτλ.
- Δίκτυα 3^{ης} γενεάς: Εδώ ανήκουν δίκτυα όπως το I2P (Invisible Internet Project) που εφαρμόζεται στο BitTorrent. Είναι αποκεντρωμένης μορφής και η φιλοσοφία τους βασίζεται εκτός από την ανωνυμία, στην υψηλή βιωσιμότητα του, στο συνεχή διαμοιρασμό των αρχείων και στην κωδικοποίησή τους έτσι ώστε κανείς να μην μπορέσει ποτέ να αποκτήσει

κανένα είδος ελέγχου σε αυτά. Τα δίκτυα αυτής της κατηγορίας είναι υπό ανάπτυξη.

- Δίκτυα 4^{ης} γενεάς: Στην τέταρτη γενεά υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης streaming ήχου και εικόνας με χρήση p2p δικτύων χωρίς να χρησιμοποιείται κάποιος συγκεκριμένος streaming server.



Σχήμα 3.3: Ενδεικτική μορφή δικτύου p2p

3.4.4 Πλεονεκτήματα κοινωνικών δικτύων

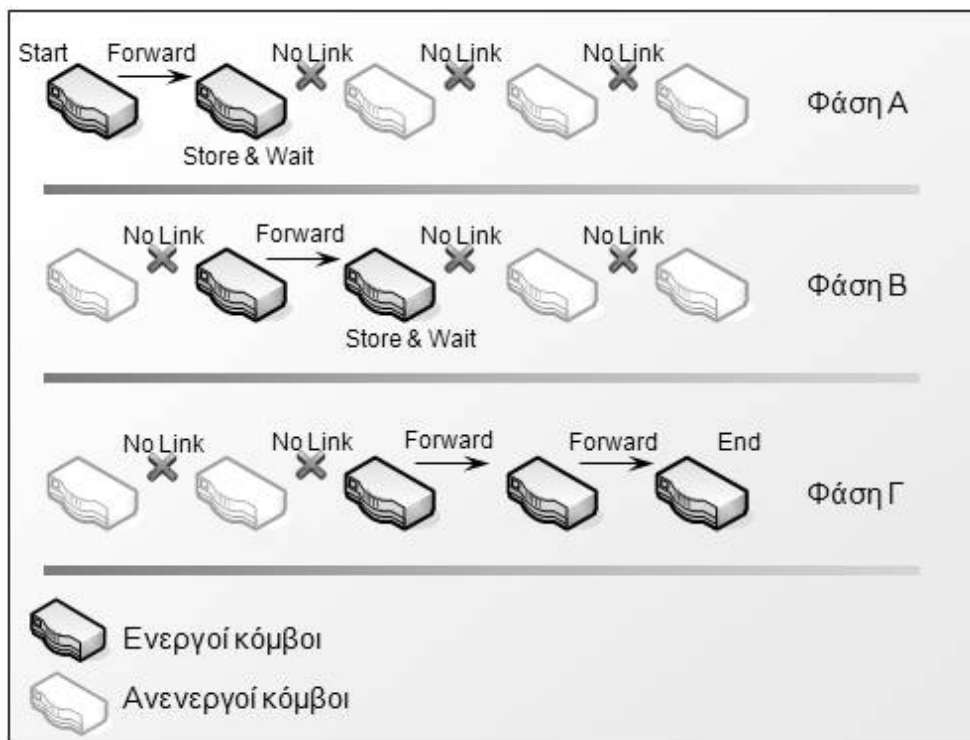
Τα πλεονεκτήματα που εντοπίζονται σε τέτοιου είδους δίκτυα μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

- Ικανότητα αυτο-οργάνωσης εικονικών κοινοτήτων
- Ικανότητα λειτουργίας δικτύου χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη κεντρικού/indexing server (στην περίπτωση ολοκληρωμένων / p2p δικτύων)
- Δυσκολότερος μονοπωλιακός έλεγχος δικτύων από μία και μόνο εταιρία (στην περίπτωση ολοκληρωμένων /p2p δικτύων)
- Παρακίνηση –κινητροποίηση για συνεργασία και ανταλλαγή πόρων

3.5 Χρήση δρομολόγησης DTN σε κοινωνικά δίκτυα

Δοθείσας της ταχύτητας του φωτός, η καθυστέρηση για την μετ' επιστροφής διάδοση μηνύματος από τη Γη στον Άρη θα κυμαίνονταν από 10 λεπτά ως και μία ώρα. Σε τέτοια λοιπόν ασύρματα περιβάλλοντα, πρωτόκολλα όπως το TCP κρίνονται μη αποδοτικά. Βέβαια εκτός από τις διαπλανητικές/ διαστημικές επικοινωνίες, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις μπορούν να εφαρμοστούν και σε επίγειες ασύρματες επικοινωνίες. Για παράδειγμα οι χρήστες κινητών υπηρεσιών ενδέχεται να βιώνουν διακοπές σύνδεσης καθώς μετακινούνται μεταξύ σημείων εντός και εκτός εμβέλειας μετάδοσης. Επομένως και σ' αυτές τις περιπτώσεις τα πρωτόκολλα που βασίζονται σε τεχνικές δρομολόγησης end-to-end δεν κρίνονται αξιόπιστα και αποδοτικά. Άλλες εφαρμογές μπορούν να αναζητηθούν στον τομέα των ad-hoc δικτύων αισθητήρων και σε τομείς στους οποίους ισχύει η ιδέα ότι η επικοινωνία βασίζεται σε πρωτόκολλα τα οποία υποστηρίζουν ετερογενείς και ασταθείς συνδέσεις με περιορισμένη διαθεσιμότητα και διαστήματα αποσύνδεσης [25]. Επιπροσθέτως, πλεονέκτημα της DTN αρχιτεκτονικής είναι το γεγονός της δημιουργίας ενός κοινού επιπέδου επικοινωνίας το οποίο καθιστά δυνατή την επικοινωνία μεταξύ των εφαρμογών μεταξύ πολλαπλών, ετερογενών περιοχών μέσω του προαναφερθέντος κοινού επιπέδου (overlay).

Τα δεδομένα των εφαρμογών μεταφέρονται σε μηνύματα μεταβλητού μεγέθους τα οποία καλούνται bundles. Τα bundles αποστέλλονται μέσω του δικτύου χρησιμοποιώντας τεχνικές αποθήκευσης και προώθησης επειδή ο κάθε κόμβος διατηρεί τα μηνύματα μέχρι να είναι διαθέσιμος ο αμέσως επόμενος κόμβος. Εννοείται λοιπόν ότι δεν κρίνεται αναγκαίος ο εξ' αρχής υπολογισμός end-to-end διαδρομής, αφού το μήνυμα προχωράει κάθε φορά ένα βήμα πιο κοντά στον τελικό προορισμό σύμφωνα με ένα ευκαιριακό μοντέλο hop-by-hop, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.4: Ενδεικτική διαδικασία ευκαιριακής αποθήκευσης και προώθησης με ενεργούς και ανενεργούς κόμβους

Η διαφορά με τα ήδη υφιστάμενα IP-based δίκτυα (τα οποία επίσης χρησιμοποιούν τη μέθοδο αποθήκευσης και προώθησης) είναι ότι στα DTN-based δίκτυα οι κόμβοι διατηρούν τα bundles για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους μέχρι να παρουσιαστεί η επόμενη ευκαιρία μετάδοσης σε αντίθεση με το IP όπου διατηρεί τα πακέτα για μικρό χρονικό διάστημα στην ουρά αναμονής του κόμβου. Επιπροσθέτως, τα bundles πρέπει να είναι σε θέση να παραμένουν αποθηκευμένα και να διασώζονται σε περιπτώσεις επανεκκινήσεων ή crash των κόμβων που τα φιλοξενεί, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα κατακερματισμού των bundles ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα της μετάδοσης.

Όσο τώρα για την αναγνώριση των κόμβων στα DTN υπάρχει ένα Unique Endpoint Identifier (EID) το οποίο ακολουθεί τη μορφή σύνταξης του γνωστού Uniform Resource Identifier (URI). Στην περίπτωση όμως του multicasting ένα EID ενδέχεται να συνδέεται με περισσότερους του ενός κόμβους, καθώς και ένας κόμβος να έχει παραπάνω από ένα EID. Έτσι, κάθε κόμβος πρέπει να ανήκει σε τουλάχιστον ένα 'singleton' προορισμό, δηλαδή να έχει ένα μοναδικό singleton EID της μορφής `dtm://host.dtm/path` [24]. Στον πίνακα που ακολουθεί

συγκρίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των συμβατικών IP-based δίκτυα με τα ετερογενή δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις [27].

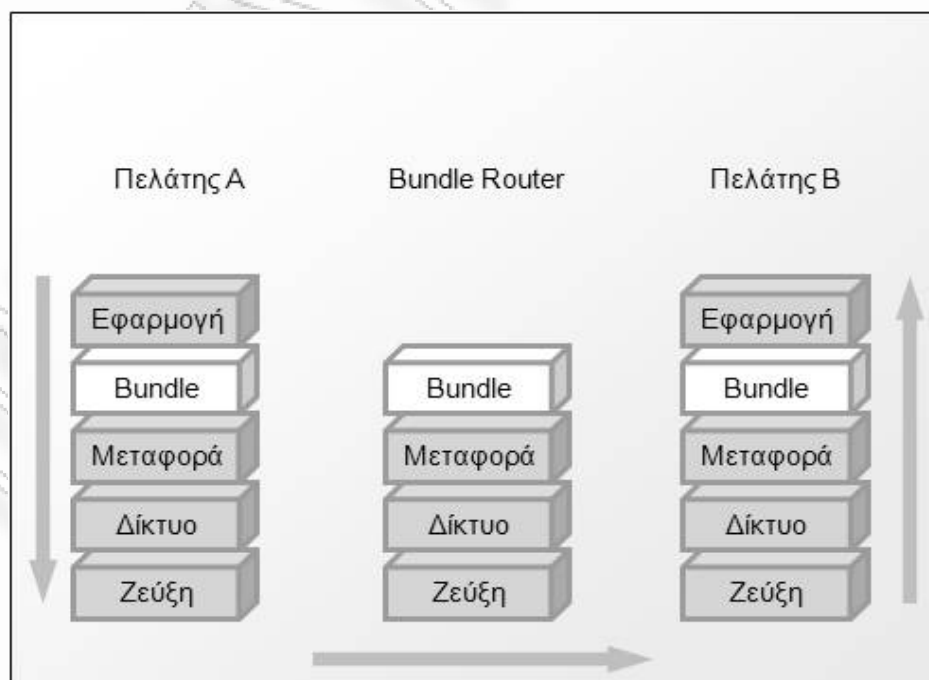
Πίνακας 3.1: Σύγκριση συμβατικών IP-based δικτύων με DTN

TCP-IP Internet	Ετερογενή DTNs
Μικρή καθυστέρηση διάδοσης, της τάξης των msecs, λόγω υψηλών ταχυτήτων στα LANs, οπτικών ινών κτλ.	Υψηλή καθυστέρηση διάδοσης, της τάξης των λεπτών μέχρι και ωρών, λόγω των ασύρματων δορυφορικών ζεύξεων, των μεγάλων αποστάσεων κτλ.
Υψηλός ρυθμός μεταφοράς δεδομένων της τάξης των Gbps.	Μικρότερος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων της τάξης των Kbps (σε PANs) μέχρι και αρκετά Mbps (σε WLANs).
Δυνατότητα επικοινωνίας διπλής κατεύθυνσης λόγω ιδίων πρωτοκόλλων και πολιτικών στο Διαδίκτυο.	Πιθανές καθυστερήσεις μεταξύ της αποστολής και παραλαβής, λόγω πολλαπλών, ασταθών ζεύξεων ανάμεσα σε ετερογενή δίκτυα.
Συνεχής end-to-end διασύνδεση.	Ασταθής και ευκαιριακή διασύνδεση κόμβων μεταξύ ετερογενών δικτύων.
Χαμηλό error rate, λόγω αξιόπιστων φυσικών δικτύων και δυνατότητας διόρθωσης σφαλμάτων σε διάφορα επίπεδα επικοινωνίας.	Υψηλό error rate, λόγω ασταθών, ασύρματων ζεύξεων, ετερογένειας, διαφορετικών πρωτοκόλλων στα επίπεδα επικοινωνίας κτλ.
Δυνατότητα επιλογής μίας διαδρομής μεταξύ των κόμβων με αξιόπιστη επικοινωνιακή απόδοση.	Η ετερογένεια του περιβάλλοντος δεν αφήνει πολλά περιθώρια για τον εντοπισμό μίας ολοκληρωμένης διαδρομής με δυνατότητα επιστροφής.
Ομοιογένεια στον τρόπο ονοματοδοσίας για αξιόπιστη δρομολόγηση των πακέτων.	Δεν είναι εφικτή η ομοιογένεια ονοματοδοσίας σε ετερογενή περιβάλλοντα.

<p>Δεν υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί επανάκτησης πακέτων σε περίπτωση διακοπής ζεύξης, επανεκκινήσεων /crash συστήματος κτλ. Πρέπει να επανασυνδεθούν οι κόμβοι από την αρχή ως το τέλος της διαδρομής.</p>	<p>Δεν είναι δυνατή η εξ'αρχής end-to-end διασύνδεση μεταξύ ετερογενών δικτύων και μη συνεχώς διαθέσιμων ενδιάμεσων κόμβων.</p>
<p>Εφαρμογή κλασικών τεχνικών δρομολόγησης εντοπισμού end-to-end path.</p>	<p>Τεχνικές δρομολόγησης βασισμένες σε flooding, multi-path και πιθανοτική δρομολόγηση καθώς τα πακέτα διέρχονται μεταξύ ετερογενών δικτύων κατά τη διάρκεια της διαδρομής τους μέχρι τον τελικό προορισμό.</p>

3.5.1 Πρωτόκολλο Bundle για δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις

Το βασικό πρωτόκολλο των δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις είναι το πρωτόκολλο bundle. Ονομάζεται έτσι λόγω των bundles, δηλαδή των μονάδων δεδομένων που μεταφέρονται μέσω των DTNs. Το bundle πρωτόκολλο εντοπίζεται πάνω από το επίπεδο μεταφοράς και κάτω από το επίπεδο εφαρμογής.



