



*Ξενοφών Τιμολόγος, Βελτίωση Λειτουργίας Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης με
χρήση Ηλικίας-της-Πληροφορίας*



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Πρόγραμμα Σπουδών

Μεταπτυχιακή Εξειδίκευση στα Πληροφοριακά Συστήματα (ΠΛΣ)

Διπλωματική Εργασία

Βελτίωση Λειτουργίας Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης με χρήση Ηλικίας-της-
Πληροφορίας.

ΞΕΝΟΦΩΝ ΤΙΜΟΛΟΓΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής: ΒΑΣΙΛΗΣ ΚΑΡΥΩΤΗΣ

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2023

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή (Ξενοφών Τιμόλογος) που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



*Ξενοφών Τιμόλογος, Βελτίωση Λειτουργίας Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης με
χρήση Ηλικίας-της-Πληροφορίας*



Βελτίωση Λειτουργίας Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης με χρήση Ηλικίας-της-
Πληροφορίας

Ξενοφών Τιμόλογος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Βασίλης Καρυώτης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Πληροφορικής

Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Ιωάννης Μοσχολιός

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Πληροφορικής

Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2023

«Ευχαριστίες »

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Βασίλη Καρυώτη για το συνεχές ενδιαφέρον, τη βοήθεια και φυσικά για την υπομονή του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγο μου Ευριδίκη Ποταμιάνου για την κατανόηση.

Περίληψη

Το πρόβλημα της δρομολόγησης είναι ένα από τα σημαντικότερα στα δίκτυα υπολογιστών. Πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, ενώ αρκετές κατηγορίες πρωτοκόλλων είναι σχεδιασμένες για την κάλυψη ειδικών αναγκών και/ή απαιτήσεων που τίθενται στη λειτουργία συγκεκριμένων δικτύων. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η σχεδίαση πρωτοκόλλων για τα λεγόμενα ανθεκτικά-στην-καθυστέρηση δίκτυα (delay tolerant networks). Τα δίκτυα αυτά αναπτύσσονται σε περιβάλλοντα όπου δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη υποδομής ή σε περιπτώσεις όπου η διάδοση του σήματος επικοινωνίας απαιτεί πολύ χρόνο, π.χ. στις διαστημικές επικοινωνίες. Το βασικό πρόβλημα που θεραπεύουν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν σχεδιαστεί για delay tolerant δίκτυα, είναι ότι προλαμβάνουν τη λήξη των χρόνων αναμονής παράδοσης πακέτων και δεν οδηγούν το δίκτυο σε εκτεταμένες απορρίψεις πακέτων που δεν έχουν υποστεί σφάλμα κατά τη μετάδοση, πράγμα που θα συνέβαινε σε άλλη περίπτωση.

Ωστόσο, ένα δευτερογενές πρόβλημα που δημιουργείται στις παραπάνω περιπτώσεις, είναι αυτό της μη-φραγμένης καθυστέρησης παράδοσης πακέτων στους τελικούς προορισμούς. Αν και έχει δείχθει για ορισμένα από αυτά τα πρωτόκολλα ότι ο χρόνος παράδοσης πακέτου είναι πεπερασμένος, δεν έχει προκύψει κάποιο συγκεκριμένο όριο στο χρόνο παράδοσης των πακέτων. Αυτό έχει αντίκτυπο, στο γεγονός ότι καθιστά τέτοια πρωτόκολλα ακατάλληλα προς χρήση σε εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση, π.χ. τηλεχειρισμός οχημάτων κλπ. Είναι λοιπόν χρήσιμο να επιχειρηθεί μια προσπάθεια βελτίωσης αυτής της σκοπιάς των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για delay tolerant δίκτυα.

Μια κατεύθυνση για την εν λόγω βελτίωση αποτελεί η δυνατότητα χρήσης μιας μετρικής, της Ηλικίας-της-Πληροφορίας. Η έννοια της Ηλικίας-της-Πληροφορίας (Age of Information, AoI) έχει αναπτυχθεί για να περιγράψει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή της δημιουργίας μιας πληροφορίας μέχρι τη χρονική στιγμή που «καταναλώνεται» και μπορεί να αποτελέσει οδηγό για την αξιόπιστη χρήση της. Στην παρούσα εργασία η ΗτΠ θα χρησιμοποιηθεί ως η ηλικία των πακέτων και για να τεθούν συγκεκριμένα φράγματα στο χρόνο παράδοσης πακέτων των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Αρχικά σε αυτή τη διπλωματική εργασία συγκεντρώνονται πρωτόκολλα δρομολόγησης που είναι κατάλληλα για delay tolerant δίκτυα και διαχωρίζονται κάποια που χρησιμοποιούν το χρόνο στο σχεδιασμό τους. Στη συνέχεια επιλέγονται 2 συγκεκριμένα πρωτόκολλα και προτείνονται επεκτάσεις, δηλαδή τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να επεκταθεί η λειτουργία των πρωτοκόλλων αυτών χρησιμοποιώντας την ΗτΠ στο σχεδιασμό ώστε να τεθούν χρονικά όρια στο χρόνο παράδοσης των πακέτων. Τέλος, επιλέγεται ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο, η αντίστοιχη επέκτασή του και υλοποιείται η προσομοίωση λειτουργίας του, με σκοπό την ποσοτικοποίηση των ωφελειών που εν δυνάμει προκύπτουν.

Λέξεις – Κλειδιά

Δίκτυα ανεκτικά στην καθυστέρηση, Ηλικία της Πληροφορίας, Κατανεμημένα δίκτυα, Πρωτόκολλα δρομολόγησης, Προσομοίωση

Abstract

The routing problem is one of the most important in computer networks. Many different approaches have been proposed in the literature, while several categories of protocols are designed to cover specific needs and/or requirements placed on the operation of specific networks. A typical case is the design of protocols for the so-called delay-tolerant networks. These networks are developed in environments where infrastructure development is not feasible or in cases where communication signal propagation takes a long time, e.g., in space communications. The key problem addressed by routing protocols designed for delay tolerant networks is that they prevent packet delivery timeouts and do not cause the network to drop packets that have not suffered an error in transit, as would otherwise occur.

However, a secondary problem that arises in the above cases is that of unblocked packet delivery delay to final destinations. Although it has been shown for some of these protocols that the packet delivery time is finite, no definite bound on the packet delivery time has been derived. This has the effect of making such protocols unsuitable for use in delay-sensitive applications, e.g. remote control of vehicles etc. It is therefore useful to attempt to improve this aspect of routing protocols for delay tolerant networks.

One direction for this improvement is the possibility of using a metric, Age-of-Information. The concept of Age-of-Information (AoI) has been developed to describe the period of time that elapses from the moment of creation of an information until the moment it is "consumed" and can be a guide for its reliable use. In this paper, the AoI will be used as the age of the packets and to set specific barriers to the packet delivery time of the routing protocols.

Keywords

Delay Tolerant Networks (DTN), Age of Information (AoI), Distributed networks, Routing protocols, simulation



*Ξενοφών Τιμόλογος, Βελτίωση Λειτουργίας Προτοκόλλων Δρομολόγησης με
χρήση Ηλικίας-της-Πληροφορίας*

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων	xii
Συντομογραφίες&Ακρωνύμια.....	xiii
1. Σκοπός και διάρθρωση της εργασίας	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Συμβολή διπλωματικής εργασίας.....	3
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής	4
2. Δίκτυα Ανεκτικά στην Καθυστέρηση.....	5
2.1 Σύντομη περιγραφή δικτύων DTN.....	5
2.1.1 Χαρακτηριστικά στοιχεία και αρχιτεκτονική DTNδικτύων	6
2.1.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία δρομολόγησης σε ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN) δίκτυα	9
2.1.3 Εκτίμηση απόδοσης αλγορίθμων δρομολόγησης σε ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN) δίκτυα	13
2.1.4 Άλλα θέματα σχετικά με τα ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN) δίκτυα	13
2.2 Σύντομη ανασκόπηση και ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε δίκτυα ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN).....	14
2.2.1 Ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα	14
2.2.2 Μια ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα με αναφορά στο χρόνο.....	16
2.3 Ηλικία της Πληροφορίας (ΗτΠ – Age of Information: AoI)	21
2.3.1 Περιγραφή του μοντέλου του τηλεπικοινωνιακού συστήματος.....	23
2.3.2 Άλλα χαρακτηριστικά της Ηλικίας της Πληροφορίας	26
3. Δρομολόγηση σε δίκτυα DTN χρησιμοποιώντας την έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας.....	28
3.1 Ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί την έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας.....	28
3.2 Το πρωτόκολλο NECTAR	28
3.3 Το πρωτόκολλο Spray and Wait	34
4 Αξιολόγηση επίδοσης τροποποιημένου πρωτοκόλλου Spray and Wait with AoI.....	38
5. Μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις της παρούσας εργασίας	60
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	61
Παράρτημα Α: Κώδικας προσομοιωτή.....	65