Σχήμα 3.5: Επίπεδο Bundle

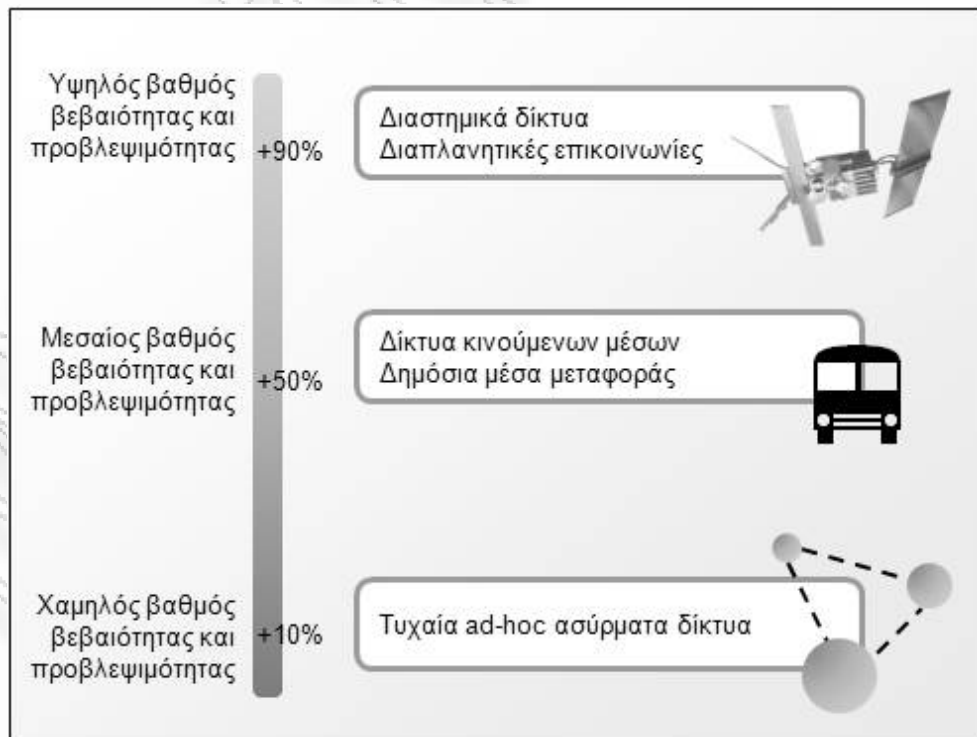
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5, ανάμεσα στην έναρξη αποστολής και στον τελικό προορισμό, υπάρχουν bundle routers ή gateways αν πρόκειται για σύνδεση του διαδικτύου με κάποιο άλλο δίκτυο. Αυτές οι συσκευές έχουν τη δυνατότητα αποστολής και λήψης bundles (μηνυμάτων). Το bundle επίπεδο ενώνει τα διαφορετικά επίπεδα που βρίσκονται από κάτω, με αποτέλεσμα οι εφαρμογές να μην χρειάζεται να γνωρίζουν λεπτομέρειες για το επίπεδο μεταφοράς, αφού επικοινωνούν μέσω του επιπέδου bundle [24].

3.5.2 Χρόνος απόφασης δρομολόγησης και χρονοπρογραμματισμός

Η πρώτη δυνατότητα απόφασης της διαδρομής που θα ακολουθήσει κάποιο μήνυμα είναι στην πηγή αποστολής. Το πρόβλημα όμως με τη δρομολόγηση στα DTNs είναι ότι όσο πλησιάζουμε προς τον τελικό κόμβο προορισμού, οι κόμβοι είναι να παρέχουν πιο αξιόπιστες και ακριβείς πληροφορίες σε σχέση με τους αρχικούς κόμβους. Έτσι, οι αποφάσεις των τελευταίων κόμβων κρίνονται πιο αποδοτικές από τους πρώτους. Για αποφάσεις λοιπόν με την καλύτερη δυνατή πληροφορία προτείνεται η δρομολόγηση ανά επαφή. Δηλαδή, ο πίνακας δρομολόγησης επαναυπολογίζεται κάθε φορά που εισέρχεται μία επαφή. Σύμφωνα με το νέο πίνακα, επανεξετάζονται τα bundles του buffer του κόμβου ώστε να εντοπιστούν αυτά τα οποία χρειάζεται να προωθηθούν στις αμέσως, επόμενες διαθέσιμες επαφές. Αυτός ο τρόπος εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή απόφαση δρομολόγησης και τα νεότερα στοιχεία. Μειονεκτήματα της εν λόγω μεθόδου είναι ότι δαπανώνται επεξεργαστικοί πόροι, επειδή χρειάζεται συχνός επανυπολογισμός των πινάκων δρομολόγησης, καθυστερώντας παράλληλα και τη χρήση της ζεύξης και σε πολύ μεγάλα δίκτυα αυτή η καθυστέρηση μπορεί να θεωρείται αρκετά σημαντική.

Σημαντική παράμετρος κρίνεται και το θέμα της προβλεψιμότητας του χρονοπρογραμματισμού της διαθεσιμότητας των κόμβων. Δηλαδή πόσο πιθανό είναι να προβλέψουμε με ακρίβεια την επόμενη σύνδεση/αποσύνδεση του εκάστοτε κόμβου. Σύμφωνα με αυτή την παράμετρο, δημιουργούνται οι εξής κατηγορίες [25]:

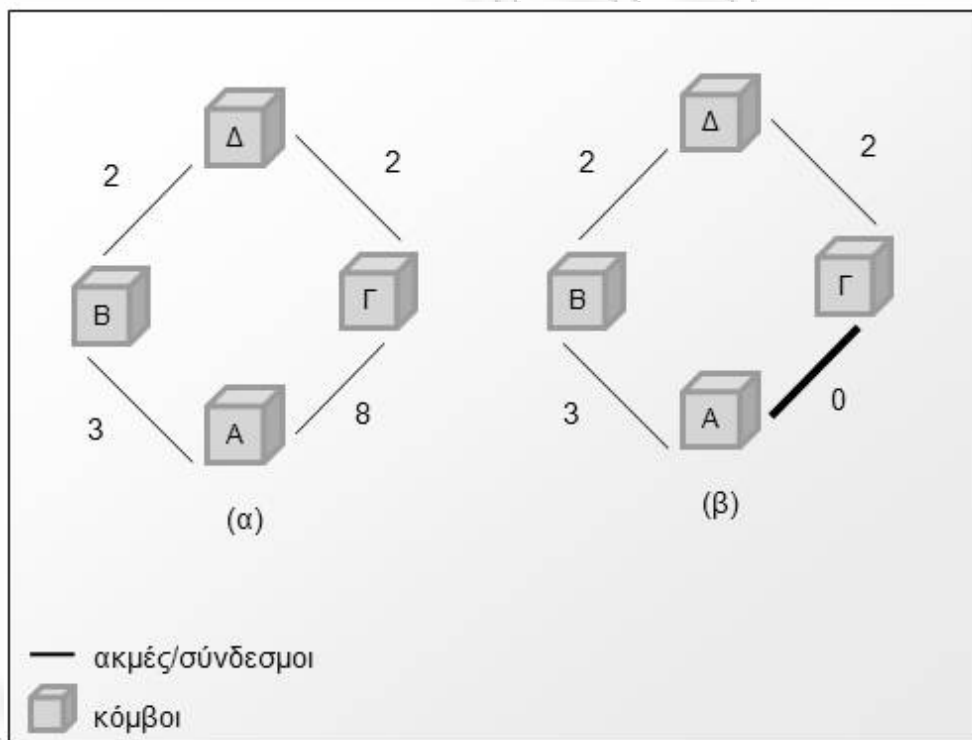
- Διαστημικά δίκτυα: Η σύνδεση/αποσύνδεση των κόμβων εξαρτάται από τις τροχιές των κινούμενων αντικειμένων του διαστήματος οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια, άρα γνωρίζουμε με αντίστοιχη ακρίβεια και τη στιγμή διαθεσιμότητας του εκάστοτε κόμβου.
- Δίκτυα κινούμενων μέσων: Περιλαμβάνονται τα DTN δίκτυα που βασίζονται σε δρομολογητές τοποθετημένους σε δημόσια μέσα μεταφοράς ή άλλα κινούμενα μέσα και τα οποία να μην ακολουθούν συγκεκριμένο πρόγραμμα το οποίο όμως ενδέχεται να τροποποιηθεί μερικώς λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης, ατυχήματος κτλ. Οπότε δεν μπορούμε να έχουμε την ακρίβεια της προαναφερόμενης περίπτωσης των διαστημικών δικτύων.
- Δίκτυα με υψηλό βαθμό απροβλεψιμότητας και τυχαία διαθεσιμότητας: Τέτοιου είδους δίκτυα βρίσκονται στον αντίποδα της κατηγορίας των διαστημικών δικτύων καθώς δεν υπάρχει τρόπος ακριβούς υπολογισμού της στιγμής διαθεσιμότητας του εκάστοτε κόμβου.



Σχήμα 3.6: Κατηγοριοποίηση DTN ανά βαθμό βεβαιότητας

3.5.3 Παραδείγματα δρομολόγησης

Έστω ότι πρόκειται για σενάριο δρομολόγησης ανά επαφή και το δίκτυο αποτελείται από 4 κόμβους και ο κόμβος Α πρέπει να παραδώσει το μήνυμα στον κόμβο Δ. Οι πιθανές διαδρομές είναι μέσω του Β με κόστος 5 ή μέσω του Γ με κόστος 10. Στην περίπτωση (α) κανονικά θα συνέφερε το μήνυμα να παραδοθεί στον Δ μέσω του κόμβου Β. Όμως ο κόμβος Γ συνδέεται και είναι άμεσα διαθέσιμος πριν τον Β. Τότε το κόστος της διαδρομής $A \rightarrow \Gamma$ μηδενίζεται, και ενώ με άλλους αλγόριθμους δρομολόγησης το μήνυμα θα περίμενε να μεταδοθεί μέσω του κόμβου Β (με ολικό κόστος 5), αντίθετα στη δρομολόγηση ανά επαφή θα προτιμηθεί η διαδρομή μέσω του άμεσα διαθέσιμου κόμβου Γ και θα περιμένει μετά το μήνυμα για το τελικό σκέλος της διαδρομής με κόστος 2 [25].



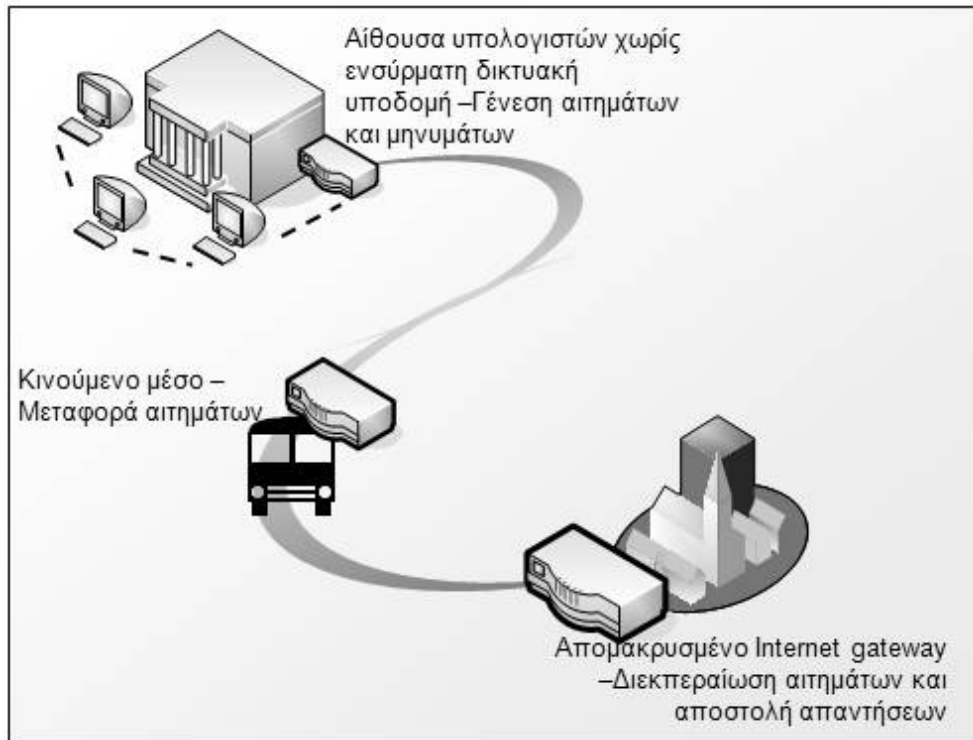
Σχήμα 3.7: Δρομολόγηση ανά επαφή

Άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα θα μπορούσε να είναι το ακόλουθο. Σε αίθουσα υπολογιστών, κάθε άτομο έχει από ένα laptop, χωρίς όμως να είναι απαραίτητη η δικτυακή υποδομή (π.χ. ενσύρματο LAN). Τα άτομα συνεργάζονται μεταξύ τους και η διασύνδεση μεταξύ των υπολογιστών αλλά και το διαδίκτυο επιτυγχάνεται μέσω ασύρματων καρτών δικτύου, εφαρμόζοντας παράλληλα DTN τεχνικές. Δηλαδή, αν το laptop κάποιου συνεργάτη βρίσκεται εκτός λειτουργίας ή

εκτός χώρου, το δίκτυο έχει την ικανότητα να αποθηκεύσει τα μηνύματα που έστειλαν οι άλλοι χρήστες και να τα παραδώσει με την πρώτη ευκαιρία. Επιπροσθέτως, η διασύνδεση των υπολογιστών του χώρου με το διαδίκτυο θα μπορούσε να εξυπηρετείται μέσω δρομολογητή ο οποίος βρίσκεται σε λεωφορείο το οποίο διέρχεται μεταξύ της αίθουσας και κάποιου Internet gateway και λαμβάνει αιτήματα από την αίθουσα προς το gateway. Στη διαδρομή της επιστροφής μεταφέρει στην αίθουσα τις απαντήσεις των αιτημάτων [25]. Έχουν ήδη προταθεί τέτοιες λύσεις στο Wizzy Digital Courier Project το οποίο παρέχει διαδικτυακή σύνδεση σε σχολεία αγροτικών περιοχών της Αφρικής [28]. Άλλες εφαρμογές σχετίζονται με εκπαίδευση, ιατρικές υπηρεσίες, e-government, περισυλλογή δεδομένων από αισθητήρες σε απομακρυσμένες περιοχές στον ωκεανό, στο διάστημα κ.ά. Χρήση DTN δοκιμάζεται και για τη διασύνδεση κινούμενων οχημάτων με το διαδίκτυο μέσω παροδικής σύνδεσης σε ασύρματους σταθμούς βάσης κατά μήκος του οδικού δικτύου.

Για τη δρομολόγηση των πακέτων σε τέτοια παραδείγματα πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιες βασικές απαιτήσεις όπως [25]:

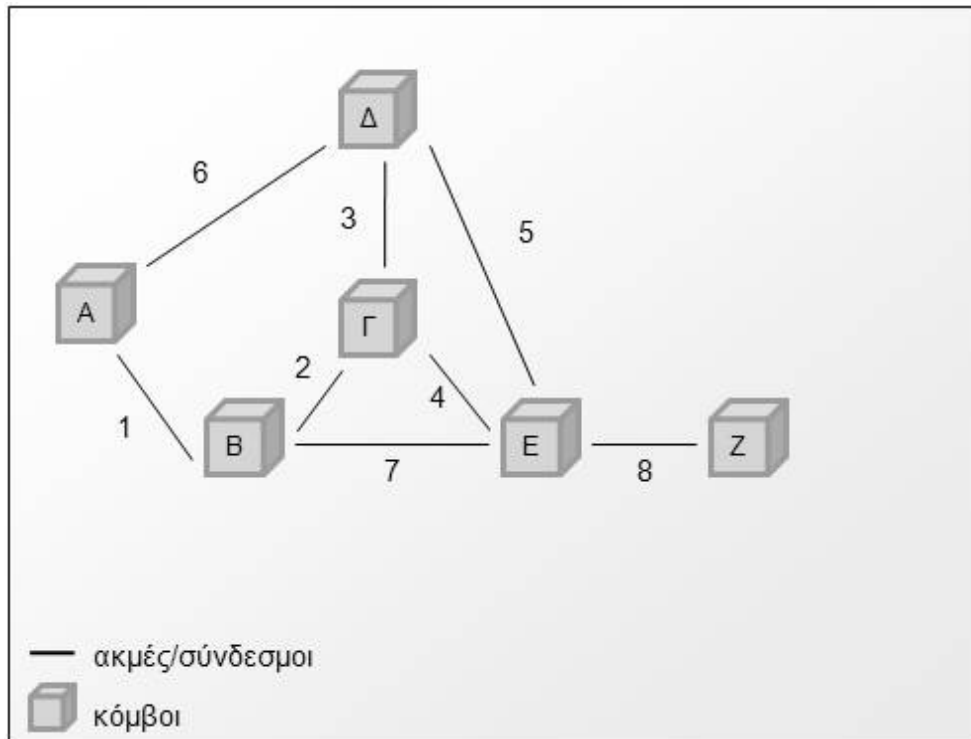
- Η δρομολόγηση πρέπει να είναι αυτορυθμιζόμενη και να είναι σε ικανότητα λειτουργίας ακόμα και όταν στοιχεία του εξοπλισμού παρουσιάσουν πρόβλημα και βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία ή το διάστημα.
- Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να παρέχουν ικανοποιητική απόδοση στα περισσότερα DTN, ετερογενή δίκτυα και να μη χρειάζεται κάθε φορά ο επανασχεδιασμός τους.
- Τα πρωτόκολλα πρέπει να χρησιμοποιούν έξυπνα το buffering και τους πόρους δικτύου ώστε να έχουν την ικανότητα να ανταποκριθούν στην ανάπτυξη και την συνεχή αύξηση του όγκου δεδομένων που μεταφέρονται μέσω των DTN-enabled δικτύων (network scalability due to increasing demand).



Σχήμα 3.8: Ενδεικτική ροή DTN δρομολόγησης

3.5.4 Ενδεικτικό σενάριο δρομολόγησης

Στο παρόν σενάριο χρησιμοποιούνται έξι κόμβοι (A-Z) και οκτώ ακμές. Η κίνηση των δεδομένων μεταξύ των κόμβων είναι αμφίδρομη και προς απλοποίηση του σεναρίου θεωρείται ότι κάθε μήνυμα γεννάται πάντα στον κόμβο A. Το Σχήμα 3.9 που ακολουθεί απεικονίζει γραφικά το εν λόγω δίκτυο. Για τον καθορισμό των τεχνικών δρομολόγησης σε δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις χρησιμοποιούνται παράμετροι όπως τα κριτήρια δημιουργίας και χρήσης πολλαπλών αντιγράφων των μηνυμάτων αλλά και την ικανότητα του δικτύου να γνωρίζει κάθε φορά ποια διαδρομή είναι διαθέσιμη με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη ροή πληροφοριών.

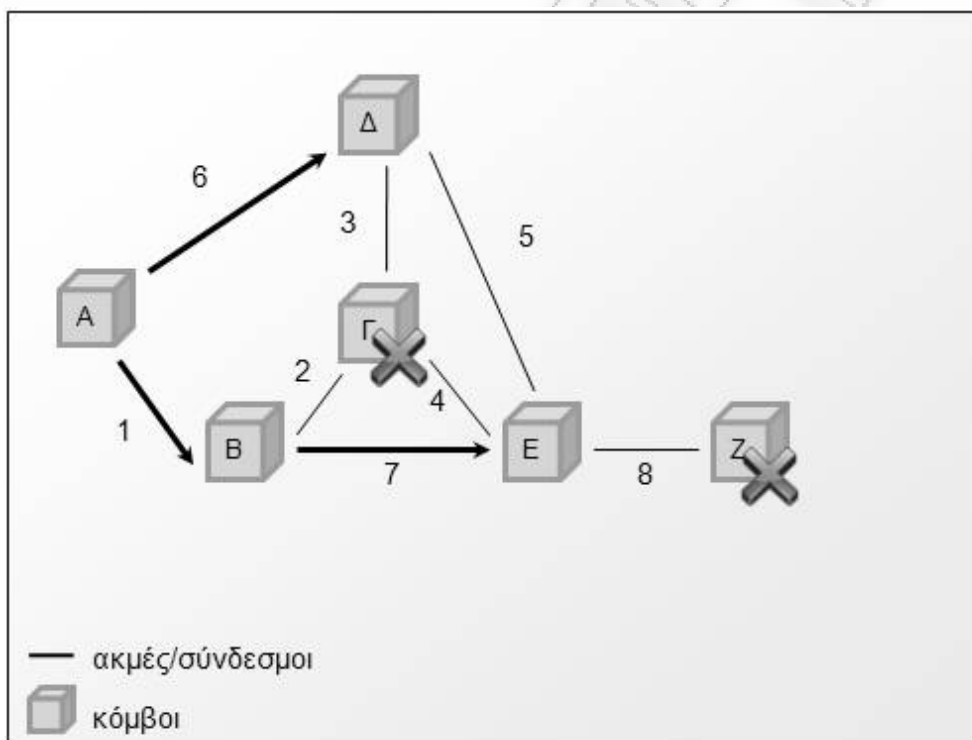


Σχήμα 3.9: Ενδεικτικό DTN δίκτυο

Στην περίπτωση των πολλαπλών αντιγράφων όπως έχει ήδη προαναφερθεί η βασική ιδέα είναι αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχούς παράδοσης κάποιου εξ'αυτών στον τελικό προορισμό. Βέβαια μία τέτοια προσέγγιση κοστίζει σε δικτυακούς πόρους σε αντίθεση με μία και μόνο αποστολή. Από την άλλη πάλι η αποθήκευση ενός αντιγράφου του μηνύματος σε κάθε κόμβο του δικτύου θα χαρακτηρίζονταν αρκετά αξιόπιστη καθώς θα έπρεπε όλοι οι κόμβοι που έχουν το μήνυμα να αποσυνδεθούν για να χαθεί το μήνυμα. Εκτός από τη δημιουργία πολλαπλών αντιγράφων, μας απασχολεί εξίσου και το επίπεδο γνώσης των διαθέσιμων κόμβων κάθε στιγμή ώστε να λαμβάνονται οι κατάλληλες αποφάσεις δρομολόγησης.

Δοθέντος του ανωτέρω σχήματος (3.9) δικτύου, μπορούν να εκτελεστούν διάφορες στρατηγικές δρομολόγησης όπως για παράδειγμα η στρατηγική των 2 hops, στην οποία η πηγή στέλνει αντίγραφα του πρωτότυπου μηνύματος στον πρώτο κόμβο που επικοινωνεί. Ακολουθώντας αυτή τη λογική σε δίκτυο z κόμβων, θα κυκλοφορούν $z+1$ μηνύματα τα οποία χρησιμοποιούν δικτυακούς πόρους. Αν σε αυτό υπολογιστεί και η πιθανότητα p (πιθανότητα επικοινωνίας κάθε κόμβου χωριστά) τότε η πιθανότητα παράδοσης του μηνύματος θα ήταν $1 -$

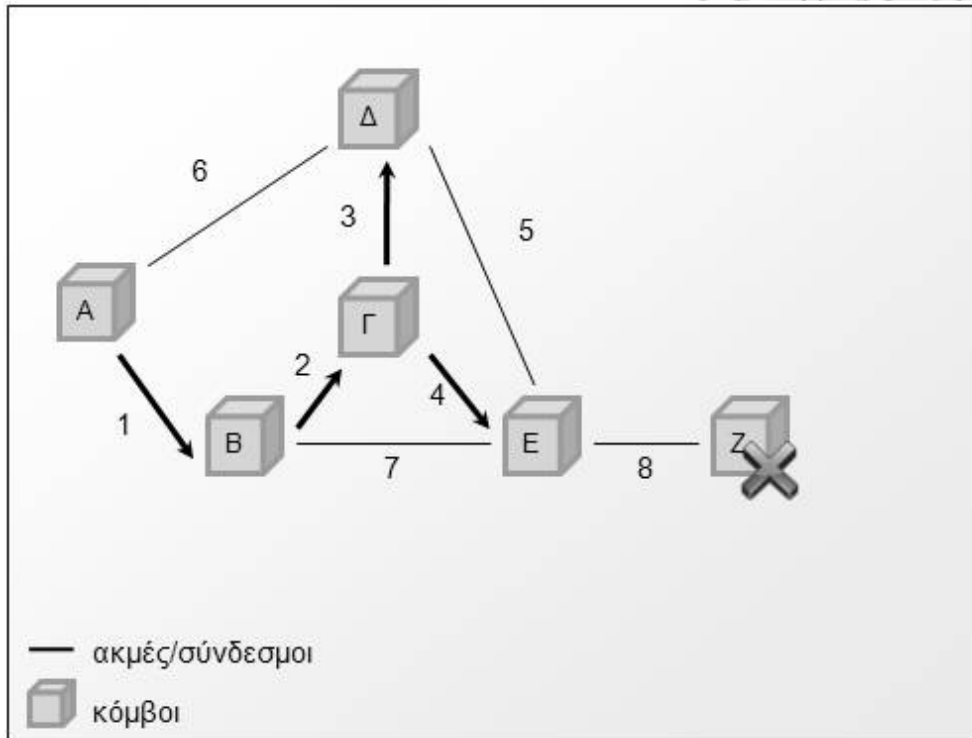
$(1 - p)^{(z+1)}$ ή $(z+1)*p$ όταν το p είναι πάρα πολύ μικρό. Παράλληλα αυξάνοντας τον αριθμό των αντιγράφων η μέση καθυστέρηση παράδοσης μειώνεται καθώς το μήνυμα θα παραδοθεί μόλις ένας από τους $z+1$ κόμβους επικοινωνήσει με τον προορισμό. Για παράδειγμα, αν ο κόμβος Α πρέπει να παραδώσει μήνυμα στον Ε, θα στείλει αντίγραφα του πρωτότυπου μηνύματος στους Β και Δ και όταν ο Β συνδεθεί με τον Γ, δεν θα στείλει το μήνυμα διότι δεν είναι αυτός ο προορισμός του, αλλά ο Β θα περιμένει να συνδεθεί με τον τελικό κόμβο Ε του σεναρίου. Επομένως στο τέλος οι κόμβοι Α,Β,Δ,Ε θα έχουν λάβει αντίγραφα του μηνύματος, εκτός από τον Ζ ο οποίος χρειάζεται 3 hops κατ' ελάχιστο [25].



Σχήμα 3.10: Στρατηγική των 2 hops

Άλλη μία στρατηγική είναι και το epidemic routing στο οποίο όταν αποστέλλεται κάποιο μήνυμα, τοποθετείται στο τοπικό buffer και αρχειοθετείται σύμφωνα με κάποιο μοναδικό αναγνωριστικό (ID). Όταν επιτευχθεί σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων, ανταλλάσσεται λίστα με τα αναγνωριστικά των μηνυμάτων του καθενός (summary vector). Επομένως οι κόμβοι θα ανταλλάζουν μεταξύ τους τα μηνύματα που δεν έχουν ως τώρα στη λίστα τους. Έτσι όλοι οι κόμβοι λαμβάνουν κάθε μήνυμα κάνοντας τους κόμβους και το δίκτυο γενικότερα, ανθεκτικά σε βλάβες. Έστω λοιπόν ότι το μήνυμα αποστέλλεται από τον Α προς

τον E μέσω της συντομότερης διαδρομής A,B,Γ,E. Όλοι οι κόμβοι θα λάβουν το μήνυμα εκτός από τον Z διότι το μήνυμα τερματίζει στον E. Τα αρνητικά αυτής της στρατηγικής είναι ότι απαιτούνται αυξημένοι δικτυακοί πόροι, αποθήκευση και υπολογιστική ισχύς λόγω των πολλών αντιγράφων που κυκλοφορούν στο δίκτυο [8,25].



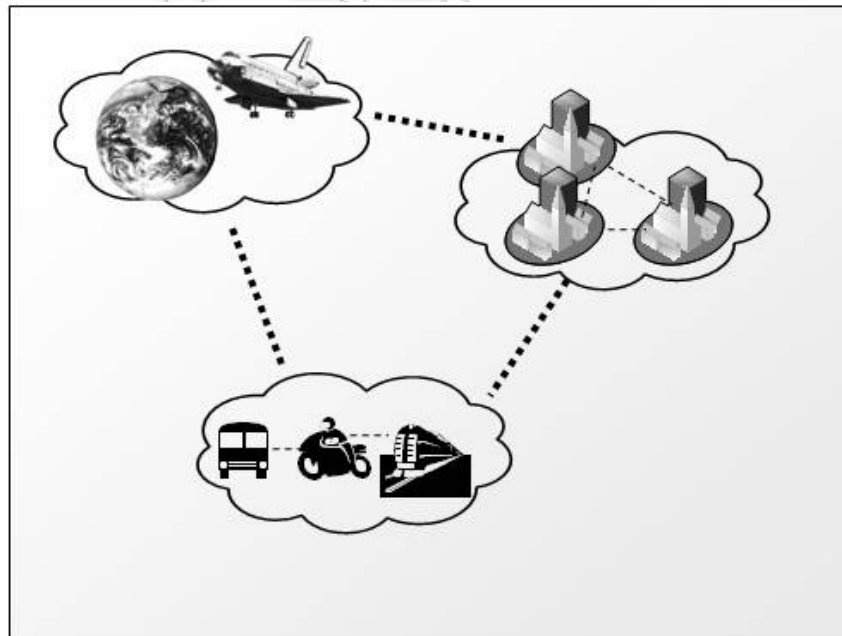
Σχήμα 3.11: Epidemic Routing

Επομένως κάθε στρατηγική δρομολόγησης εμπεριέχει θετικά και αρνητικά στοιχεία τα οποία καθορίζουν και την τελική επιλογή αναλόγως με τις απαιτήσεις των χρηστών του εκάστοτε δικτύου. Πάντως σε κάθε περίπτωση αποστολή των αλγορίθμων δρομολόγησης σε δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις είναι:

- Εντοπισμός αξιόπιστων, βέλτιστων διαδρομών
- Εντοπισμός παραγόντων πρόκλησης καθυστέρησης
- Υπολογισμών πιθανοτήτων διαθεσιμότητας κόμβων
- Χρονοπρογραμματισμός μετάδοσης μηνυμάτων, όπου κρίνεται ικανή η πρόβλεψη χρόνου αποσύνδεσης/σύνδεσης κόμβων (π.χ. διαπλανητική δικτύωση)
- Υπολογισμός διάρκειας διαθεσιμότητας του εκάστοτε κόμβου

- Ικανότητα ανάκτησης μηνυμάτων σε περίπτωση βλαβών ή αποσύνδεσης (τα οποία είναι αρκετά πιθανά και συχνά σε δίκτυα με κύρια χαρακτηριστικά την ετερογένεια και την έλλειψη συνεχούς διαθεσιμότητας των κόμβων)

Επιπροσθέτως, λαμβάνοντας υπόψη την ετερογένεια των DTN, τα πρωτόκολλα που σχεδιάζονται πρέπει να μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων επικοινωνίας ανάμεσα σε ανομοιογενή δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετική αρχιτεκτονική, λειτουργικά συστήματα κτλ. Το Σχήμα 3.12 που ακολουθεί απεικονίζει ζεύξεις δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις, μεταξύ διαστημικών, επίγειων και τροχαίων/κινούμενων διατάξεων. Δηλαδή έστω ότι οι επικοινωνίες στην πόλη πραγματοποιούνται με WLAN/Bluetooth/ZigBee, οι επικοινωνίες μεταξύ των οχημάτων επιτυγχάνονται με WiMAX και οι επικοινωνίες στο διάστημα με υπέρυθη ακτινοβολία και λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά και την ετερογένεια του κάθε δικτύου, πρέπει τα πακέτα δεδομένων να δύνανται να μεταφέρονται επιτυχώς μεταξύ των ετερογενών αυτών δικτύων με τη μικρότερη δυνατή ενόχληση οποιαδήποτε στιγμή έστω και αν κάποιοι κόμβοι βρίσκονται εκτός λειτουργίας ή εκτός εμβέλειας.