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 Παράδειγμα DTN δικτύου, WikimediaCommons (2022, Δεκέμβριος 7). Ανακτήθηκε από: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Delay-Tolerant_Network.png	2
Εικόνα 2: Παράδειγμα δρομολόγησης	6
Εικόνα 3: Κανονική και τροποποιημένη στοίβα πρωτοκόλλων.....	9
Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση των σημαντικότερων πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε DTN δίκτυα.....	16
Εικόνα 5: Βασικό μοντέλο αναπαράστασης της έννοιας της Ηλικίας της Πληροφορίας..	21
Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση της έννοιας της Ηλικίας της Πληροφορίας.....	23
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση της έννοιας της Ηλικίας της Πληροφορίας.....	26
Εικόνα 8: Συνοπτικό διάγραμμα ροής αλγόριθμου δρομολόγησης NECTAR.....	32
Εικόνα 9: Συνοπτικό διάγραμμα ροής αλγόριθμου δρομολόγησης Spray and Wait.....	36
Εικόνα 10: Συνοπτικό διάγραμμα ροής του προσομοιωτή.....	39
Εικόνα 11: Σύγκριση μέσου πλήθους παραδομένων πακέτων.....	49
Εικόνα 12: Σύγκριση μέσου ποσοστού παραδομένων πακέτων.....	51
Εικόνα 13: Σύγκριση μέγιστου χρόνου παράδοσης.....	52
Εικόνα 14: Σύγκριση μέσου χρόνου παράδοσης.....	53
Εικόνα 15: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 23).....	54
Εικόνα 16: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 25).....	55
Εικόνα 17: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 29).....	56

Εικόνα 18: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 39).....57

Εικόνα 19: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 41).....58

Εικόνα 20: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 42).....59



*Ξενοφών Τιμόλογος, Βελτίωση Λειτουργίας Προτοκόλλων Δρομολόγησης με
χρήση Ηλικίας-της-Πληροφορίας*

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται από το πρωτόκολλο NECTAR.....	29
Πίνακας 2: Πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων δοκιμών.....	45
Πίνακας 3: Πίνακας συνοπτικών αποτελεσμάτων δοκιμών.....	48

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

AoI	Age of Information
DTN	Delay/ Disruption Tolerant Networks
LAN	Local Area Network
RTT	Round Trip Time
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TTL	Time to Live
WAN	Wide Area Network
ΗτΠ	Ηλικία της Πληροφορίας

1. Σκοπός και διάρθρωση της εργασίας

1.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στην ολοένα αυξανόμενη χρήση δικτύων επικοινωνίας. Τα δίκτυα αυτά έχουν υπερβεί τους χρονικούς και χωροταξικούς περιορισμούς και πλέον οι άνθρωποι έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο από (σχεδόν) οπουδήποτε στον πλανήτη, δίνοντας την δυνατότητα συνεχούς και αποδοτικής επικοινωνίας. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται από την ωρίμανση της αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου και ειδικότερα της στοίβας πρωτοκόλλων TCP/IP. Η σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία των πρωτοκόλλων TCP/IP βασίζεται κυρίως στα παρακάτω χαρακτηριστικά (Zhang et al, 2018):

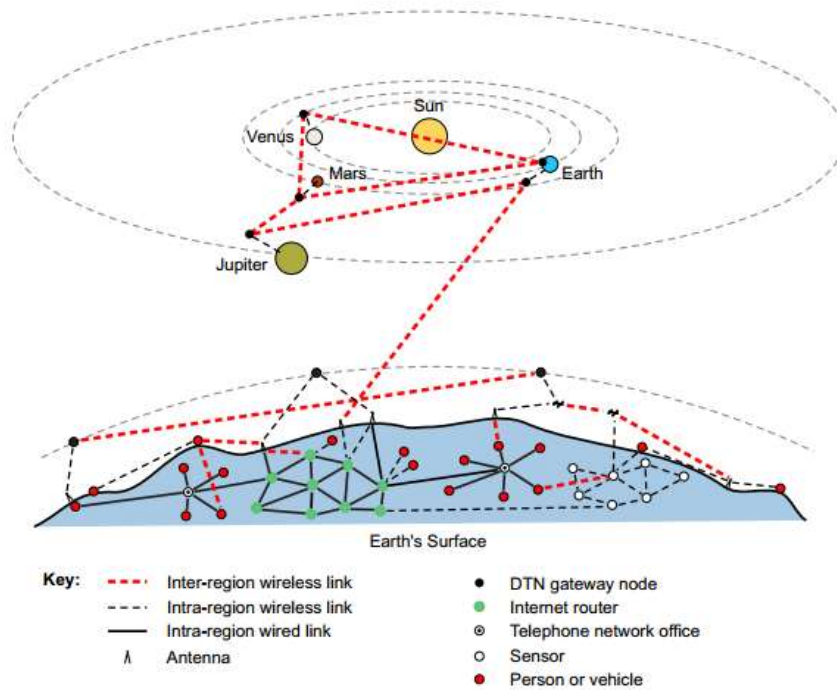
1. Σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση από άκρο-σε-άκρο μεταξύ του κόμβου πηγής και του κόμβου προορισμού.
2. Ο χρόνος μετάδοσης με επιστροφή (Round Trip Time - RTT) είναι πολύ μικρός (της τάξης των millisecond).
3. Η πιθανότητα απώλειας πακέτου ή ολόκληρου μηνύματος είναι χαμηλή και συνήθως δεν επηρεάζει την ποιότητα της επικοινωνίας.

Η δρομολόγηση σε αυτά τα δίκτυα γίνεται (κυρίως), είτε με τα λεγόμενα πρωτόκολλα διανύσματος απόστασης (distance vector protocols), είτε με τα ονομαζόμενα πρωτόκολλα κατάστασης σύνδεσης (link state protocols). Τα distance vector πρωτόκολλα (π.χ. RIP, BGP) λειτουργούν με ανταλλαγή διανυσμάτων κατάστασης σε όλο το αυτόνομο σύστημα. Οι δρομολογητές (routers) δηλαδή διατηρούν πίνακες με διανύσματα απόστασης μεταξύ όλων των άλλων δρομολογητών του συστήματος. Στα link state πρωτόκολλα (π.χ. OSPF) οι δρομολογητές μοιράζονται τα δεδομένα της κατάστασης μόνο με τους άμεσους γείτονες, δηλαδή τους δρομολογητές που είναι άμεσα συνδεδεμένοι με αυτούς (Data and Computer Communications, William Stallings, 2007).

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις δικτύων όπου κάποια (ή όλα) τα παραπάνω χαρακτηριστικά δεν είναι διαθέσιμα. Για το λόγο αυτό προτάθηκαν δίκτυα ανεκτικά στην καθυστέρηση (Delay/ Disruption Tolerant Networks, DTN) (Fall, 2003). Τέτοια δίκτυα μπορεί να είναι:

- Επίγεια ασύρματα κινητά δίκτυα.
- Inter Planetary Network (IPN) (NASA, 2003).
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN, Wireless Sensor Networks)
- Επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης (π.χ. σε πεδία μαχών ή φυσικών καταστροφών).
- Υποβρύχιες επικοινωνίες.
- Παρακολούθηση άγριων ζώων κλπ.

Παράδειγμα τέτοιου δικτύου απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1 Παράδειγμα DTN δικτύου, WikimediaCommons (2022, Δεκέμβριος 7).

Ανακτήθηκε από: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Delay-Tolerant_Network.png

Τα δίκτυα αυτά είναι σε πειραματικό στάδιο και δεν έχουν δοκιμαστεί σε ευρείας κλίμακας εφαρμογές, εκτός από τα ονομαζόμενα Inter-Planetary Networks (IPN). Η

δρομολόγηση σε αυτά τα δίκτυα δεν μπορεί να γίνει με τους παραπάνω γνωστούς τρόπους καθώς συνήθως δεν υπάρχει αξιόπιστη σύνδεση από άκρο σε άκρο (end-to-end) για όλους τους κόμβους του δικτύου. Ο χρόνος δρομολόγησης μεταξύ κόμβων είναι της τάξης των ωρών (ή ημερών) και η πιθανότητα απώλειας πακέτων είναι μεγάλη. Στις περιπτώσεις λοιπόν των Delay Tolerant Networks έχουν προταθεί εναλλακτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης των πακέτων από κόμβο σε κόμβο.

Τα πρωτόκολλα αυτά, κατά κύριο λόγο λειτουργούν, είτε διαχέοντας αντίγραφα του μηνύματος σε όλους τους κόμβους, είτε χρησιμοποιώντας την τοπολογία του δικτύου (εφόσον είναι γνωστή) ή με συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων. Ανάλυση των υφιστάμενων τρόπων δρομολόγησης παρουσιάζεται αναλυτικότερα στην ενότητα 2.1.2.

1.2 Συμβολή διπλωματικής εργασίας

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία γίνεται αρχικά μια σύντομη περιγραφή των δικτύων ανεκτικών στην καθυστέρηση (Delay Tolerant Networks, DTN) μαζί με τα χαρακτηριστικά στοιχεία τους (τύποι συνδέσεων, ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στοιχεία δρομολόγησης και παρουσίαση μετρικών απόδοσης δρομολόγησης).

Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση και ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε δίκτυα ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN) καθώς και σύντομη παρουσίαση της λειτουργίας κάποιων από αυτά. Επίσης γίνεται παρουσίαση της έννοιας της Ηλικίας της Πληροφορίας με αναφορά στο σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο.

Τέλος επιλέγονται και παρουσιάζονται αναλυτικά 2 πρωτόκολλα. Τα πρωτόκολλα αυτά στη συνέχεια τροποποιούνται έτσι ώστε να χρησιμοποιούν στο σχεδιασμό τους την έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας. Τα πρωτόκολλα για τα οποία προτείνεται μια τέτοια επέκταση είναι το NECTAR και το Spray and Wait.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι τελικά να προτείνει ένα νέο τροποποιημένο πρωτόκολλο δρομολόγησης σε δίκτυα ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN), το οποίο θα έχει καλύτερη συμπεριφορά από το αρχικό και θα αποδίδει καλύτερα στο ιδιαίτερο περιβάλλον λειτουργίας αυτών των δικτύων και ειδικότερα σε περιβάλλοντα IoT.