Σχήμα 3.12: Επικοινωνία μεταξύ ετερογενών ασύρματων δικτύων

4. Προσομοίωση δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις

4.1 Γενικά

Για την προσομοίωση δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις χρησιμοποιείται το Opportunistic Network Environment –ONE Simulator το οποίο παρέχεται από το πανεπιστήμιο τεχνολογίας του Ελσίνκι και βασίζεται στην προγραμματιστική πλατφόρμα της Java v.1.6 και μεταγενέστερα.

Μέσω του εν λόγω προσομοιωτή δικτύων υπάρχει η δυνατότητα να μελετηθούν:

- Οι κινήσεις των κινούμενων κόμβων χρησιμοποιώντας διαφορετικά κινητικά μοντέλα
- Τα μηνύματα δρομολόγησης που ανταλλάσσουν οι κόμβοι σύμφωνα με διαφορετικούς αλγορίθμους DTN δρομολόγησης
- Η γραφική απεικόνιση των κινήσεων και των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων σε πραγματικό χρόνο μέσω του γραφικού περιβάλλοντος

4.2 Παραμετροποίηση

Στο Opportunistic Network Environment –ONE Simulator δίδεται στον χρήστη η δυνατότητα ελέγχου των πρωτοκόλλων υλοποίησης προσομοίωσης κάθε φορά που ξεκινά ο ONE Simulator. Πιο συγκεκριμένα τα διαθέσιμα πρωτόκολλα είναι:

- Epidemic
- Prophet
- MaxProp
- First Contact
- Direct Delivery
- Spray & Wait (μεταδίδοντας x αντίγραφα –με δυνατότητα μεταβολής του αριθμού των αντιγράφων)

- Passive (η συγκεκριμένη μέθοδος δεν αποστέλλει μηνύματα μέχρι να δοθεί κάποια εξωτερική εντολή –trigger. Στην παρούσα εργασία δεν μελετάται διότι όλα τα αποτελέσματα δρομολόγησης είναι μηδενικά όταν δεν υπάρχουν εξωτερικές κλήσεις. Επιπροσθέτως, δεν προσθέτει κάτι νέο στα δεδομένα που συλλέγονται από τα υπόλοιπα πρωτόκολλα DTN δρομολόγησης.)

Επιπροσθέτως, καθορίζονται οι τιμές εμβέλειας, buffering, ταχύτητας μετάδοσης διαφόρων κατηγοριών κόμβων ως ακολούθως:

- Εμβέλεια = 10 m (για PDA/laptop πεζών εν κινήσει)
 - Εμβέλεια = 200 m (για συσκευές που βρίσκονται σε κινούμενα οχήματα)
 - Εμβέλεια = 200 m (για συσκευές που βρίσκονται σε βασικά κτίρια)
-
- Buffer = 5 MB (για PDA/laptop πεζών εν κινήσει)
 - Buffer = 5 MB (για συσκευές που βρίσκονται σε κινούμενα οχήματα)
 - Buffer = 50 MB (για συσκευές που βρίσκονται σε βασικά κτίρια)
-
- Ρυθμός μετάδοσης = 250 kbps
 - TTL μηνύματος = 60 min
 - Μέγεθος μηνύματος = 500KB~1MB

Σημειώνεται πως όλες οι προαναφερόμενες τιμές είναι ενδεικτικές και υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής αυτών. Στη μελέτη μας όμως οι προσομοιώσεις εκτελούνται με τις παραπάνω τιμές οι οποίες θεωρούνται σταθερές. Τέλος οι μετρήσιμοι δείκτες συνοψίζονται στους εξής:

- Δημιουργία/εκκίνηση/relay/ακύρωση/απόσυρση/παράδοση μηνυμάτων
- Πιθανότητα παράδοσης/απάντησης
- Αναλογία Overhead
- Μέση τιμή καθυστέρησης/hops/buffertime

Ο τρόπος καθορισμού των σημείων αφετηρίας και προορισμού κάθε μηνύματος εξαρτάται από την ομάδα στην οποία ανήκει ο κάθε κόμβος δηλαδή αν πρόκειται

για πεζό, όχημα ή κτίριο σε κεντρικό σημείο της πόλης. Ακολούθως υπάρχει ειδική ρύθμιση του προσομοιωτή (*ShortestPathMapBasedMovement*) σύμφωνα με την οποία αν το άθροισμα τυχαίων πιθανοτήτων είναι μικρότερο από τη μονάδα, τότε η πιθανότητα επιλογής ενός τυχαίου κόμβου του χάρτη για το επόμενο σημείο προορισμού ισούται με τη μονάδα πλην το άθροισμα των τυχαίων πιθανοτήτων που μόλις αναφέρθηκε και απεικονίζεται και στο ενδεικτικό απόσπασμα του Java κώδικα ο οποίος βρίσκει και επιστρέφει τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων.

4.3 Παραδοχές – Δομή αποτελεσμάτων

Οι πεζοί έχουν τη δυνατότητα να περπατούν μόνο σε πεζοδρόμια και αρτηρίες περιπάτου. Αυτό δηλώνεται από τις συντεταγμένες τοποθεσίας του αρχείου *data/pedestrian_paths.wkt*. Τα οχήματα έχουν τη δυνατότητα να κινούνται σε λεωφόρους και μικρότερους δρόμους λαμβάνοντας τις συντεταγμένες κίνησης από τα *data/main_roads.wkt* και *data/roads.wkt*. Τα κτίρια βρίσκονται σε κεντρικό σημείο της πόλης, από το οποίο μπορούν να διέρχονται συχνά τα οχήματα και οι πεζοί. Η ακριβής χωροθέτηση επιτυγχάνεται μέσω του αρχείου *data/shops.wkt*, στο οποίο προδηλώνονται οι ακριβείς συντεταγμένες χωροθέτησης. Η προσομοίωση διαρκεί περίπου 12 ώρες (43,000 secs) και τα αποτελέσματα αυτής λαμβάνονται αυτόματα μέσω των στατιστικών αναφορών οι οποίες ακολουθούν συγκεκριμένη δομή. Η επεξήγηση των τιμών της δομής των αποτελεσμάτων έχει ως εξής:

- Στο *sim_time* εμφανίζεται ο πραγματικός χρόνος διάρκειας του παραδείγματος σε δευτερόλεπτα. Διατηρούμε *σταθερή* αυτή την τιμή σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης για λόγους ομοιογένειας στη σύγκριση.
- Στο *created* εμφανίζεται ο απόλυτος αριθμός μοναδικών μηνυμάτων που δημιουργήθηκαν από τον προσομοιωτή. Τα πρωτότυπα μηνύματα γεννώνται σε σταθερές χρονικές στιγμές ανά 30 δευτερόλεπτα περίπου. Επομένως, στις 12 ώρες αντιστοιχούν περίπου 1454 πρωτότυπα μηνύματα. Διατηρούμε *σταθερή* αυτή την τιμή σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης για λόγους ομοιογένειας στη σύγκριση.
- Στο *started* εμφανίζεται ο ολικός αριθμός μηνυμάτων (πρωτοτύπων και αντιγράφων) που εκκινήθηκαν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Επιπροσθέτως η τιμή αυτή ισούται με το άθροισμα των relayed και dropped μηνυμάτων.

- Στο dropped εμφανίζεται ο αριθμός των μηνυμάτων τα οποία αναγκάστηκε να 'αφήσει' ο κόμβος επειδή το buffer stack ήταν γεμάτο. Όταν το buffer stack γεμίζει, ο κόμβος δεν μπορεί να δεχθεί άλλα μηνύματα εκτός και αν 'αφήσει' μερικά από τα παλαιότερα μηνύματα που βρίσκονται ήδη αποθηκευμένα στο buffer stack.
- Στο delivered εμφανίζεται ο απόλυτος αριθμός των μοναδικών μηνυμάτων που κατάφεραν να παραδοθούν στον τελικό παραλήπτη (σε σύνολο 1454 μοναδικών μηνυμάτων).
- Στο delivery_prob υπολογίζεται η πιθανότητα παράδοσης κατά τη διάρκεια των 12 ωρών προσομοίωσης, όπως προκύπτει από τον λόγο παραδοθέντων προς ολικών μοναδικών μηνυμάτων.
- Το overhead_ratio είναι ο λόγος relayed μηνυμάτων προς delivered μηνυμάτων.
- Στο latency (avg & med) εμφανίζεται ο μέσος όρος και η μέση τιμή αντιστοίχως της καθυστέρησης σε δευτερόλεπτα.
- Στο hopcount (avg & med) εμφανίζεται ο μέσος όρος και η μέση τιμή των hops αντιστοίχως και καταγράφεται από τη δρομολόγηση των μηνυμάτων.
- Στο buffertime (avg & med) εμφανίζεται ο μέσος όρος και η μέση τιμή του χρόνου που διατηρούνται στο buffer τα μηνύματα σε δευτερόλεπτα.
- Συνοψίζοντας τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι για λόγους σύγκρισης και ομοιογένειας των αποτελεσμάτων, διατηρούνται σταθερά σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης τα μεγέθη: sim_time και created. Όλα τα υπόλοιπα μεγέθη των αναφορών αποτελεσμάτων προσομοίωσης μεταβάλλονται αναλόγως με το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται, τον αριθμό και τις ιδιότητες των κόμβων (κινούμενων και σταθερών).

4.4 Spray & Wait

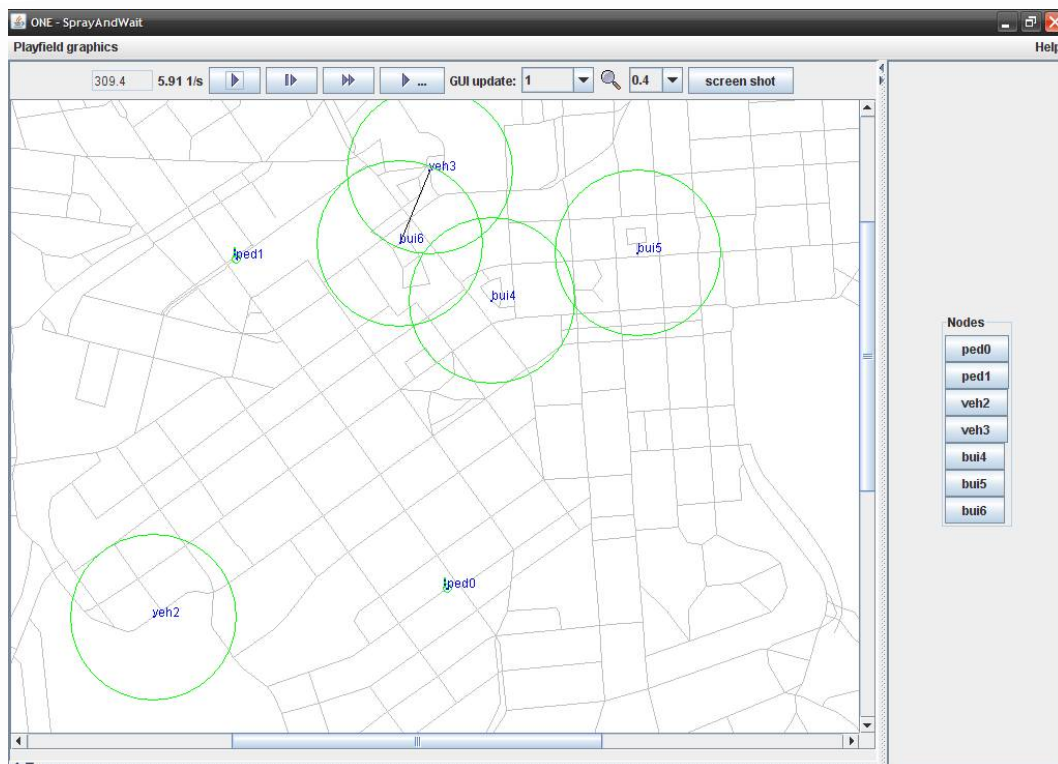
Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται η περίπτωση του Spray and Wait πρωτοκόλλου. Θεωρούμε τις ακόλουθες οντότητες:

- Πεζοί (2)
- Οχήματα (2)
- Κτίρια (3)

Οι τιμές της προσομοίωσης για 7 κόμβους με υλοποίηση του πρωτοκόλλου Spray&Wait λαμβάνονται αυτόματα μέσω των στατιστικών αναφορών οι οποίες για το συγκεκριμένο παράδειγμα έχουν ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Spray&Wait 7 κόμβων

	SNW-7
sim_time	43000
created	1454
started	49
relayed	35
aborted	14
dropped	1441
delivered	9
delivery_prob	0.0062
response_prob	0
overhead_ratio	2.8889
latency_avg	4519.4330
latency_med	971.9000
hopcount_avg	1.8889
hopcount_med	2
buffertime_avg	364.1164
buffertime_med	352



Σχήμα 4.1: ONE Simulator GUI (περίπτωση 7 κόμβων)

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται οι κύριες οδικές αρτηρίες της πόλης του Ελσίνκι. Συνολικά στο μοντέλο μας συμμετέχουν επτά κόμβοι με τα εξής χαρακτηριστικά:

- 2 κινούμενοι πεζοί με χρήση handheld συσκευών με δυνατότητα υλοποίησης ασυρμάτων πρωτοκόλλων Bluetooth 802.15.1, ή ZigBee 802.15.4, ή WUSB Certified, ή HSDPA/UMTS, ή WLAN 802.11 και εμβέλεια κατηγορίας από $\approx 10\text{m}$ (αναλόγως τον τύπο της ζεύξης που επιλέγουμε).
- 2 κινούμενα οχήματα που ενσωματώνουν πομποδέκτες με δυνατότητα υλοποίησης ασυρμάτων πρωτοκόλλων ZigBee 802.15.4, ή HSDPA/UMTS, ή WLAN 802.11 και εμβέλεια κατηγορίας από $\approx 70\text{m} - 200\text{m}$ (αναλόγως τον τύπο της ζεύξης που επιλέγουμε).
- 3 κτίρια (κατά προτίμηση σε κεντρικό σημείο της πόλης, ώστε να διέρχονται συχνά από την ακτίνα δράσης των πομποδεκτών τους οι κινούμενοι πεζοί ή τα οχήματα και να ανταλλάσσουν τα μηνύματα), με δυνατότητα υλοποίησης ασυρμάτων πρωτοκόλλων Bluetooth 802.15.1, ή ZigBee 802.15.4, ή WUSB Certified, ή HSDPA/UMTS, ή WiMAX από

την οικογένεια 802.16, ή WLAN 802.11 και εμβέλεια κατηγορίας από $\approx 70\text{m} - 200\text{m}$ (αναλόγως τον τύπο της ζεύξης που επιλέγουμε).

Οι πράσινοι κύκλοι που σχεδιάζονται γύρω από τους κόμβους δηλώνουν την ακτίνα δράσης -υπό ιδανικές συνθήκες- του εκάστοτε κόμβου, ενώ η ευθεία γραμμή που ενώνει τον κόμβο veh3 (κινούμενο όχημα) με τον κόμβο bui6 (κτίριο σε κεντρικό σημείο της πόλης), δηλώνει ότι υπάρχει ενεργή σύνδεση μέσω της οποίας μπορούν να ανταλλαχθούν τα μηνύματα που βρίσκονται στην αναμονή των κόμβων σύμφωνα με το communication scheme που χρησιμοποιείται (Spray&Wait, MaxProp, Epidemic κτλ.).

Παραλλαγή του εν λόγω σεναρίου (δηλ. χρήση Spray and Wait πρωτοκόλλου) αποτελεί το παρακάτω. Θεωρούμε τις ακόλουθες οντότητες:

- Πεζοί (25)
- Οχήματα (25)
- Κτίρια (5)

Ενώ στην προαναφερθείσα εκτέλεση χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 7 κόμβοι, στην παρούσα εκτέλεση χρησιμοποιούνται 55 κόμβοι, για λόγους σύγκρισης. Οι πεζοί έχουν τη δυνατότητα να περπατούν μόνο σε πεζοδρόμια και αρτηρίες περιπάτου. Αυτό δηλώνεται από τις συντεταγμένες τοποθεσίας του αρχείου data/pedestrian_paths.wkt. Τα οχήματα έχουν τη δυνατότητα να κινούνται σε λεωφόρους και μικρότερους δρόμους λαμβάνοντας τις συντεταγμένες κίνησης από τα data/main_roads.wkt και data/roads.wkt. Τα κτίρια βρίσκονται σε κεντρικό σημείο της πόλης, από το οποίο μπορούν να διέρχονται συχνά τα οχήματα και οι πεζοί. Η ακριβής χωροθέτηση επιτυγχάνεται μέσω του αρχείου data/shops.wkt, στο οποίο προδηλώνονται οι ακριβείς συντεταγμένες χωροθέτησης.

Η προσομοίωση και σ' αυτή την περίπτωση διαρκεί περίπου 12 ώρες (43,000 secs) και τα αποτελέσματα αυτής λαμβάνονται αυτόματα μέσω των στατιστικών αναφορών οι οποίες για το συγκεκριμένο παράδειγμα έχουν την ακόλουθη δομή:

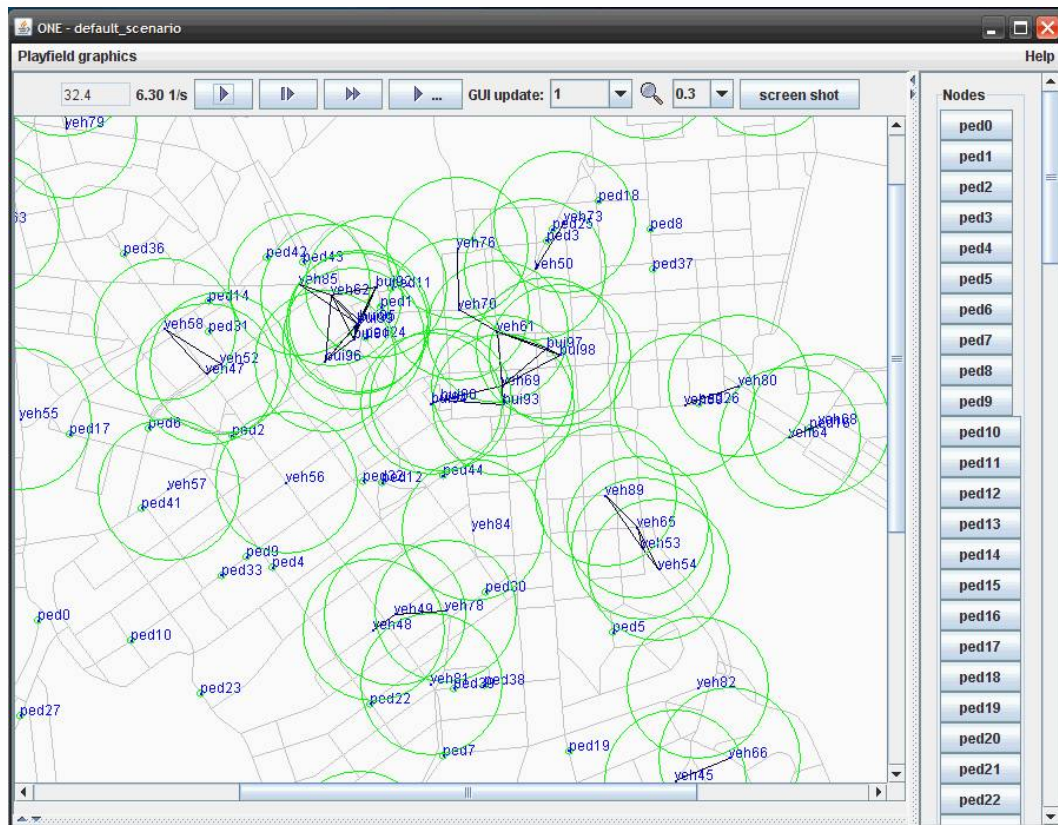
Ακολουθεί και παραλλαγή θεωρώντας τις ακόλουθες οντότητες:

- Πεζοί (45)
- Οχήματα (45)
- Κτίρια (10)

Δηλαδή σύνολο 100 ενεργών κόμβων έναντι 55 της δεύτερης περίπτωσης και 7 της πρώτης περίπτωσης μελέτης του Spray and Wait πρωτοκόλλου. Η προσομοίωση και σ' αυτή την περίπτωση διαρκεί περίπου 12 ώρες (43,000 secs) και τα αποτελέσματα αυτής λαμβάνονται αυτόματα μέσω των στατιστικών αναφορών οι οποίες για το συγκεκριμένο παράδειγμα έχουν την ακόλουθη δομή.

Αποτελέσματα προσομοίωσης Spray&Wait 100 κόμβων

	SNW-100
sim_time	43000
created	1454
started	3293
relayed	2055
aborted	1238
dropped	2557
delivered	230
delivery_prob	0.1582
response_prob	0
overhead_ratio	7.9348
latency_avg	5798.9240
latency_med	4152
hopcount_avg	3.2435
hopcount_med	3
buffertime_avg	4578.9780
buffertime_med	480



Σχήμα 4.3: ONE Simulator GUI (περίπτωση 100 κόμβων)

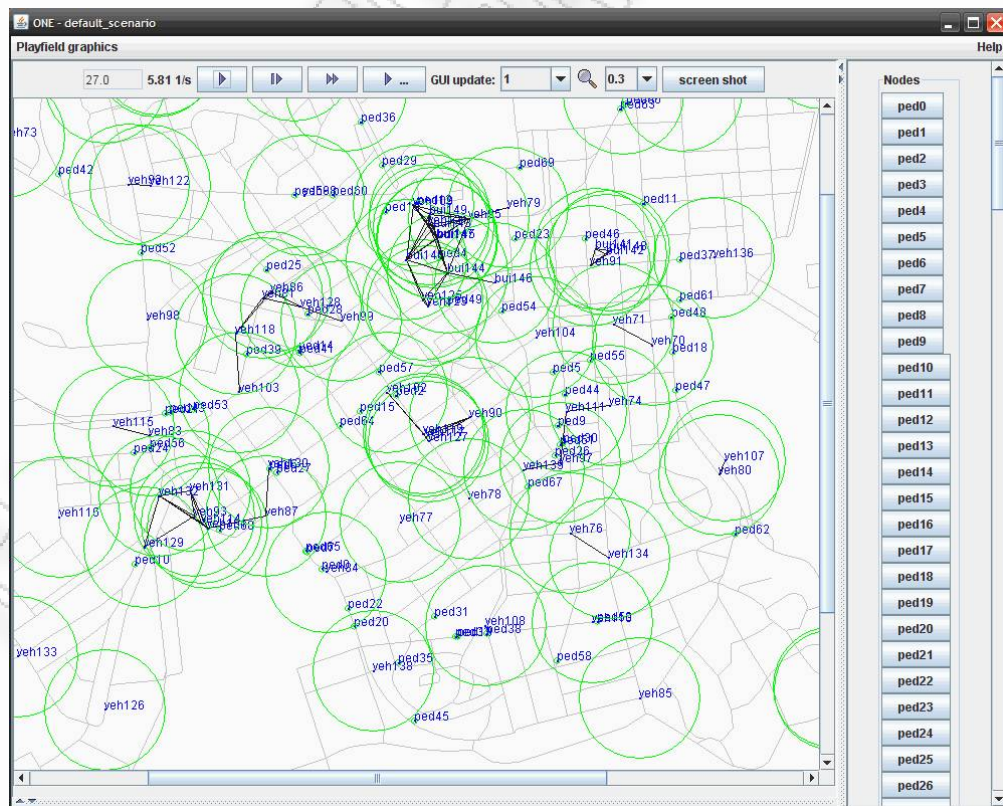
Ακολουθεί ακόμα μία παραλλαγή θεωρώντας τις ακόλουθες οντότητες:

- Πεζοί (70)
- Οχήματα (70)
- Κτίρια (10)

Δηλαδή σύνολο 150 ενεργών κόμβων έναντι 100 της τρίτης περίπτωσης, 55 της δεύτερης περίπτωσης και 7 της πρώτης περίπτωσης μελέτης του Spray and Wait πρωτοκόλλου. Η προσομοίωση και σ' αυτή την περίπτωση διαρκεί περίπου 12 ώρες (43,000 secs) και τα αποτελέσματα αυτής λαμβάνονται αυτόματα μέσω των στατιστικών αναφορών οι οποίες για το συγκεκριμένο παράδειγμα έχουν την ακόλουθη δομή:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Spray&Wait 150 κόμβων

	SNW-150
sim_time	43000
created	1454
started	4605
relayed	2662
aborted	1943
dropped	2754
delivered	297
delivery_prob	0.2043
response_prob	0
overhead_ratio	7.9630
latency_avg	6828.1770
latency_med	4832.2000
hopcount_avg	3.2795
hopcount_med	3
buffertime_avg	5321.3580
buffertime_med	506.7000



Σχήμα 4.4: ONE Simulator GUI (περίπτωση 150 κόμβων)

4.5 MaxProp

Στο σενάριο εξετάζεται η περίπτωση του MaxProp θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 1^η υλοποίηση του Spray&Wait (7 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης MaxProp 7 κόμβων

	MAXP-7
<code>sim_time</code>	43000
<code>created</code>	1454
<code>started</code>	57
<code>relayed</code>	40
<code>aborted</code>	17
<code>dropped</code>	1437
<code>delivered</code>	7
<code>delivery_prob</code>	0.0048
<code>response_prob</code>	0
<code>overhead_ratio</code>	4.7143
<code>latency_avg</code>	3802
<code>latency_med</code>	2383.2000
<code>hopcount_avg</code>	1.8571
<code>hopcount_med</code>	1
<code>buffertime_avg</code>	407.6493
<code>buffertime_med</code>	61

Ακολουθεί η περίπτωση του MaxProp θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 2^η υλοποίηση του Spray&Wait (55 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης MaxProp 55 κόμβων

	MAXP-55
<code>sim_time</code>	43000
<code>created</code>	1454
<code>started</code>	24068
<code>relayed</code>	20419
<code>aborted</code>	3648

dropped	14757
delivered	116
delivery_prob	0.0798
response_prob	0
overhead_ratio	175.0259
latency_avg	3525.0920
latency_med	3024.5000
hopcount_avg	4.7414
hopcount_med	4
buffertime_avg	410.6051
buffertime_med	2.8000

Ακολουθεί η περίπτωση του MaxProp θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 3^η υλοποίηση του Spray&Wait (100 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης MaxProp 100 κόμβων

	MAXP-100
sim_time	43000
created	1454
started	85070
relayed	73001
aborted	12065
dropped	45094
delivered	187
delivery_prob	0.1286
response_prob	0
overhead_ratio	389.3797
latency_avg	2113.2626
latency_med	1748.7000
hopcount_avg	5.2193
hopcount_med	5
buffertime_avg	223.3199
buffertime_med	3.6000

Ακολουθεί η περίπτωση του MaxProp θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 4^η υλοποίηση του Spray&Wait (150 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης MaxProp 150 κόμβων

	MAXP-150
<code>sim_time</code>	43000
<code>created</code>	1454
<code>started</code>	175303
<code>relayed</code>	148582
<code>aborted</code>	26714
<code>dropped</code>	87589
<code>delivered</code>	236
<code>delivery_prob</code>	0.1623
<code>response_prob</code>	0
<code>overhead_ratio</code>	628.5847
<code>latency_avg</code>	1953.8826
<code>latency_med</code>	1753.9000
<code>hopcount_avg</code>	6.3644
<code>hopcount_med</code>	6
<code>buffertime_avg</code>	172.0613
<code>buffertime_med</code>	4.2000

4.6 Epidemic

Εν συνεχεία εξετάζεται η περίπτωση του Epidemic routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 1^η περίπτωση των υλοποιήσεων Spray&Wait και MaxProp (7 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Epidemic 7 κόμβων

	EPI-7
<code>sim_time</code>	43000
<code>created</code>	1454
<code>started</code>	50
<code>relayed</code>	36
<code>aborted</code>	14
<code>dropped</code>	1443
<code>delivered</code>	9

delivery_prob	0.0062
response_prob	0
overhead_ratio	3
latency_avg	3156.9000
latency_med	797.6000
hopcount_avg	1.7778
hopcount_med	2
buffertime_avg	363.6442
buffertime_med	351

Ακολουθεί η περίπτωση του Epidemic routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 2^η περίπτωση των υλοποιήσεων `Spray&Wait` και `MaxProp` (55 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Epidemic 55 κόμβων

	EPI-55
sim_time	43000
created	1454
started	54505
relayed	48854
aborted	5646
dropped	49760
delivered	50
delivery_prob	0.0344
response_prob	0
overhead_ratio	976.0800
latency_avg	4515.8700
latency_med	2586.3000
hopcount_avg	6.7200
hopcount_med	7
buffertime_avg	249.7779
buffertime_med	47.4000

Ακολουθεί η περίπτωση του Epidemic routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 3^η περίπτωση των υλοποιήσεων `Spray&Wait` και `MaxProp` (100 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Epidemic 100 κόμβων

	EPI-100
sim_time	43000
created	1454
started	161599
relayed	145040
aborted	16550
dropped	145165
delivered	85
delivery_prob	0.0585
response_prob	0
overhead_ratio	1705.3530
latency_avg	3607.6660
latency_med	2715.4000
hopcount_avg	6.8118
hopcount_med	5
buffertime_avg	240.4260
buffertime_med	36.5000

Ακολουθεί η περίπτωση του Epidemic routing θεωρώντας όλα τα μεγέθη σταθερά σύμφωνα με την 4^η περίπτωση των υλοποιήσεων Spray&Wait και MaxProp (150 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Epidemic 150 κόμβων