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα των ανεκτικών στη δρομολόγηση δικτύων (Delay Tolerant Networks, DTN) και των περιπτώσεων εφαρμογής τους.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναλυτική περιγραφή των ανεκτικών στη δρομολόγηση δικτύων (Delay Tolerant Networks, DTN). Παρουσιάζονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους (περιπτώσεις χρήσης, τύποι συνδέσεων (επαφών) κόμβων. Παρουσιάζονται επίσης τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα δίκτυα αυτά και κάποιες μετρικές (δείκτες απόδοσης) αυτών των πρωτοκόλλων. Επίσης γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση και ταξινόμηση σημαντικών πρωτοκόλλων για ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας (ΗτΠ, Age of Information, AoI) και κάποια θεωρητικά στοιχεία.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα υφιστάμενο πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί την έννοια της ΗτΠ. Παρουσιάζονται επίσης 2 πρωτόκολλα που επιλέχθηκαν για να τροποποιηθούν, ώστε να χρησιμοποιούν στο σχεδιασμό τους την έννοια της ΗτΠ στον τρόπο δρομολόγησης αλλά και στον τρόπο απόρριψης πακέτων. Στα πρωτόκολλα αυτά εισάγονται νέες παράμετροι που μετρούν την ΗτΠ και τις οποίες χρησιμοποιούν ώστε να καταλήξουν σε αποφάσεις δρομολόγησης ή/και απόρριψης πακέτων.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναλύεται η αξιολόγηση της επίδοσης του τροποποιημένου πρωτοκόλλου Spray and Wait με χρήση της ΗτΠ. Παρουσιάζεται ο προσομοιωτής, οι παράμετροι λειτουργίας του καθώς και πίνακες και διαγράμματα των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης.

Στο 5^ο κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις της παρούσας εργασίας.

2. Δίκτυα Ανεκτικά στην Καθυστέρηση

2.1 Σύντομη περιγραφή δικτύων DTN

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.1 – **εισαγωγή**, τα ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα (Delay Tolerant Networks, DTN) προτάθηκαν προκειμένου να αντιμετωπίσουν καταστάσεις όπου τα παραδοσιακά δίκτυα (ενσύρματα ή ασύρματα) δεν είναι τεχνικά ή οικονομικά εφικτό να αναπτυχθούν. Τέτοιες καταστάσεις είναι οι παρακάτω (Fall, 2003, Puri et al, 2013):

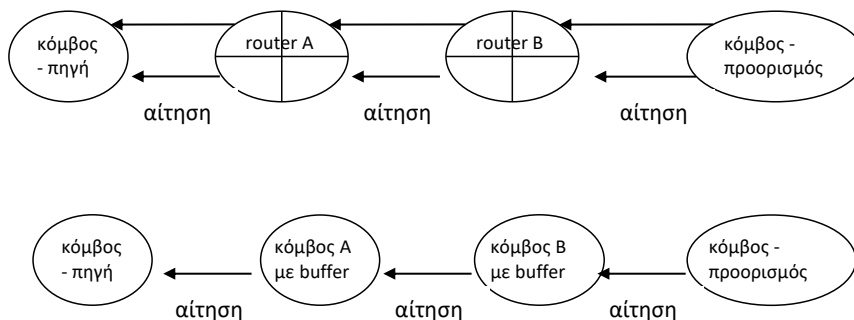
- Επίγεια ασύρματα κινητά δίκτυα: Δίκτυα όπου οι κόμβοι είναι κινητοί (π.χ. δίκτυα οχημάτων, Vehicular Delay Tolerant Networks, VDTN) (Burgess, 2006). Τα δίκτυα αυτά (ή ορισμένοι κόμβοι) μπορεί να απομονωθούν, να βρεθούν δηλαδή εκτός εμβέλειας μετάδοσης λόγω κίνησης των κόμβων, παρεμβολών ή για άλλους λόγους. Για παράδειγμα να αναφέρουμε ότι το 2004 έγινε προσπάθεια να εγκατασταθεί πρόσβαση στο διαδίκτυο σε 6 σχολεία στη Νότια Αφρική με τη βοήθεια κινητών κόμβων (δορυφόρος, dial up σύνδεση ακόμα και μοτοποδήλατο) (<https://wizzy.org.za/>).
- Inter-PlanetaryNetwork (IPN) (NASA, 2003): δίκτυα στα οποία υπάρχουν κόμβοι στη Γη (π.χ. διερχόμενα πλοία, επίγειοι σταθμοί) και στο διάστημα (π.χ. δορυφόροι, διαστημικοί σταθμοί).
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN, Wireless Sensor Networks): Τέτοια δίκτυα μπορεί να αναπτυχθούν σε ακραίες συνθήκες (όπως τροπικά δάση, ηφαίστεια, κλπ.) και συνήθως αποτελούνται από κόμβους χαμηλής δυναμικότητας τόσο σε επεξεργαστική ισχύ όσο και σε ενέργεια (μπαταρία).
- Επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης (π.χ. σε πεδία μαχών ή φυσικών καταστροφών). Τα συστήματα αυτά μπορεί να εφαρμοστούν σε μη φιλικά και ασταθή περιβάλλοντα όπου οι κόμβοι μπορεί να καταστραφούν λόγω εχθροπραξιών ή να σβήσουν από έλλειψη ενέργειας.
- Υποβρύχιες επικοινωνίες: Τέτοια συστήματα μπορεί να εφαρμοστούν σε στρατιωτικές ή ερευνητικές επιχειρήσεις. Καθώς ο χρόνος μετάδοσης διαμέσου του νερού είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σχέση με τον αέρα, η ταχύτητα

μετάδοσης θα είναι αισθητά μικρότερη οπότε τα υποβρύχια δίκτυα μπορεί να υποστούν μερική ή ολική απομόνωση για μεγάλο χρονικό διάστημα (Rahman et al, 2015).

- Παρακολούθηση άγριων ζώων: Τέτοια δίκτυα μπορεί να εφαρμοστούν αναρτώντας ασύρματους κόμβους σε άγρια ζώα για την παρακολούθηση των συνηθειών τους (Tovar et al, 2010).

2.1.1 Χαρακτηριστικά στοιχεία και αρχιτεκτονική DTN δικτύων

Το Διαδίκτυο (Internet) είναι στην πραγματικότητα μια δικτυακή υποδομή που συνδέει ετερογενείς τύπους δικτύων, τοπικά (Local Area Network, LAN) ή ευρείας περιοχής (Wide Area Network, WAN). Τα ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα (DTN) είναι δίκτυα που διασυνδέουν τοπικά απομονωμένα (εκτός σύνδεσης) δίκτυα. Η διαφορά μεταξύ των συμβατικών και των DTN δικτύων είναι στον τρόπο μετάδοσης. Στα ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα (DTN) τυπικά υπάρχει αρκετός προσωρινός χώρος αποθήκευσης στους κόμβους, όπου τα δεδομένα αποθηκεύονται μέχρι να μεταδοθούν στον επόμενο κόμβο ή στον προορισμό τους, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2 Παράδειγμα δρομολόγησης. Στα παραδοσιακά δίκτυα (πάνω) υπάρχει μικρός προσωρινός χώρος αποθήκευσης ενώ υπάρχει πάντα αμφίδρομη επικοινωνία. Στα DTN δίκτυα (κάτω) υπάρχει ανάγκη για **σημαντικά μεγαλύτερο** προσωρινό χώρο αποθήκευσης στους κόμβους ενώ δεν υπάρχει πάντα αμφίδρομη επικοινωνία.

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των ανεκτικών στην καθυστέρηση δικτύων είναι τα εξής (Fall, 2003, Shen et al, 2008, Abraham et al, 2012, Zhang et al, 2018):

- 1. Μεγάλη καθυστέρηση και χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων:** Ανάλογα με το μέσο η ταχύτητα μετάδοσης μπορεί να είναι πολύ χαμηλή (π.χ. 10 Kbps ή μικρότερη) οπότε ο χρόνος μετάδοσης από την πηγή στον προορισμό μπορεί να είναι μερικά δευτερόλεπτα έως και ώρες ή ημέρες. Επίσης σε κάποιες περιπτώσεις η σύνδεση δεν είναι αμφίδρομη (π.χ. επικοινωνία με υποβρύχια) ή η ταχύτητα δεν είναι ίδια και στις δυο κατευθύνσεις (π.χ. δορυφορικές συνδέσεις).
- 2. Διακοπή σύνδεσης μεμονωμένων κόμβων ή τμημάτων του δικτύου:** Ορισμένοι κόμβοι (ή ολόκληρα τμήματα) του δικτύου μπορεί να είναι να είναι απομονωμένοι για δυο κυρίως λόγους: εκτός εμβέλειας λόγω κινητικότητας ή αδράνεια για οικονομία ενέργειας.
- 3. Τυχαία ή προγραμματισμένη επικοινωνία:** Οι κόμβοι έρχονται σε επικοινωνία συμπτωματικά (π.χ. κίνηση άγριων ζώων) ή προγραμματισμένα (π.χ. τροχιές δορυφόρων).
- 4. Μεγάλος χρόνος αναμονής σε ουρές:** Επειδή οι κόμβοι είναι συχνά απομονωμένοι (αποσυνδεδεμένοι), τα δεδομένα πρέπει να αποθηκεύονται σε προσωρινούς χώρους αποθήκευσης (buffers), μέχρι να βρεθεί κατάλληλη διαδρομή για τον προορισμό τους. Έτσι τα δεδομένα δεν απορρίπτονται λόγω της λήξης του χρόνου (time out) όμως ο χρόνος αναμονής είναι απρόβλεπτος και εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα σύνδεσης προς τον προορισμό.
- 5. Περιορισμένη διαθεσιμότητα και λειτουργία κόμβων:** Σε ορισμένες περιπτώσεις δικτύων (π.χ. δίκτυα αισθητήρων) οι κόμβοι αναπτύσσονται σε αφιλόξενα περιβάλλοντα (όπως πεδία μαχών ή υποβρύχιες επικοινωνίες). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ορισμένοι κόμβοι (ή τμήματα του δικτύου) να παραμένουν αποσυνδεδεμένοι για μεγάλα χρονικά διαστήματα ακόμα και να τίθενται εντελώς εκτός λειτουργίας λόγω μη διαθεσιμότητας ενέργειας ή απώλειας του κόμβου λόγω καταστροφής.
- 6. Περιορισμένοι πόροι ενέργειας (μπαταρία), προσωρινού χώρου αποθήκευσης (buffer) και υπολογιστικής ισχύος:** Σε πολλές από τις παραπάνω περιπτώσεις οι κόμβοι που χρησιμοποιούνται έχουν περιορισμένους πόρους προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλό βάρος ή/και μικρό μέγεθος.

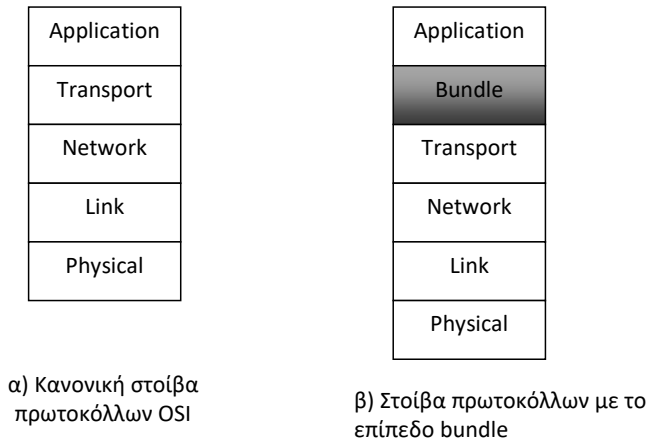
Η μετάδοση των πληροφοριών μπορεί να γίνει όταν 2 κόμβοι βρεθούν σε σύνδεση (επαφή), δηλαδή σε ακτίνα επικοινωνίας. Στα DTN δίκτυα όμως δεν υπάρχει πάντα διαρκής σύνδεση μεταξύ των κόμβων, οπότε οι κόμβοι δεν είναι πάντα προσβάσιμοι. **Η σύνδεση (επαφή) μεταξύ των κόμβων έχει τα εξής χαρακτηριστικά** (Shabbat, 2011):

1. Χρονική στιγμή έναρξης και λήξης, επομένως και συγκεκριμένη διάρκεια.
2. Δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων.
3. Δεν είναι πάντα αμφίδρομη.
4. Δεν έχει πάντα την ίδια ταχύτητα.

Ανάλογα λοιπόν με τα παραπάνω χαρακτηριστικά υπάρχουν διαφορετικοί τύποι συνδέσεων (επαφών) μεταξύ των κόμβων ανάλογα με το διαθέσιμο συνδυασμό των παραπάνω χαρακτηριστικών. **Οι διαφορετικοί τύποι συνδέσεων (επαφών) είναι οι εξής** (Shabbat, 2011, Fatimah, 2016):

1. **Μόνιμη σύνδεση:** Μια σύνδεση που είναι μόνιμα διαθέσιμη (π.χ. σύνδεση σε LAN).
2. **Σύνδεση κατά απαίτηση:** Μια σύνδεση που αρχίζει και τελειώνει έπειτα από αίτηση ενός κόμβου να επικοινωνήσει με άλλο κόμβο (π.χ. dial-up σύνδεση).
3. **Προγραμματισμένη σύνδεση:** Μια σύνδεση που έχει προγραμματισμένο χρόνο έναρξης και λήξης (π.χ. τροχιά δορυφόρου).
4. **Αναμενόμενη σύνδεση:** Μια σύνδεση που προβλέπεται να συμβεί με βάση αξιόπιστες στατιστικές πληροφορίες, υπάρχει όμως και η πιθανότητα να μη συμβεί (π.χ. δρομολόγιο λεωφορείου).
5. **Μη αναμενόμενη σύνδεση:** Μια σύνδεση που συμβαίνει χωρίς να έχει προγραμματιστεί και χωρίς να αναμένεται (π.χ. κινήσεις άγριων ζώων).

Προκειμένου να υποστηριχθεί η λειτουργία των ανεκτικών στην καθυστέρηση δικτύων, χρησιμοποιείται ένα ακόμα επίπεδο στη στοίβα πρωτοκόλλων OSI. Το επίπεδο αυτό τοποθετείται μεταξύ του επιπέδου μεταφοράς και του επιπέδου εφαρμογής και λέγεται **επίπεδο δέσμης (bundle layer)** (RFC4838, 2007, Khabbaz, 2011). Στην παρακάτω εικόνα 3 φαίνεται η αντίστοιχη σχηματική αναπαράσταση.



Εικόνα 3: Κανονική και τροποποιημένη στοίβα πρωτοκόλλων

Το στρώμα bundle χρησιμοποιείται ως μονάδα δεδομένων στα DTN δίκτυα και μπορεί να είναι ένα μήνυμα, ένα μόνο πακέτο ή μια ομάδα (δέσμη) μηνυμάτων που θα μεταφερθούν μαζί.

2.1.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία δρομολόγησης σε ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN) δίκτυα

Όπως είναι γνωστό, στα παραδοσιακά δίκτυα χρησιμοποιείται η τεχνική της αποθήκευσης και προώθησης (**Store – Forward**). Οι δρομολογητές (routers) που είναι ενδιάμεσοι κόμβοι, αποθηκεύουν σε προσωρινούς χώρους (buffers) τα δεδομένα (πακέτα) και τα προωθούν στην καλύτερη διαδρομή (και τελικά στον προορισμό τους), ανάλογα με τον αλγόριθμο δρομολόγησης και τη διαθεσιμότητα κόμβων.

Όμως όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.1.1, οι συσκευές που απαρτίζουν ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα μπορεί να παραμένουν απομονωμένες (εκτός σύνδεσης) για μεγάλα χρονικά διαστήματα (της τάξης των ωρών ή και ημερών). Για να δρομολογηθούν τα δεδομένα χρησιμοποιείται η τεχνική της αποθήκευσης – μεταφοράς – προώθησης (**Store – Carry – Forward, SCF**). Τα δεδομένα (bundles) αποθηκεύονται στον προσωρινό χώρο αποθήκευσης (buffer) του κόμβου, μεταφέρονται και προωθούνται στον

προορισμό τους (ή στον επόμενο κόμβο) όταν παρουσιαστεί η κατάλληλη ευκαιρία, ανάλογα με τον αλγόριθμο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται.

Η δρομολόγηση στα ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα έχει κάποια χαρακτηριστικά που είναι διαφορετικά από αυτά που συναντάμε στα παραδοσιακά TCP/IP δίκτυα. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα εξής (Jain et al, 2004, Abraham et al, 2012):

1. Προδραστική (proactive) ή κατά απαίτηση (reactive): Στην προδραστική δρομολόγηση οι διαδρομές **προς όλους τους πιθανούς κόμβους υπολογίζονται προκαταβολικά**, πριν δηλαδή ζητηθεί η μεταφορά δεδομένων σε κάποιο κόμβο. Τέτοια πρωτόκολλα είναι τα παρακάτω:

- FRESH (Dubois et al, 2003).
- Caching-Based routing (Henriksson et al, 2007).
- CAR protocol (Musolesi et al, 2009).
- Bubble algorithm (Hui et al, 2011).

Αντίθετα στην κατά απαίτηση δρομολόγηση **η διαδρομή υπολογίζεται τη στιγμή που θα ζητηθεί η μεταφορά στο συγκεκριμένο κόμβο**. Τέτοια πρωτόκολλα είναι τα παρακάτω:

- Probabilistic routing (Lindgren et al, 2003).
- DHR protocol (Liu et al, 2007).
- ORWAR protocol (Sandulescu et al, 2008).

Η επιλογή εξαρτάται από το αν υπάρχει μελλοντική γνώση της τοπολογίας του δικτύου, από το πλήθος των κόμβων και από την υπάρχουσα κίνηση δεδομένων στο δίκτυο. Η χρήση προδραστικής δρομολόγησης χρειάζεται πολλούς υπολογισμούς διαδρομών προς όλους τους κόμβους (ακόμα και αν δεν υπάρχει κίνηση προς κάποιο κόμβο) και ταξινόμηση αυτών χρονικά, χρειάζεται δηλαδή υπολογιστική ισχύ, αποθηκευτικούς και ενεργειακούς πόρους. Είναι καλή επιλογή αν υπάρχει αυξημένη κίνηση στο δίκτυο και σχετική σταθερότητα στις διαδρομές. Στις περιπτώσεις όπου η κίνηση δεδομένων είναι μικρή ή οι διαδρομές είναι απρόβλεπτες και ασταθείς, η χρήση κατά απαίτηση δρομολόγησης φαίνεται να είναι καλύτερη επιλογή.