	EPI-150
sim_time	43000
created	1454
started	307435
relayed	274187
aborted	33229
dropped	273935
delivered	81
delivery_prob	0.0557
response_prob	0
overhead_ratio	3384.0250
latency_avg	4073.8690
latency_med	2427.3000
hopcount_avg	11.3210

hopcount_med	10
buffertime_avg	132.8333
buffertime_med	38.4000

4.7 PROPHET

Ακολούθως εξετάζεται η περίπτωση του PROPHET routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 1^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (7 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης PROPHET 7 κόμβων

	PRO-7
sim_time	43000
created	1454
started	1079
relayed	1002
aborted	77
dropped	2413
delivered	3
delivery_prob	0.0021
response_prob	0
overhead_ratio	333
latency_avg	13275.2000
latency_med	13692
hopcount_avg	3
hopcount_med	2
buffertime_avg	314.7638
buffertime_med	280

Ακολουθεί η περίπτωση του PROPHET routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 2^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (55 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης PROPHET 55 κόμβων

	PRO-55
sim_time	43000
created	1454

started	70835
relayed	65224
aborted	5604
dropped	66000
delivered	79
delivery_prob	0.0543
response_prob	0
overhead_ratio	824.6203
latency_avg	5532.7250
latency_med	4375.4000
hopcount_avg	4.8101
hopcount_med	4
buffertime_avg	249.2317
buffertime_med	19

Ακολουθεί η περίπτωση του P_{Ro}PHET routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 3^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (100 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης P_{Ro}PHET 100 κόμβων

	PRO-100
sim_time	43000
created	1454
started	191478
relayed	175611
aborted	15852
dropped	175759
delivered	105
delivery_prob	0.0722
response_prob	0
overhead_ratio	1671.4860
latency_avg	6104.6600
latency_med	5386.7000
hopcount_avg	6.9333
hopcount_med	6
buffertime_avg	211.8212
buffertime_med	19.4000

Ακολουθεί η περίπτωση του PRoPHET routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 4^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (150 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης PRoPHET 150 κόμβων

	PRO-150
<code>sim_time</code>	43000
<code>created</code>	1454
<code>started</code>	330379
<code>relayed</code>	300991
<code>aborted</code>	29369
<code>dropped</code>	300788
<code>delivered</code>	100
<code>delivery_prob</code>	0.0688
<code>response_prob</code>	0
<code>overhead_ratio</code>	3008.9100
<code>latency_avg</code>	7010.4370
<code>latency_med</code>	5766.6000
<code>hopcount_avg</code>	8.6900
<code>hopcount_med</code>	8
<code>buffertime_avg</code>	173.8895
<code>buffertime_med</code>	24.6000

4.8 First Contact (Πρώτη επαφή)

Ακολούθως εξετάζεται η περίπτωση του First Contact routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 1^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (7 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης First Contact 7 κόμβων

	FST-7
sim_time	43000
created	1454
started	48
relayed	31
aborted	17
dropped	1430
delivered	5
delivery_prob	0.0034
response_prob	0
overhead_ratio	5.2000
latency_avg	286.9800
latency_med	127.8000
hopcount_avg	1.2000
hopcount_med	1
buffertime_avg	367.4482
buffertime_med	352

Ακολουθεί η περίπτωση του First Contact routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 2^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (55 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης First Contact 55 κόμβων

	FST-55
sim_time	43000
created	1454
started	8068
relayed	6149
aborted	1918
dropped	1303
delivered	62
delivery_prob	0.0426
response_prob	0
overhead_ratio	98.1774
latency_avg	8353.6820

latency_med	6386.7000
hopcount_avg	23.4839
hopcount_med	29
buffertime_avg	400.5150
buffertime_med	140.6000

Ακολουθεί η περίπτωση του First Contact routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 3^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (100 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης First Contact 100 κόμβων

	FST-100
sim_time	43000
created	1454
started	25579
relayed	19796
aborted	5781
dropped	1194
delivered	125
delivery_prob	0.0860
response_prob	0
overhead_ratio	157.3680
latency_avg	9051.2510
latency_med	6798.9000
hopcount_avg	43.1040
hopcount_med	51
buffertime_avg	220.1438
buffertime_med	46.8000

Ακολουθεί η περίπτωση του First Contact routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 4^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (150 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης First Contact 150 κόμβων

	FST-150
sim_time	43000
created	1454

started	47727
relayed	36164
aborted	11558
dropped	1119
delivered	149
delivery_prob	0.1025
response_prob	0
overhead_ratio	241.7114
latency_avg	8300.2730
latency_med	6478.7000
hopcount_avg	62.4698
hopcount_med	71
buffertime_avg	152.4751
buffertime_med	28

4.9 Direct Delivery (Απευθείας παράδοση)

Ακολούθως εξετάζεται η περίπτωση του Direct Delivery routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 1^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (7 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Direct Delivery 7 κόμβων

	DIR-7
sim_time	43000
created	1454
started	5
relayed	4
aborted	1
dropped	1441
delivered	4
delivery_prob	0.0028
response_prob	0
overhead_ratio	0
latency_avg	176.9250
latency_med	221.8000
hopcount_avg	1
hopcount_med	1
buffertime_avg	364.3822
buffertime_med	352

Ακολουθεί η περίπτωση του Direct Delivery routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 2^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (55 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Direct Delivery 55 κόμβων

	DIR-55
<code>sim_time</code>	43000
<code>created</code>	1454
<code>started</code>	9
<code>relayed</code>	7
<code>aborted</code>	2
<code>dropped</code>	1441
<code>delivered</code>	7
<code>delivery_prob</code>	0.0048
<code>response_prob</code>	0
<code>overhead_ratio</code>	0
<code>latency_avg</code>	246.9000
<code>latency_med</code>	202.6000
<code>hopcount_avg</code>	1
<code>hopcount_med</code>	1
<code>buffertime_avg</code>	364.4155
<code>buffertime_med</code>	352

Ακολουθεί η περίπτωση του Direct Delivery routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 3^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (100 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Direct Delivery 100 κόμβων

	DIR-100
<code>sim_time</code>	43000
<code>created</code>	1454
<code>started</code>	16
<code>relayed</code>	13
<code>aborted</code>	3
<code>dropped</code>	1441
<code>delivered</code>	13

delivery_prob	0.0089
response_prob	0
overhead_ratio	0
latency_avg	124.4692
latency_med	130.5000
hopcount_avg	1
hopcount_med	1
buffertime_avg	364.3761
buffertime_med	352

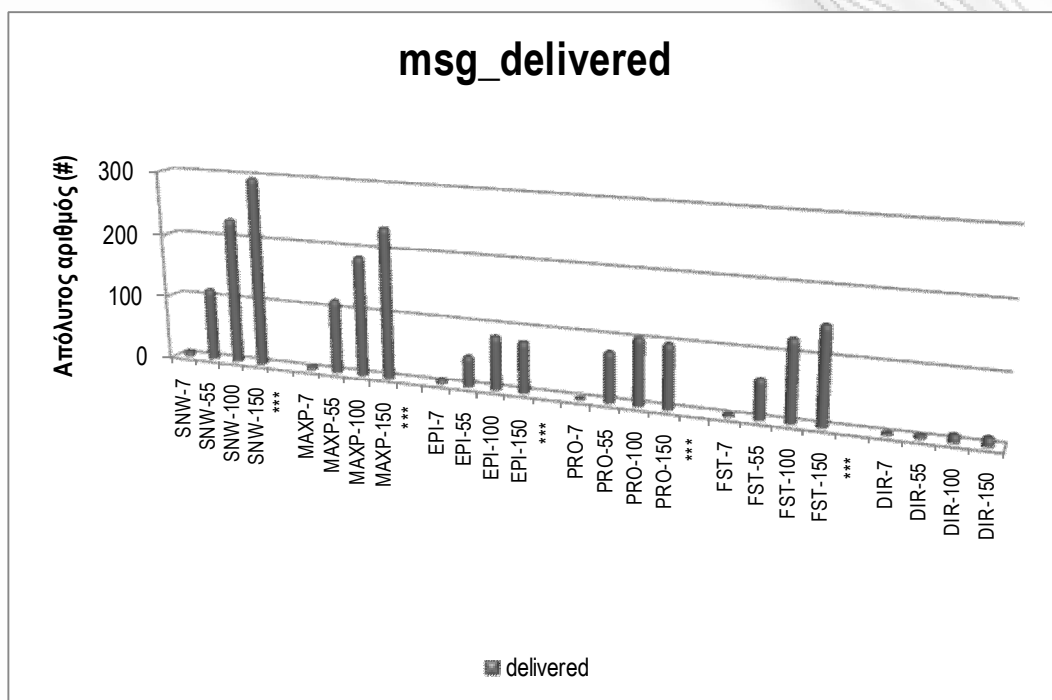
Ακολουθεί η περίπτωση του Direct Delivery routing θεωρώντας τα μεγέθη `sim_time`, `messages_created` σταθερά σύμφωνα με την 4^η περίπτωση των προαναφερθέντων υλοποιήσεων (150 κόμβοι), για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Αποτελέσματα προσομοίωσης Direct Delivery 150 κόμβων

	DIR-150
sim_time	43000
created	1454
started	17
relayed	14
aborted	3
dropped	1441
delivered	14
delivery_prob	0.0096
response_prob	0
overhead_ratio	0
latency_avg	149.5429
latency_med	148.1000
hopcount_avg	1
hopcount_med	1
buffertime_avg	364.2590
buffertime_med	352

4.10 Σύγκριση σεναρίων

Στην παρούσα ενότητα συνοψίζονται τα μετρήσιμα στοιχεία που συλλέχθηκαν από τις προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα παρακάτω ραβδογράμματα:



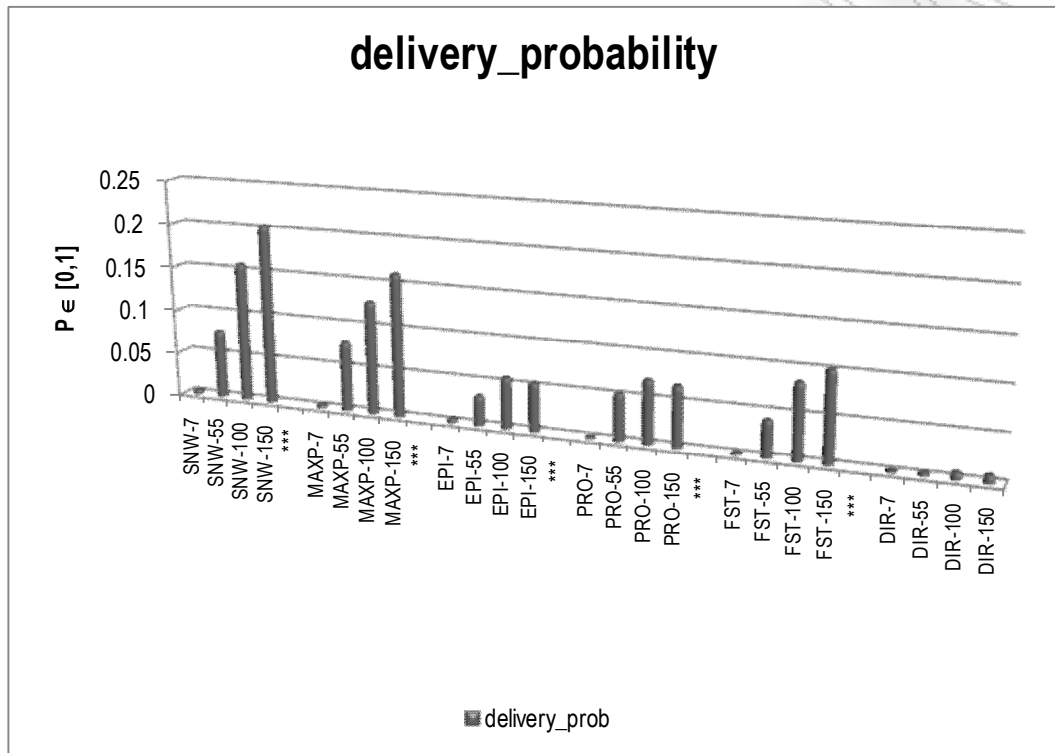
Σχήμα 4.5A: Σύγκριση σεναρίων – επιτυχείς παραδόσεις μηνυμάτων

Στον αριστερό άξονα τιμών του Σχήματος 4.5A έχουμε τον απόλυτο αριθμό των μηνυμάτων που παραδόθηκαν επιτυχώς, σε σύνολο 1454. Στον οριζόντιο άξονα εμφανίζονται τα πρωτόκολλα που μελετήθηκαν και ο αριθμός ενεργών κόμβων κάθε περίπτωσης. Δηλαδή απεικονίζονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- SNW – Spray and Wait (7, 55, 100, 150 κόμβοι)
- MAXP – MaxProp (7, 55, 100, 150 κόμβοι)
- EPI – Epidemic (7, 55, 100, 150 κόμβοι)
- PRO – PRoPHET (7, 55, 100, 150 κόμβοι)
- FST – First Contact (7, 55, 100, 150 κόμβοι)
- DIR – Direct Delivery (7, 55, 100, 150 κόμβοι)

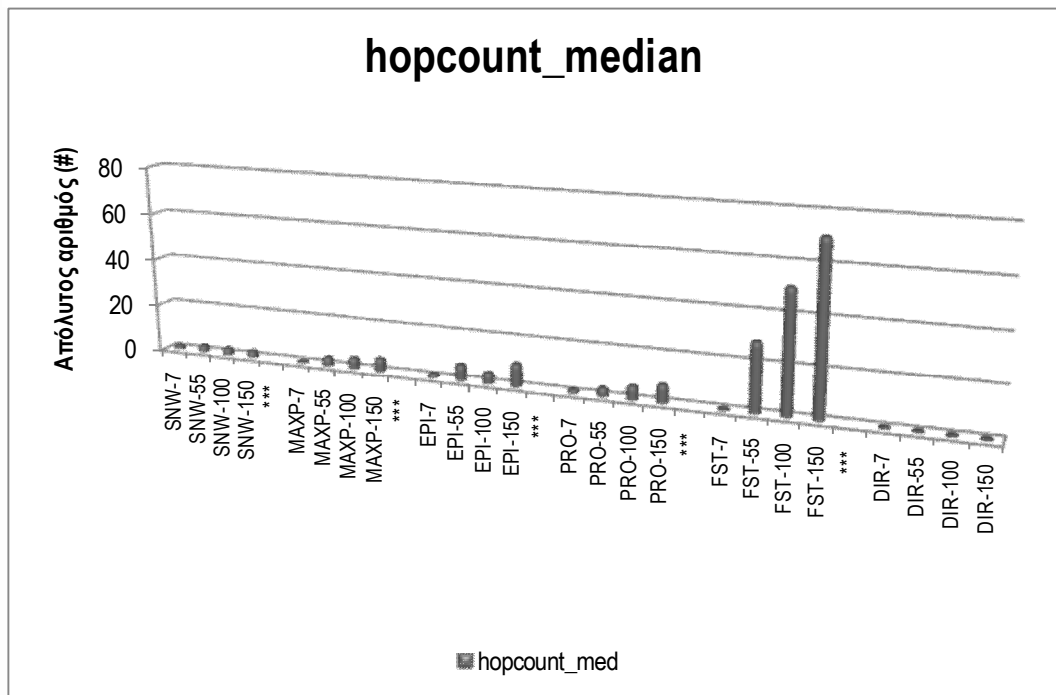
Από το πρώτο ραβδόγραμμα (4.5A) και θεωρώντας τα μεγέθη της ταχύτητας μετάδοσης και άλλων καθυστερήσεων σταθερά, συμπεραίνεται ότι το

Spray&Wait έχει τον υψηλότερο ρυθμό παράδοσης μηνυμάτων στις 12 ώρες της προσομοίωσης, ο οποίος αγγίζει τα 300 μηνύματα σε σύνολο 1454 που είχαν δημιουργηθεί.