2. Δρομολόγηση στην πηγή (source routing) ή δρομολόγηση ανά κόμβο (per-hop routing): Στη δρομολόγηση στην πηγή, η **πλήρης διαδρομή καθορίζεται στον κόμβο-πηγή και καταχωρείται με κάποιο τρόπο στο μήνυμα** (συνήθως σε σχετικό πεδίο στην κεφαλίδα (header) του μηνύματος. Με τον τρόπο αυτό η διαδρομή προκαθορίζεται και δεν αλλάζει καθώς το μήνυμα διασχίζει το δίκτυο. Τέτοια πρωτόκολλα είναι τα παρακάτω:

- DTSLR protocol (Demmer et al, 2007).
- FRESH (Dubois et al, 2003).
- Caching-Based routing (Henriksson et al, 2007).

Αντίθετα στη δρομολόγηση ανά κόμβο, ο επόμενος κόμβος καθορίζεται σε κάθε κόμβο στη διαδρομή προς τον προορισμό (δεν καθορίζεται από πριν). Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα χρήσης (σε κάθε κόμβο της διαδρομής του μηνύματος) των τοπικών πληροφοριών σχετικά με διαθέσιμες επαφές (συνδέσεις), κάτι που δεν είναι γενικά διαθέσιμο στον κόμβο-πηγή. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση δρομολόγησης, μπορεί όμως να επιφέρει και κυκλικές διαδρομές (loops) λόγω των διαφορετικών πληροφοριών που υπάρχουν σε κάθε κόμβο. Τέτοια πρωτόκολλα είναι τα παρακάτω:

- Mn-routing protocol (Burns et al, 2005).
- Seek and focus (Spyropoulos et al, 2008).
- RelayCast protocol (Lee et al, 2008).

3. Με ή χωρίς δυνατότητα διαχωρισμού μηνυμάτων: Η δυνατότητα αυτή σημαίνει ότι διαφορετικά τμήματα του μηνύματος μπορεί να προωθηθούν μέσω διαφορετικών διαδρομών (αν υπάρχει η δυνατότητα κατάτμησης του μηνύματος). Η τεχνική αυτή μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και την κατανομή φορτίου. Επίσης αντιμετωπίζει την περίπτωση όπου ένα μεγάλο σε μέγεθος μήνυμα δε χωρά στον προσωρινό χώρο αποθήκευσης ενός μόνο κόμβου. Όμως περιπλέκει τη δρομολόγηση καθώς πρέπει να υπολογιστούν τα μεγέθη των τμημάτων και οι διαφορετικές διαδρομές. Επίσης θα πρέπει το μήνυμα να συναρμολογηθεί ξανά στον κόμβο – προορισμό από τα τμήματα που παραλαμβάνονται.

4. Προώθηση ή αναπαραγωγή (πλημμύρα) μηνυμάτων: Αυτή είναι μια σημαντικότερη σχεδιαστική επιλογή και σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί βασικό στοιχείο διαχωρισμού αλγόριθμων δρομολόγησης.

Στην αναπαραγωγή (πλημμύρα) μηνυμάτων ο κόμβος-πηγή δημιουργεί πολλαπλά αντίγραφα του μηνύματος και κατακλύζει με αυτά όλους τους διαθέσιμους κόμβους του δικτύου. Αυτή είναι από τις πρώτες επιλογές δρομολόγησης στα DTN δίκτυα και είναι αρκετά αποτελεσματική όμως καταναλώνει υπέρμετρα πολλούς πόρους αποθήκευσης, υπολογιστικής ισχύος καθώς και ενέργεια. Τέτοια πρωτόκολλα είναι τα παρακάτω:

- Epidemic routing (Vahdat et al, 2000).
- Probabilistic routing (Angelakis et al, 2012).
- Intercontact routing protocol (Uddin et al, 2013).

Στην προώθηση μηνυμάτων υπάρχει ένα μόνο αντίγραφο από κάθε μήνυμα στο δίκτυο και προωθείται από κόμβο σε κόμβο προς τον τελικό προορισμό με την τεχνική Store – Carry – Forward (SCF). Είναι γενικά λιγότερο αποτελεσματική επιλογή, καταναλώνει όμως σημαντικά λιγότερους πόρους. Τέτοια πρωτόκολλα είναι τα παρακάτω:

- Caching-Based routing (Henriksson et al, 2007).
- FRESH (Dubois et al, 2003).
- RMDTN protocol for IoT (Wong et al, 2017).

5. Δρομολόγηση με βάση προηγούμενες κινήσεις (ιστορικότητα) ή με βάση εκτιμήσεις: Η δρομολόγηση με βάση την ιστορικότητα κινήσεων βασίζεται στην υπόθεση ότι δυο κόμβοι οι οποίοι έχουν συναντηθεί μια ή περισσότερες φορές είναι πιθανότερο να συναντηθούν ξανά. Οι κόμβοι καταχωρούν ιστορικό κινήσεων και οι αποφάσεις δρομολόγησης βασίζονται σε αυτές. Τέτοια πρωτόκολλα είναι τα παρακάτω:

- Nectar protocol (Oliveira et al, 2009).
- Sedum protocol (Li et al, 2013).
- Encounter-based routing (EBR) (Nelson et al, 2009).

Η δρομολόγηση με βάση εκτιμήσεις βασίζεται συνήθως σε δεδομένα σχετικά με την τοπολογία του δικτύου και την πιθανότητα δυο κόμβοι να έρθουν σε επαφή (σύνδεση), π.χ. δρομολόγηση λεωφορείων. Μπορεί επίσης να βασίζεται σε γνωστά μοντέλα κίνησης των κόμβων. Τέτοια πρωτόκολλα είναι τα παρακάτω:

- Spray and wait (Spyropoulos et al, 2005).

- Rapid protocol (Balasubramanian et al, 2007).
- Bubble algorithm (Hui et al, 2011).

2.1.3 Εκτίμηση απόδοσης αλγορίθμων δρομολόγησης σε ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN) δίκτυα

Τα ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα έχουν διαφορετικούς δείκτες απόδοσης από τα συμβατικά δίκτυα. Η εκτίμηση της απόδοσης σχετίζεται πάντα με την επιθυμητή εφαρμογή και γίνεται με διαφορετικούς δείκτες ή μετρικές όπως συνήθως λέγονται. Οι σημαντικότεροι δείκτες (μετρικές) που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης των διαφορετικών αλγορίθμων δρομολόγησης είναι οι παρακάτω (Benhamida et al, 2017):

1. **Μετρική αποτελεσματικότητας (λόγος) παράδοσης:** Ορίζεται από το κλάσμα του πλήθους των μηνυμάτων που παραδόθηκαν ορθά στον τελικό προορισμό τους προς το συνολικό πλήθος των μηνυμάτων που δημιουργήθηκαν στο δίκτυο. Με τη μετρική αυτή μετράμε το ποσοστό των μηνυμάτων που παραδόθηκαν στον κόμβο – προορισμό και σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της μετρικής.
2. **Καθυστέρηση παράδοσης:** Είναι η συνολική χρονική διάρκεια από τη χρονική στιγμή της δημιουργίας ενός μηνύματος στον κόμβο – πηγή ως την παράδοση στον κόμβο – προορισμό. Η μετρική αυτή χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αποδοτικότητας ενός αλγόριθμου δρομολόγησης. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικές εκδοχές της μετρικής, όπως είναι η μέση καθυστέρηση και η μέγιστη καθυστέρηση παράδοσης. Σκοπός είναι φυσικά η ελαχιστοποίηση της μετρικής.

Οι δύο παραπάνω μετρικές είναι οι σημαντικότερες. Υπάρχουν όμως και άλλες όπως η μετρική της **ενεργειακής απόδοσης** (μέση ενέργεια που χρειάζεται για την παράδοση κάθε μηνύματος) και η μετρική του **κόστους παράδοσης** (χώρος αποθήκευσης και συνολικές μεταδόσεις που χρειάζονται για την παράδοση κάθε μηνύματος).

2.1.4 Άλλα θέματα σχετικά με τα ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN) δίκτυα

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ανεκτικών στην καθυστέρηση δικτύων αναπόφευκτα εγείρουν θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν διαφορετικά σε σχέση με τα συμβατικά δίκτυα. Τα σημαντικότερα είναι τα παρακάτω (Shen et al, 2008, Zhang et al, 2018):

1. **Επιβεβαίωση παράδοσης (ACK):** Είναι χρήσιμο ο αλγόριθμος δρομολόγησης να στέλνει στον κόμβο – πηγή μήνυμα επιβεβαίωσης παράδοσης (όμοιο με το ACK

που αποστέλλει το TCP πρωτόκολλο). Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η αξιοπιστία του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Υπάρχει όμως και άλλη ωφέλεια. Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που διανέμουν πολλά αντίγραφα σε πολλούς κόμβους του δικτύου (βλ. ενότητα 2.1.2), διατηρούν στον προσωρινό τους χώρο αποθήκευσης, μηνύματα που έχουν παραδοθεί στον τελικό προορισμό τους. Με τη λήψη ενός ACK οι κόμβοι μπορούν να διαγράψουν τα μηνύματα αυτά (αν δεν το έχουν ήδη κάνει με άλλες πολιτικές διατήρησης), ώστε να περιορίσουν τη σπατάλη χώρου και ενέργειας, πόροι που είναι γενικά περιορισμένοι στα δίκτυα αυτά. Η κυκλοφορία βέβαια των μηνυμάτων επιβεβαίωσης παράδοσης δημιουργεί επιπλέον κυκλοφορία στο δίκτυο κάτι που επίσης χρειάζεται διάθεση πόρων. Η επιλογή της αποστολής μηνυμάτων επιβεβαίωσης θα πρέπει να σταθμιστεί σχετικά με τη χρησιμότητά της.