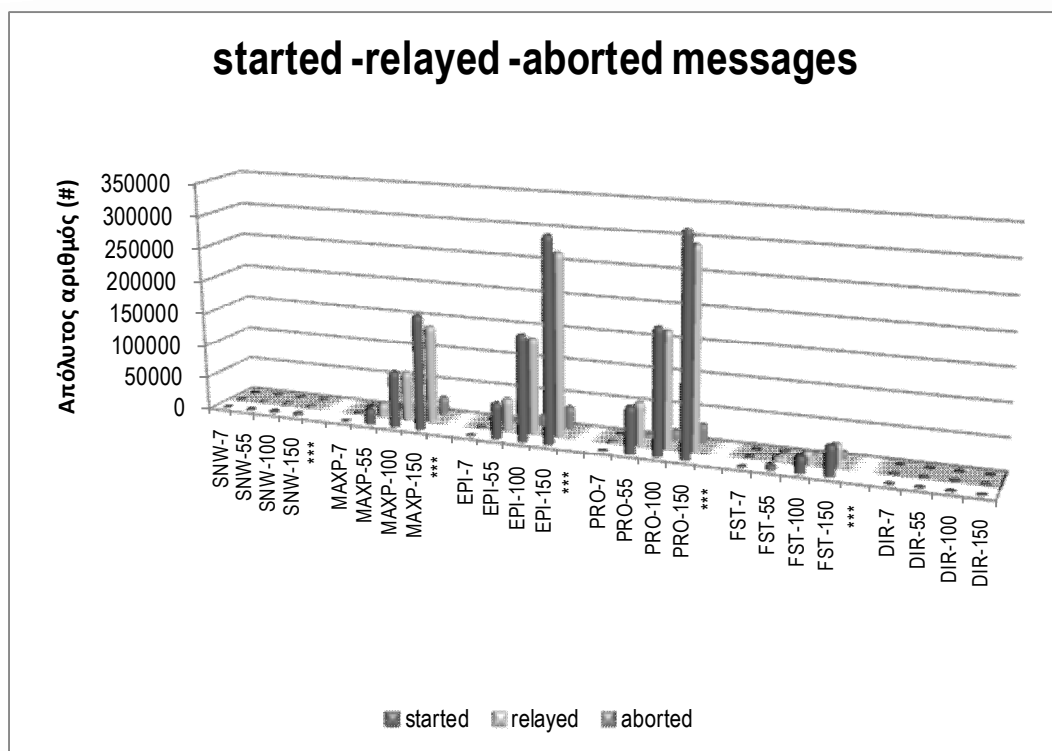
Σχήμα 4.5B: Σύγκριση σεναρίων –πιθανότητα επιτυχούς παράδοσης

Στον άξονα τιμών του Σχήματος 4.5B εμφανίζεται η πιθανότητα παράδοσης, από 0 ως 1. Από το παρόν διάγραμμα (4.5B) και θεωρώντας τα μεγέθη της ταχύτητας μετάδοσης και άλλων καθυστερήσεων σταθερά, συμπεραίνεται ότι το Spray&Wait έχει την υψηλότερη πιθανότητα επιτυχούς παράδοσης σε όλες τις περιπτώσεις μελέτης (7, 55, 100, 150 ενεργοί κόμβοι), η οποία ξεπερνάει το 20% για την περίπτωση των 150 κόμβων. Ακολουθούν το MaxProp 150 κόμβων με κάτι περισσότερο από 15%, το First Contact 150 κόμβων με περίπου 10%, το PRoPHET και Epidemic 150 κόμβων με ποσοστό επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων που προσεγγίζει το 5% και τέλος το Direct Delivery με ποσοστά πολύ χαμηλότερα του 5%, κάτι που θεωρείται αναμενόμενο αφού σε τέτοιου είδους ευκαιριακά περιβάλλοντα με ασταθείς ζεύξεις είναι δύσκολο να πετύχουμε την απευθείας παράδοση στον κόμβο τελικού προορισμού.



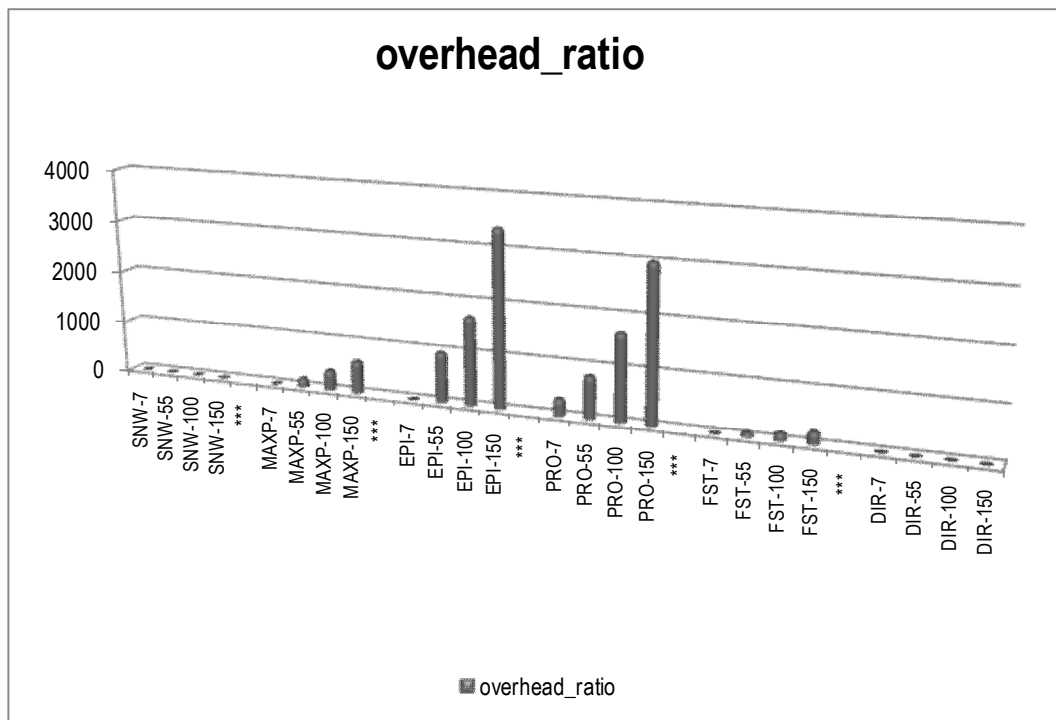
Σχήμα 4.6: Σύγκριση σεναρίων –μέση τιμή hops

Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζονται οι μέσες τιμές των hops για τη δρομολόγηση των μηνυμάτων σε κάθε μία από τις περιπτώσεις των σεναρίων δρομολόγησης που μελετώνται. Μεσοσταθμικά προηγείται το Spray & Wait με μικρότερη μέση τιμή hops και ακολουθούν τα MaxProp, Epidemic και PRoPHET με διπλάσιες σχεδόν μέσες τιμές hops. Το First Contact είναι απολύτως λογικό να εμφανίζει τόσο υψηλές μέσες τιμές hops όπως εξηγείται και στα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου στην ενότητα 2.5-First Contact. Το Direct Delivery εξ' ορισμού διατηρεί το 1 και μόνο hop αφού παραδίδει απευθείας από την πηγή στον τελικό αποδέκτη.



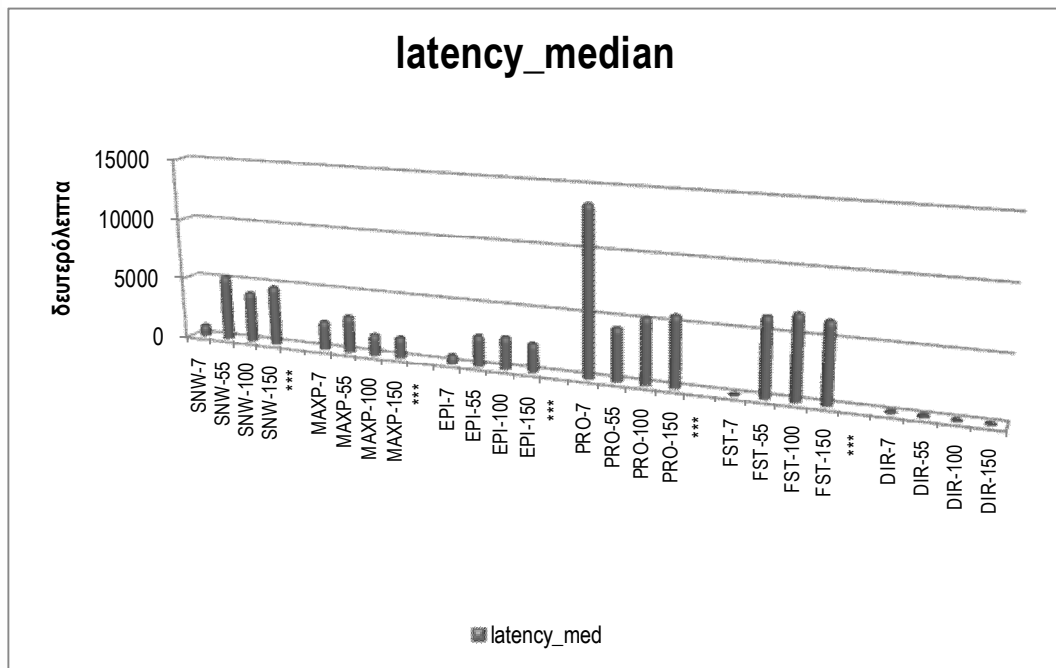
Σχήμα 4.7: Σύγκριση σεναρίων –αριθμός μηνυμάτων (started-relayed-aborted)

Το Σχήμα 4.7 απεικονίζει τον ολικό αριθμό (πρωτοτύπων και αντιγράφων) που εκκινήθηκαν σε κάθε περίπτωση, σε συνδυασμό με τα relayed και aborted μηνύματα. Αξιόλογο είναι το γεγονός ότι στο Spray & Wait ο αριθμός των μηνυμάτων που ξεκινούν προς δρομολόγηση είναι πολύ μικρός σε σύγκριση με τα πρωτόκολλα MaxProp, Epidemic, PRoPHET, First Contact, καθώς στο Spray & Wait πραγματοποιείται αποτελεσματικότερη διαχείριση δικτυακών πόρων, θέτοντας ανώτατο όριο αντιγράφων (π.χ. 10 και μόνον). Έτσι δεν αυξάνονται υπέρμετρα τα αντίγραφα στο δίκτυο μας όπως στην περίπτωση του Epidemic, PRoPHET στο οποίο το δίκτυο με την παρούσα παραμετροποίηση δείχνει να ‘γεμίζει’ επικίνδυνα. Το Direct Contact δεν παράγει αντίγραφα.



Σχήμα 4.8: Σύγκριση σεναρίων –λόγος relayed/delivered μηνυμάτων (overhead ratio)

Το overhead_ratio προκύπτει από το λόγο relayed προς delivered μηνυμάτων. Και σ' αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα του Σχήματος 4.8 είναι αναμενόμενα καθώς στα Epidemic και PRoPHET πρωτόκολλα υπάρχει υπέρμετρη, ανεξέλεγκτη δημιουργία αντιγράφων, τα οποία δεν συμβάλλουν σε αντίστοιχη αύξηση των επιτυχημένων παραδόσεων, με αποτέλεσμα το μόνο που καταφέρνουν τα παραπάνω μηνύματα είναι να μπλοκάρουν το δίκτυο και γενικότερα να ροκανίζουν όλους τους διαθέσιμους δικτυακούς πόρους.



Σχήμα 4.9: Σύγκριση σεναρίων –μέση τιμή καθυστέρησης

Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται γραφικά η μέση τιμή καθυστερήσεων παράδοσης των μηνυμάτων σε δευτερόλεπτα. Επομένως για το Spray & Wait η τιμή ορίζεται στα περίπου 3,500 δευτερόλεπτα (περ. 50-60 λεπτά της ώρας) για όλες τις περιπτώσεις 7-55-100-150 κόμβων, ενώ για τα MaxProp και Epidemic οι καθυστερήσεις διαμορφώνονται μεσοσταθμικά στα 2,500 δευτερόλεπτα ή αλλιώς 35-45 λεπτά της ώρας. Για τα PROPHET και First Contact οι καθυστερήσεις διαμορφώνονται μεσοσταθμικά στα 6,000 δευτερόλεπτα ή αλλιώς 1.5 ώρα.

4.11 Διαπιστώσεις σεναρίων προσομοίωσης

Σύμφωνα με τη θεωρία που αναπτύχθηκε σε προηγούμενες ενότητες της παρούσας μελέτης διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις εναρμονίζονται με το θεωρητικό υπόβαθρο. Πιο συγκεκριμένα, στο Direct Delivery (απευθείας παράδοση), τα ποσοστά επιτυχούς παράδοσης είναι πάρα πολύ μικρά αφού το πρωτόκολλο καλείται να παραδώσει κατευθείαν στον τελικό προορισμό, κάτι που αποδεικνύεται ιδιαίτερος δύσκολο σε ευκαιριακά, ετερογενή περιβάλλοντα (DTN δίκτυα). Το First Contact (πρώτη επαφή) οδηγεί τα μηνύματα σε πολλά και ανούσια hops, με αποτέλεσμα να περιφέρονται άσκοπα στο δίκτυο, δημιουργώντας συμφόρηση, χωρίς να

συμβάλλουν θετικά στην αύξηση του ποσοστού επιτυχούς παράδοσης. Ακολουθεί το epidemic routing, στο οποίο παρατηρείται ότι η ανάγκη για αυξημένους δικτυακούς πόρους, αποθήκευση και υπολογιστικής ισχύος, οδηγούν σε χαμηλά ποσοστά επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων καθώς σύμφωνα με το πρωτόκολλο δεν γίνεται προσπάθεια να μειωθούν τα αντίγραφα τα οποία δεν θα βοηθούσαν στη βελτίωση της πιθανότητας παράδοσης. Με λίγα λόγια δεν υπάρχει επαρκής αξιολόγηση των αντιγράφων και ο αντίκτυπος αυτής της διαδικασίας φαίνεται στα σχετικά σχήματα, όπου μελετάται η πιθανότητα παράδοσης και το overhead ratio σε 7, 55, 100 και 150 κόμβους (κινητούς και ακίνητους) αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα του PRoPHET ομοιάζουν με το Epidemic με μικρές διαφοροποιήσεις στα μηνύματα που ξεκινούν να αποστέλλονται (περιλαμβάνεται πιθανότητα εμφάνισης κόμβου σε μία συγκεκριμένη διαδρομή) κάτι που αποδεικνύεται και εξ' ορισμού αφού, αν ένας κόμβος έχει ήδη επισκεφθεί μία περιοχή αρκετές φορές τότε θεωρείται αρκετά πιθανό να την ξαναεπισκεφθεί. Το δεύτερο καλύτερο DTN πρωτόκολλο δρομολόγησης, με διαφορά από τα προηγούμενα, αποδεικνύεται το MaxProp το οποίο χρησιμοποιεί hoplist ώστε κάποιο μήνυμα να μην ξαναεπισκεφθεί τον ίδιο κόμβο. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη μέθοδο σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα πακέτα με χαμηλό καταγεγραμμένο αριθμό hops προτεραιοποιούνται έναντι άλλων, καταλήγουμε σε αποδοτικότερες μετρήσεις και αρκετά χαμηλότερο overhead ratio σε όλες τις περιπτώσεις των 7, 55, 100 και 150 κινητών και ακίνητων κόμβων. Η καλύτερη όμως επιλογή από πλευράς απόδοσης παράδοσης μηνυμάτων σύμφωνα με τις τρέχουσες προσομοιώσεις αποδεικνύεται η υλοποίηση του Spray & Wait πρωτοκόλλου δρομολόγησης, στο οποίο ορίζεται ένα άνω όριο αντιγράφων για κάθε μήνυμα (στην περίπτωση μας δέκα) και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αποδοτικότερη διαχείριση δικτυακών πόρων αποφεύγοντας το συνεχές και άσκοπο ενίοτε replication μηνυμάτων. Επομένως, οι μετρήσεις των 7, 55, 100 και 150 κόμβων αποδεικνύονται οι καλύτερες σε επίπεδο παράδοσης, μέσου αριθμού hops, overhead ratio και αριθμού μηνυμάτων που κινούνται στο δίκτυο (πρωτοτύπων και αντιγράφων) όπως αποδεικνύεται από τα σχήματα 4.5A, 4.5B, 4.6, 4.7, 4.8. Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τα θετικά και αρνητικά σημεία κάθε πρωτοκόλλου δρομολόγησης λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω προσομοιώσεις.