2. **Ασφάλεια:** Η ασφάλεια είναι ένα θέμα που αφορά όλα τα δίκτυα, DTN και συμβατικά. Η ασταθής φύση των ανεκτικών στην καθυστέρηση δικτύων (οι κόμβοι μπορούν να εισέρχονται ή να εξέρχονται από το δίκτυο χωρίς αυστηρό έλεγχο) κάνουν το θέμα της ασφάλειας ακόμη δυσκολότερο στην αντιμετώπιση. Ένα μήνυμα (ή αντίγραφο αυτού) μπορεί να μεταδοθεί σε αυθαίρετο αριθμό κόμβων πριν τελικά παραδοθεί στον κόμβο – προορισμό. Η απαίτηση για ασφάλεια εξαρτάται από την εφαρμογή και τις προδιαγραφές που υπάρχουν σχετικά με την αυθεντικότητα και την ακεραιότητα των δεδομένων. Μια σχεδιαστική επιλογή είναι η κρυπτογράφηση των δεδομένων ώστε οι κόμβοι να μπορούν να επιβεβαιώσουν την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα. Το θέμα της ασφάλειας στα δίκτυα αυτά είναι ανοιχτό προς διερεύνηση.

2.2 Σύντομη ανασκόπηση και ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε δίκτυα ανεκτικά στην καθυστέρηση (DTN)

2.2.1 Ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα

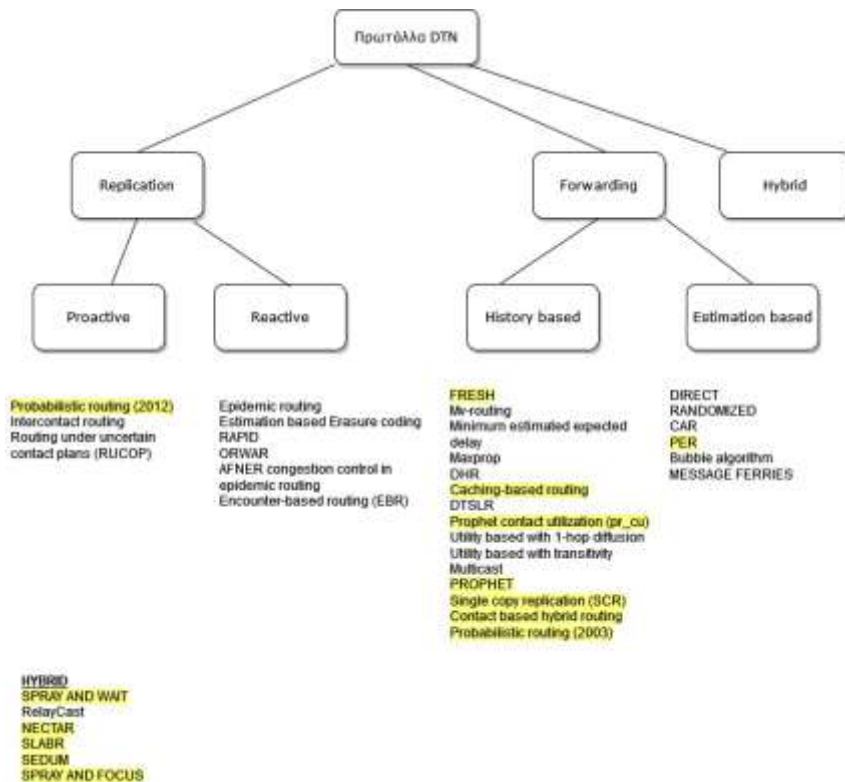
Λόγω των ασυνήθιστων (και ίσως ακραίων σε κάποιες περιπτώσεις) χαρακτηριστικών των ανεκτικών στην καθυστέρηση δικτύων και των διαφορετικών εφαρμογών τους, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία δεκάδες αλγόριθμοι (πρωτόκολλα) δρομολόγησης –

περισσότερα από 40 διαφορετικά πρωτόκολλα έχουν μελετηθεί για της ανάγκες αυτής της εργασίας, όμως είναι βέβαιο ότι υπάρχουν πολλά περισσότερα. Η μελέτη των πρωτοκόλλων αυτών διευκολύνεται με την ταξινόμησή τους σε ομάδες (κατηγορίες) με βάση κάποια από τα χαρακτηριστικά τους, όπως αυτά που περιγράφονται στην ενότητα 2.1.2. Ανάλογα με την ιδιότητα με την οποία επιλέγεται κάθε φορά προκειμένου να γίνει η ταξινόμηση, έχουν προκύψει διάφορες ταξινομήσεις των πρωτοκόλλων σε ομάδες (κατηγορίες). Για τις ανάγκες της εργασίας έχουν μελετηθεί 10 διαφορετικές ταξινομήσεις – οι πιο αντιπροσωπευτικές ταξινομήσεις συνοπτικά αναφέρονται παρακάτω:

1. **Δρομολόγηση με ολική, μερική ή καθόλου γνώση της τοπολογίας του δικτύου**(Jain et al, 2004, Cao et al, 2013, Filch et al, 2016): Η ταξινόμηση των αλγορίθμων γίνεται με βάση την ιδιότητα κατά πόσο (ολικά, μερικά, καθόλου) οι αποφάσεις δρομολόγησης λαμβάνονται με βάση την τοπολογία του δικτύου (όταν αυτή είναι διαθέσιμη).
2. **Δρομολόγηση με βάση δεδομένα ή στοχαστική** (εκτιμήσεις) (Zhang, 2006): Η ταξινόμηση των αλγορίθμων γίνεται με βάση την ιδιότητα αν οι αποφάσεις δρομολόγησης λαμβάνονται με βάση σαφή δεδομένα που αφορούν την τοπολογία του δικτύου ή με βάση εκτιμήσεις.
3. **Αναπαραγωγή μηνυμάτων, προώθηση, υβριδικά και άλλα** (Shen et al, 2008, D’Souza et al, 2010, Jones et al, 2011, Abraham et al, 2012, Zhang et al, 2018): Η ταξινόμηση γίνεται με βάση την ιδιότητα της αναπαραγωγής πολλαπλών αντιγράφων του μηνύματος στο δίκτυο, της προώθησης ενός μόνο αντιγράφου του μηνύματος ή συνδυασμό αυτών.
4. **Προδραστική ή κατά απαίτηση δρομολόγηση** (Puri et al, 2013): Η ταξινόμηση γίνεται με βάση την ιδιότητα της δημιουργίας διαδρομών προκαταβολικά ή κατά απαίτηση σε περίπτωση που υπάρχουν δεδομένα προς το ζητούμενο κόμβο.

2.2.2 Μια ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα με αναφορά στο χρόνο

Στην εργασία αυτή θα περιγράψουμε μια προσέγγιση ταξινόμησης που βασίζεται στην προώθηση (forwarding) ή στην αναπαραγωγή (replication) των μηνυμάτων καθώς και υβριδικά πρωτόκολλα που συνδυάζουν τις δύο αυτές σχεδιαστικές επιλογές. Παράλληλα όμως θα κάνουμε ιδιαίτερη αναφορά και επισήμανση σε πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν την έννοια του χρόνου ή της ηλικίας στο σχεδιασμό τους. Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται σε ιδιότητες που δεν είναι αμοιβαία αποκλειόμενες (π.χ. υπάρχουν proactive πρωτόκολλα στην κατηγορία replication αλλά και στην κατηγορία forwarding). Είναι όμως μια ταξινόμηση όπου επιτυγχάνει ισόρροπη (όσο είναι εφικτό) κατάταξη σε κατηγορίες, σύμφωνα με τις σημαντικότερες σχεδιαστικές επιλογές. Μια σχηματική αναπαράσταση της ταξινόμησης φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση των σημαντικότερων πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε DTNδίκτυα. Με κίτρινο χρώμα επισημαίνονται τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν την έννοια του χρόνου ή της ηλικίας στο σχεδιασμό τους.

Όλα τα παραπάνω αναφερόμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης έχουν διαφορετικά στοιχεία και διαφορετικό σχεδιασμό. Κάποια από αυτά είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικά στην κατηγορία τους και έχουν ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά στο σχεδιασμό τους. Τα πρωτόκολλα αυτά αξίζει να αναφερθούν συνοπτικά και είναι τα παρακάτω:

1. Epidemic routing (Vahdat, 2000, Li, 2010)

Είναι το πρώτο και το απλούστερο από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Ο κόμβος - πηγή (αλλά και κάθε επόμενος κόμβος) μεταδίδει κάθε μήνυμα σε κάθε κόμβο με τον οποίο έρχεται σε επαφή (σύνδεση) αν ο κόμβος αυτός δεν έχει ήδη ένα αντίγραφο του μηνύματος. Με τον τρόπο αυτό «πλημμυρίζει» όλο το δίκτυο με αντίγραφα του μηνύματος προκειμένου το μήνυμα να φτάσει στον προορισμό του. Το πρωτόκολλο αυτό μεταδίδει τα μηνύματα με τη μικρότερη καθυστέρηση, σπαταλά όμως χώρο στον προσωρινό χώρο αποθήκευσης (buffer) των κόμβων και φυσικά ενέργεια. Μια βελτιωμένη έκδοση (Average Forwarding Number based on Epidemic Routing: AFNER) παρουσιάστηκε το 2010, στην οποία προσέγγιση γίνεται διαχείριση του προσωρινού χώρου αποθήκευσης. Στόχος του νέου πρωτοκόλλου είναι η αποφυγή της πλήρωσης του χώρου αλλά και η διαχείριση με κριτήρια των μηνυμάτων που θα διαγραφούν σε περίπτωση που τελικά γεμίσει ο χώρος αποθήκευσης του κόμβου.

2. Resource Allocation Protocol for Intentional DTN (RAPID) (Balasubramanian et al, 2007, 2010)

Η δρομολόγηση με βάση αυτό το πρωτόκολλο γίνεται με πολλαπλά αντίγραφα του προς μετάδοση μηνύματος. Οι αποφάσεις δρομολόγησης λαμβάνονται με κριτήριο τη βελτίωση συγκεκριμένων μετρικών (ελαχιστοποίηση μέσης καθυστέρησης, ελαχιστοποίηση πλήθους χαμένων προθεσμιών παράδοσης μηνυμάτων, ελαχιστοποίηση μέγιστης καθυστέρησης) και βασίζονται στην εκτίμηση των χρόνων παράδοσης μηνυμάτων στον κόμβο – προορισμό. Η εκτίμηση των χρόνων γίνεται κατά απαίτηση των μηνυμάτων (Reactive).

3. Probabilistic routing (Angelakis et al, 2012)

Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ως μετρική τη φυσική απόσταση μεταξύ του κόμβου που φέρει το αντίγραφο του προς μετάδοση μηνύματος και του κόμβου προορισμού. Οι αποφάσεις δρομολόγησης λαμβάνονται με βάση τον υπολογισμό της πιθανότητας βελτίωσης της μετρικής της απόστασης. Ο υπολογισμός γίνεται προδραστικά (proactive) σε κάθε κόμβο που φέρει αντίγραφο του μηνύματος (per-hop routing). Το πρωτόκολλο προβλέπει την αποστολή μηνυμάτων επιβεβαίωσης (ACK) και τη χρήση χρόνου ζωής μηνύματος (TTL) που μετρείται είτε σε χρονικές μονάδες ή σε πλήθος κόμβων που διατρέχει το μήνυμα.

4. Intercontact routing protocol (Uddin et al, 2013)

Σύμφωνα με τη λειτουργία του πρωτοκόλλου αυτού, κάθε μήνυμα μεταδίδεται με συγκεκριμένο αριθμό αντιγράφων και μια τιμή timeout που ορίζει το χρονικό περιθώριο μέσα στο οποίο θα πρέπει το μήνυμα να παραδοθεί στον τελικό προορισμό. Σε κάθε κόμβο i και για κάθε γνωστό κόμβο j , αποθηκεύεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του απαιτούμενου χρόνου για τη διαδρομή $i - j$. Οι τιμές αυτές ενημερώνονται σε κάθε επαφή (σύνδεση) των κόμβων $i - j$ (προδραστικός υπολογισμός). Η επιλογή του κόμβου μετάδοσης γίνεται υπολογίζοντας το ελάχιστο εκτιμώμενο κόστος (καθυστερήση) για τις διαθέσιμες διαδρομές από τον κόμβο – πηγή προς τον τελικό προορισμό.

5. FResher Encounter Search (FRESH) (Ferriere et al, 2003)

Το πρωτόκολλο αυτό προωθεί το μήνυμα από τον κόμβο – πηγή προς τον κόμβο προορισμό και δεν μεταδίδει πολλαπλά αντίγραφα όπως τα τέσσερα παραπάνω πρωτόκολλα. Στην περίπτωση αυτού του πρωτοκόλλου, όλοι οι κόμβοι αποθηκεύουν σε σχετικό πίνακα τη χρονική στιγμή της πιο πρόσφατης επαφής με κάθε άλλο κόμβο. Ο κόμβος – πηγή αναζητά (μεταξύ των κόμβων που είναι σε επαφή με τον κόμβο – πηγή) τον κόμβο που έχει καταχωρημένη την πιο πρόσφατη χρονική στιγμή επαφής με τον κόμβο – προορισμό και μεταδίδει το μήνυμα σε αυτόν. Το ίδιο γίνεται σε κάθε επόμενο κόμβο μέχρι να παραδοθεί το μήνυμα στον προορισμό του. Στο πρωτόκολλο αυτό η ηλικία της πιο πρόσφατης επαφής με κάθε κόμβο έχει σημαντική επίδραση στην επίδοση του αλγορίθμου.

6. Probabilistic ROuting Protocol using a History of Encounters and Transitivity (PROPHET) (Lin et al, 2008, Xue et al, 2009, Mao et al 2019)

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου βασίζεται στη συχνότητα των επαφών (συνδέσεων) μεταξύ των κόμβων αλλά και στην ηλικία των επαφών αυτών. Με βάση τις πληροφορίες αυτές υπολογίζεται η πιθανότητα ορθής παράδοσης στον κόμβο – προορισμό. Στον υπολογισμό λαμβάνεται επίσης υπόψη η έννοια της ηλικίας του πιο πρόσφατου υπολογισμού της πιθανότητας ορθής παράδοσης στον κόμβο – προορισμό. Έχουν παρουσιαστεί παραλλαγές αυτού του αλγορίθμου που χρησιμοποιούν τη διάρκεια των συναντήσεων των κόμβων και άλλα μεγέθη προκειμένου να βελτιώσουν την απόδοση του πρωτοκόλλου.

7. Context-Aware Adaptive routing (CAR) (Musolesi et al, 2008)

Το πρωτόκολλο αυτό βασίζεται στην προώθηση του μηνύματος και όχι στην πολλαπλή αναπαραγωγή του. Ο σχεδιασμός του προβλέπει την αποθήκευση σε κάθε κόμβο πίνακα του οποίου οι εγγραφές περιέχουν τους γνωστούς κόμβους, τον καλύτερο επόμενο κόμβο προς αυτόν τον κόμβο – προορισμό καθώς και την πιθανότητα παράδοσης του μηνύματος. Οι υπολογισμοί γίνονται προδραστικά και οι κόμβοι ανταλλάσσουν περιοδικά τα περιεχόμενα των πινάκων δρομολόγησης, προκειμένου να ενημερωθούν όλοι οι σχετικοί πίνακες των συνδεδεμένων κόμβων καθώς και των κόμβων που θα βρεθούν αργότερα σε επαφή (σύνδεση). Η επιλογή του καλύτερου επόμενου κόμβου μετάδοσης του μηνύματος, γίνεται με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας παράδοσης στον κόμβο – προορισμό.

8. Predict and Relay (PER) (Yuan et al, 2009)

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου βασίζεται στην ιδέα της ύπαρξης τοπόσημων τα οποία συγκεντρώνουν γύρω τους το σύνολο των κόμβων του δικτύου. Η πρόβλεψη της μελλοντικής κίνησης των κόμβων βασίζεται στην ιστορία των προηγούμενων τροχιών κίνησης, η οποία καταγράφεται και διαδίδεται σε όλο το δίκτυο. Μόνο ένα αντίγραφο κάθε μηνύματος μεταδίδεται και η απόφαση δρομολόγησης λαμβάνεται από κόμβο σε κόμβο (per-hop routing), επιλέγοντας τον κόμβο με τη μεγαλύτερη πιθανότητα παράδοσης στον τελικό προορισμό. Κάθε μήνυμα φέρει τιμή Time-To-Live (TTL) μετά τη λήξη της οποίας το μήνυμα απορρίπτεται.

9. Spray and wait, spray and focus (Spyropoulos et al, 2005, 2008)

Το πρωτόκολλο Spray and wait είναι υβριδικό. Ο κόμβος – πηγή αρχικά μεταδίδει συγκεκριμένο πλήθος αντιγράφων του προς μετάδοση μηνύματος (spray phase) σε

διαφορετικούς κόμβους. Αν ο κόμβος – προορισμός δεν είναι μεταξύ αυτών των αρχικών κόμβων, οι κόμβοι αυτοί περιμένουν μέχρι να μεταδώσουν άμεσα το μήνυμα στο τελικό προορισμό (wait phase). Μια παραλλαγή του αλγορίθμου μεταδίδει τα μισά από τα διατιθέμενα στον τρέχοντα κόμβο αντίγραφα, μέχρι να μείνει με ένα μόνο αντίγραφο οπότε και περιμένει για άμεση μετάδοση στον κόμβο – προορισμό. Μια άλλη παραλλαγή (spray and focus) διαφέρει στη 2η φάση (focus) όπου γίνεται προώθηση του μηνύματος με κριτήριο το χρόνο της πιο πρόσφατης επαφής (σύνδεσης) μεταξύ των κόμβων

10. NECTAR protocol (Oliveira et al, 2009)

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου αποτελείται από 3 διαφορετικές διαδικασίες και είναι επίσης υβριδικό. Το πρωτόκολλο NECTAR χρησιμοποιεί μια τυχαία επαφή μεταξύ 2 κόμβων για τον υπολογισμό του δείκτη γειτονιάς (Neighborhood Index), σύμφωνα με τον οποίο γίνεται η επιλογή των κόμβων στους οποίους θα μεταδοθούν αντίγραφα μηνυμάτων. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται στην ιστορικότητα των επαφών μεταξύ των κόμβων. Ο αλγόριθμος επιλογής των μηνυμάτων προς μετάδοση χρησιμοποιείται για να καθορισθεί η προτεραιότητα μεταξύ των μηνυμάτων που είναι αποθηκευμένα στον προσωρινό χώρο αποθήκευσης (buffer). Κατά τη διάρκεια της επαφής, οι 2 κόμβοι αρχίζουν πρώτα τη μετάδοση μηνυμάτων των οποίων προορισμός είναι ένας από τους 2 κόμβους, κατόπιν ανταλλάσσουν πληροφορίες για τη γειτονιά (δηλαδή το Neighborhood Index) και τέλος προωθούν άλλα μηνύματα. Τα μηνύματα προωθούνται σε κόμβους με μεγαλύτερο δείκτη γειτονιάς. Τέλος η πολιτική απόρριψης μηνυμάτων με κριτήρια χρησιμοποιείται όταν πληρωθεί ο διαθέσιμος προσωρινός χώρος αποθήκευσης.