Πίνακας 4.1: Αποτελεσματικότητα πρωτοκόλλων DTN

Πρωτόκολλο σε DTN	Πιθανότητα παράδοσης	Hops	Overhead	Καθυστερήσεις	Τελική βαθμολογία με βαρύτητες	Γενική κατάταξη
Spray&Wait	+2	+2	+2	+1	+1.8	1
MaxProp	+2	+2	+1	+1	+1.6	2
PRoPHET	+1	+1	-2	+1	+0.4	3
First Contact	+1	-2	+1	-1	+0.3	4
Epidemic	+1	+1	-2	0	+0.2	5
Direct Delivery	-2	0	0	0	-1.0	6

Επεξήγηση κλίμακας:

- 2 (πολύ αρνητικό)
- 1 (αρνητικό)
- 0 (ουδέτερο)
- +1 (θετικό)
- +2 (πολύ θετικό)

Βαρύτητες που λαμβάνονται υπόψη για την τελική κατάταξη:

Πιθανότητα παράδοσης:	0.5
Hops:	0.1
Overhead:	0.2
Καθυστερήσεις:	0.2

Σύνολο:	1.0

Οι βαρύτητες προσδιορίζονται με βάση τη σημαντικότητα κάθε παράγοντα στην διαδικασία αποστολής, μεταφοράς και παράδοσης μηνυμάτων στο δίκτυο. Η πιθανότητα επιτυχούς παράδοσης κατέχει την υψηλότερη θέση στη λίστα με τις βαρύτητες επειδή δεν έχει νόημα ύπαρξης το εκάστοτε δίκτυο όταν δεν

παραδίδονται επιτυχώς τα μηνύματα. Τα υπόλοιπα θεωρούνται ισοβαρή σχεδόν μεγέθη.

Η τελική βαθμολογία και η τελική κατάταξη δεν επιφυλάσσουν εκπλήξεις καθώς επιβεβαιώνουν τη θεωρία. Πιο συγκεκριμένα, τα Spray&Wait και MaxProp υπερτερούν σημαντικά έναντι των υπολοίπων πρωτοκόλλων επειδή δεν σπαταλούν πολύτιμους δικτυακούς πόρους διατηρώντας hoplists ώστε να μην επισκέπτονται ξανά και ξανά τον ίδιο κόμβο (MaxProp) και δημιουργώντας περιορισμένο (εξ' αρχής) αριθμό αντιγράφων (Spray&Wait) αποφεύγοντας την άσκοπη συμφόρηση του δικτύου από άχρηστα μηνύματα. Το PRoPHET, First Contact και Epidemic ακολουθούν με αρκετή διαφορά από τα δύο πρώτα, αλλά μεταξύ τους είναι πολύ κοντά βαθμολογικά. Κάτι αναμενόμενο αφού τα PRoPHET και Epidemic μεν, ομοιάζουν στη μεθοδολογία δρομολόγησης που ακολουθείται με μικρή διαφορά στον πίνακα δρομολόγησης που δίνει το προβάδισμα στο PRoPHET έναντι του Epidemic, το First Contact δε, θα μπορούσε να έχει καλύτερη βαθμολογία αν δεν υπήρχε ο τόσο υψηλός αριθμός ανούσιων hops τα οποία δεν συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανότητας επιτυχούς παράδοσης, απλώς δημιουργούν περισσότερη συμφόρηση στο δίκτυο, με τα ίδια μηνύματα να επισκέπτονται αρκετές φορές τους ίδιους κόμβους (αφού δεν διατηρείται hoplist). Τέλος το Direct Delivery έχει την χαμηλότερη βαθμολογία επειδή δεν ενδείκνυται μέθοδος απευθείας παράδοσης στον τελικό κόμβο προορισμού σε τέτοιου είδους ετερογενή και ευκαιριακά περιβάλλοντα με ασταθείς ζεύξεις. Εξ' ορισμού και εξ' αποτελεσμάτων (μικρότερος δείκτης παράδοσης μηνυμάτων απ' όλα τα προηγούμενα πρωτόκολλα) απορρίπτεται και καταλαμβάνει την τελευταία θέση στη γενική κατάταξη των DTN πρωτοκόλλων.

5. Συμπεράσματα

5.1 Γενικά

Στην παρούσα μελέτη ορίσθηκαν τα δίκτυα ανεκτικά σε καθυστερήσεις, λαμβάνοντας υπόψη το ιστορικό τους, την εξέλιξη τους, τα νέα πρότυπα καθώς και τις τελευταίες πειραματικές εφαρμογές στη δρομολόγηση πακέτων σε τέτοιου είδους δίκτυα. Επιπροσθέτως γίνεται αναφορά στο κινητό ad-hoc δίκτυο (MANET), το δίκτυο mesh καθώς και βασικά χαρακτηριστικά του διαπλανητικού διαδικτύου.

Ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών των δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις με τα κοινωνικά δίκτυα και η συνεχής εξέλιξη αυτών καθιστά αναγκαία την παράλληλη μελέτη υλοποιήσεων κατάλληλων πρωτοκόλλων που θα αναδιοργανώσουν το διαδικτυακό (επίγειο και διαπλανητικό) τοπίο στο προσεχές μέλλον.

Η πρακτική εφαρμογή των παραπάνω, οδηγεί στην εκτέλεση χαρακτηριστικών προσομοιώσεων, υλοποιώντας πρωτόκολλα δρομολόγησης δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις με τη βοήθεια ενός DTN προσομοιωτή του Πανεπιστημίου τεχνολογίας του Ελσίνκι. Τα τελικά αποτελέσματα απεικονίζονται αριθμητικά, λεκτικά και διαγραμματικά στην ενότητα 4.10-Σύγκριση σεναρίων.

5.2 Εργαλεία

Κατά τη διαδικασία της μελέτης και προσομοίωσης των σεναρίων πρωτοκόλλων δρομολόγησης χρησιμοποιήθηκαν:

- i/ Java v.1.6 (2008) ή μεταγενέστερο
- ii/ Opportunistic Network Environment (ONE) simulator
–Version 1.1.0 (6 May 2008)

5.3 Μελλοντικές δυνατότητες –Επεκτάσεις

Οι νέες δικτυακές δυνατότητες οι οποίες δίδονται με την έλευση των νέων ασύρματων, φορητών συσκευών έχουν τη δυναμική να λανσάρουν στην αγορά νέες εφαρμογές και δικτυακές λύσεις οι οποίες ήταν αδύνατον πριν μερικά χρόνια

να λειτουργήσουν επιτυχώς. Επειδή όμως οι κινούμενοι κόμβοι στα ασύρματα δίκτυα δεν είναι πάντα διαθέσιμοι (εντός εμβέλειας) πρέπει να αναπτυχθούν λύσεις και κανονισμοί (πρωτόκολλα) επικοινωνίας τα οποία να υποστηρίζουν αυτού του είδους τις ευκαιριακές ζεύξεις μεταξύ των κόμβων.

Στα σενάρια μας έγινε χρήση τεχνικής FIFO (First In-First Out) για την ουρά του buffer, με αποτέλεσμα όταν γεμίσει η ουρά να αποβάλλονται (dropped) τα πιο παλιά μηνύματα (δηλ. τα μηνύματα με τον μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στην ουρά του buffer). Παραταύτα, ίσως ήταν αποτελεσματικότερο να διαγράφεται για παράδειγμα το μήνυμα το οποίο έχει ήδη προωθηθεί σε πολλούς άλλους γειτονικούς κόμβους, άρα να υπάρχει ένας μετρητής αριθμού προώθησης ο οποίος θα αυξάνεται κάθε φορά που κάποιο αντίγραφο του πακέτου προωθείται σε άλλο κόμβο [32].

Συγχρόνως, θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν και κοινωνικοί αλγόριθμοι, σύμφωνα με τους οποίους η κινητή συσκευή έχει την ικανότητα να γνωρίζει διάφορα στοιχεία για τις συνήθειες του ατόμου που τη χρησιμοποιεί στα πλαίσια της ευρύτερης context-aware ανάλυσης η οποία κρίνεται ιδιαίτερα δημοφιλής το τελευταίο διάστημα. Ακόμα λοιπόν δεν υπάρχει κάποιος ξεκάθαρος νικητής αλλά αρκετοί καλοί υποψήφιοι στην αρένα των πρωτοκόλλων DTN δρομολόγησης. Καθένα από αυτά είναι γεγονός ότι υπερτερεί σε διαφορετικό σημείο. Επομένως, παρόλο που η επιστημονική κοινότητα προσπαθεί να καταλήξει σε μία λύση DTN πρωτοκόλλου για όλες τις περιπτώσεις ασύρματης δικτύωσης, πιστεύεται ότι θα συνεχίσουν να υπάρχουν φωλιές εξειδίκευσης (niches), στις οποίες θα χρειάζονται εξειδικευμένοι αλγόριθμοι δρομολόγησης που δεν θα καλύπτονται επαρκώς από το βασικό DTN πρωτόκολλο δρομολόγησης που θα αποφασισθεί [33].

Πηγές

1. Interplanetary Network Directorate
2. Jackson, J., 'The Interplanetary Internet', *IEEE Spectrum*, 2005.
3. Cerf, V., et al., 'Interplanetary Internet (IPN): Architectural Definition', *Jet Propulsion Laboratory*, 2001.
4. Delay-Tolerant Networking Research Group
5. Cerf, V., et al., 'Delay-Tolerant Networking Architecture', *Request for Comments 4838*, 2007.
6. Scott, K., et al., 'Bundle Protocol Specification', *Request for Comments 5050*, 2007.
7. Warthman, F., 'Delay-Tolerant Networks Tutorial', *Warthman Associates*, 2003.
8. Wikipedia.org, various articles.
9. Durst, R., 'Space Communications Protocol Standards Overview', *The MITRE Corporation*, 1998.
10. Khelil A., 'Contact-based buffering for delay-tolerant ad hoc broadcasting', *Computer Communications*, nr. 30, June 2007, pp.3144–3153.
11. Markose, T., et al., 'Using group structures for efficient routing in delay tolerant networks', *Ad Hoc Networks*, nr. xxx, April 2008, pp. xxx–xxx.
12. Leduc, G., et al., 'Routing based on delivery distributions in predictable disruption tolerant networks', *Ad Hoc Networks*, nr. xxx, February 2008, pp. xxx–xxx.
13. Pitkanen, M., Ott, J., 'Enabling opportunistic storage for mobile DTNs', *Pervasive and Mobile Computing*, nr. xxx, April 2008, pp. xxx-xxx.
14. Jain S., et al., 'Routing in a Delay Tolerant Network', *ACM SIGCOMM'04*, September 2004.
15. Sgroi, D., 'Social network theory, broadband and the future of the World Wide Web', *Telecommunications Policy*, nr. 32, 2008, pp.62–84.
16. Burgess, J., Gallagher, B., Jensen, D., Levine, B., 'MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks', *IEEE INFOCOM Barcelona'06*, April 2006.

17. Balasubramanian, A., Levine, B., Venkataramani, A., 'DTN Routing as a Resource Allocation Problem', *ACM SIGCOMM Kyoto '07*, August 2007.
18. Spyropoulos, T., Psounis, K., Raghavendra, C., 'Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks', *ACM SIGCOMM Philadelphia '05*, workshop on Delay-tolerant networking, August 2005.
19. Perkins, C., et al., 'Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing', *Request for Comments 3561*, 2003.
20. Johnson, D., et al., 'The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4', *Request for Comments 4728*, 2007.
21. National Institute of Standards and Technology, 'Simulation Model for the DSR MANET Routing Protocol', 2000.
22. Carchiolo, V., Malgeri, M., Mangioni, G., Nicosia, V., 'Emerging structures of P2P networks induced by social relationships', *Computer Communications*, nr.31, 2008, pp. 620–628.
23. Crocker, Steve., 'Host Software', *Request for Comments 1*, UCLA, 1969.
24. Peltola, Lauri, 'Enabling DTN-based Web Access: the Server Side', *Helsinki University of Technology, Networking Laboratory*, April 2008.
25. Jones, Evans, 'Practical Routing in Delay Tolerant Networks', *University of Waterloo, Ontario, Canada*, 2006.
26. Δουληγέρης, Χ., Κοπανάκη, Ε., Μακροπόδη, Ρ., *Τεχνολογίες Διαδικτύου*, Αθήνα, Εκδόσεις Νηρηίδες, 2004.
27. Mukhtar, O., 'Design and Implementation of Bundle Protocol Stack for Delay-Tolerant Networking', *Helsinki University of Technology*, 2006.
28. The Wizzy Digital Courier Project at <http://www.wizzy.org.za/article/articleprint/19/1/2/>.
29. The WiMax Forum at www.wimaxforum.org.
30. High Speed Packet Access at hspa.gsmworld.com
31. Vahdat, A., Becker, D., 'Epidemic Routing for Partially Connected Ad-Hoc Networks', *Technical Report CS-2000-06*, Department of Computer Science, Duke University, April 2000.
32. Lindgren, A., Doria, A., Scheln, O., 'Probabilistic routing in intermittently connected networks' *In Proceedings of the Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2003)*, 2003.

33. Islam, A., Waldvogel, M., 'Reality check for DTN Routing algorithms', *28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 2008.

РАКЕТНО ТЕРА