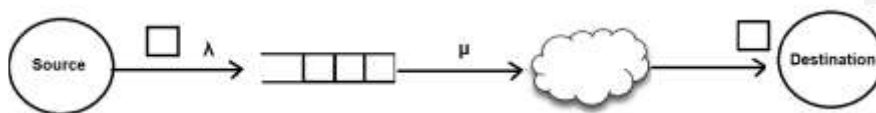
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τις ανάγκες της εργασίας μελετήθηκαν 46 διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Από αυτά υπάρχουν 15 πρωτόκολλα που έχουν την έννοια του χρόνου ή της ηλικίας μιας μετρικής στο σχεδιασμό τους, με σκοπό να μην περιφέρονται μηνύματα συνεχώς στο δίκτυο τα οποία είτε έχουν ήδη παραδοθεί ή έχει παρέλθει ο χρόνος λήξης τους. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα πεδίο χρόνου λήξης (Time To Live: TTL), το οποίο μετράται είτε σε χρονικές μονάδες ή σε πλήθος κόμβων που διατρέχει το μήνυμα πριν απορριφθεί. Επίσης χρησιμοποιείται η ηλικία μιας μετρικής (π.χ. ο χρόνος από την τελευταία συνάντηση δυο κόμβων). Τα πρωτόκολλα αυτά είναι τα παρακάτω:

- FRESH

- Probabilistic routing (2003)
- Caching-Based routing
- Seek and focus
- Nectar protocol
- PROPHET
- Advanced PROPHET
- PER protocol
- Probabilistic routing (2012)
- SLABR protocol
- Age of Information enhanced routing
- Sedum protocol
- Single Copy Replication (SCR) protocol
- Contact based hybrid routing
- Spray and focus, spray and wait

2.3 Ηλικία της Πληροφορίας (ΗτΠ – Age of Information: AoI)

Η ιδέα της ηλικίας της πληροφορίας προτάθηκε το 2011 (Kaul et al, 2011) με σκοπό να μετρήσει τη «φρεσκάδα» μιας πληροφορίας σχετικής με μια διαδικασία η οποία παρατηρείται από απόσταση. Ας υποθέσουμε ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από 2 κόμβους, τον κόμβο πηγή (s) και τον κόμβο προορισμό (d). Ο κόμβος (s) αποθηκεύει δείγματα μια διαδικασίας $X(t)$ με σκοπό να μεταφερθούν στον κόμβο (d) όπου γίνεται η παρατήρηση της διαδικασίας. Τα δείγματα αυτά αποθηκεύονται με τη μορφή πακέτων τα οποία περιέχουν την τιμή της διαδικασίας $X(t_i)$ κατά τη χρονική στιγμή t_i καθώς και την ίδια τη χρονοσφραγίδα t_i . Το σύστημα απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 5 (Kallitsis et al, 2022):



Εικόνα 5: Βασικό μοντέλο επίδειξης της έννοιας της Ηλικίας της Πληροφορίας (Kallitsis et al, 2022)

Ας υποθέσουμε ότι η παραγωγή των δειγμάτων κατάστασης (τιμών) της διαδικασίας $X(t)$ μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν στοχαστική διαδικασία με μέσο ρυθμό παραγωγής λ και τα πακέτα στα οποία περιέχονται τα δείγματα μεταδίδονται μέσω ενός τηλεπικοινωνιακού καναλιού με ρυθμό μετάδοσης μ , με προορισμό τον κόμβο d . Η ιδέα της Ηλικίας της Πληροφορίας σχετίζεται με τη «φρεσκάδα» της πληροφορίας που είναι αποθηκευμένη εκείνη τη στιγμή στον κόμβο προορισμό (d), σχετικά πάντα με την κατάσταση της διαδικασίας $X(t)$. Είναι δηλαδή το μέτρο του χρόνου που έχει παρέλθει από τη λήψη της τελευταίας ενημέρωσης από τον κόμβο πηγή (s).

Ας συμβολίσουμε t_k το χρόνο κατά τον οποίο οι ενημερώσεις παραλαμβάνονται στον προορισμό. Την τρέχουσα χρονική στιγμή ξ δείκτης της πιο πρόσφατης ενημέρωσης είναι (Kosta et al, 2017):

$$N(\xi) = \max\{k \mid t_k \leq \xi\}$$

όπου η χρονοσφραγίδα της πιο πρόσφατης ενημέρωσης είναι:

$$u(\xi) = t_{N(\xi)}$$

Η Ηλικία της Πληροφορίας της διαδικασίας στον κόμβο πηγή, όπως αυτή είναι αποθηκευμένη την τρέχουσα στιγμή στον κόμβο προορισμό, ορίζεται όπως παρακάτω:

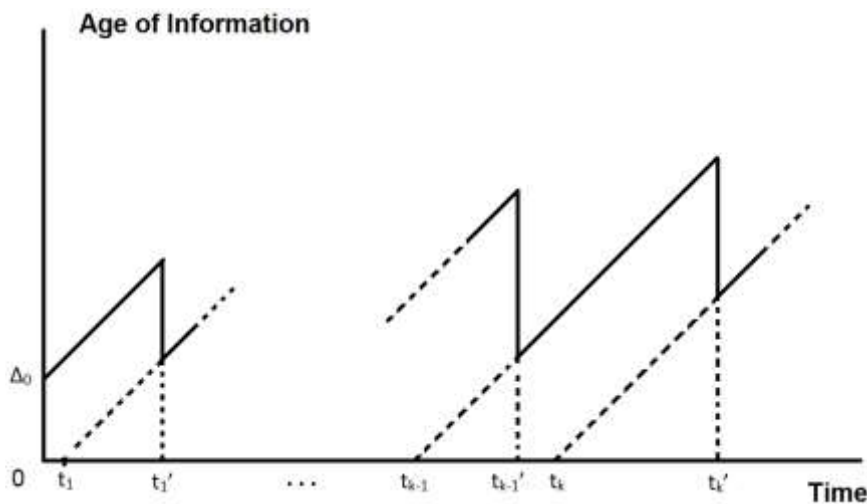
$$\Delta(t) = t - u(t)$$

και είναι η διαφορά της τρέχουσας χρονικής στιγμής από το χρόνο παραγωγής της πιο πρόσφατης ενημέρωσης που έχει παραληφθεί στον κόμβο προορισμό.

Στην εικόνα 6 απεικονίζεται παράδειγμα της εξέλιξης της ηλικίας της πληροφορίας σε συνάρτηση με το χρόνο (Kallitsis et al, 2022). Ας υποθέσουμε ότι στην αρχή της μέτρησης η ηλικία της τελευταίας ενημέρωσης ήταν Δ_0 . Μια νέα ενημέρωση παράγεται στην πηγή τη χρονική στιγμή t_1 . Στο μεταξύ η ηλικία της πληροφορίας αυξάνεται όσο περνά ο χρόνος. Τη χρονική στιγμή t_1' η ενημέρωση παραλαμβάνεται στον προορισμό και η ηλικία της πληροφορίας μειώνεται και γίνεται ίση με $\Delta(t_1') = t_1' - u(t_1') = t_1' - t_1$.

Με σχόλια [VK1]: Για όλες τις εξισώσεις και σύμβολα καλύτερα να χρησιμοποιήσεις το εργαλείο του word: Insert->Equation, όπως παρακάτω

αφού $u(t'_1) = t_1$ (τη χρονική στιγμή t'_1 η πιο πρόσφατη ενημέρωση από τον κόμβο πηγή έχει χρονοσφραγίδα t_1).



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση της μεταβολής της Ηλικίας της Πληροφορίας (Kallitsis et al, 2022).

2.3.1 Περιγραφή του μοντέλου του τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Μεταξύ του κόμβου πηγής (source) και του κόμβου προορισμού (destination) υπάρχει ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Μπορούμε να θεωρήσουμε το σύστημα αυτό σαν ένα σύστημα με μία ουρά αναμονής και έναν εξυπηρετητή, δηλαδή ένα σύστημα M/M/1. Οι πελάτες (πακέτα – ενημερώσεις) εξυπηρετούνται με τη σειρά άφιξης, δηλαδή FCFS (FIRST COME FIRST SERVED). Το σύστημα αυτό έχει τα εξής χαρακτηριστικά (Bertsekas et al, 1992, Kaul et al, 2012):

- Το πρώτο γράμμα M (Memoryless) δηλώνει τη διαδικασία παραγωγής πακέτων και αφίξεων στο σύστημα, η οποία γίνεται σύμφωνα με μια διαδικασία Poisson με ρυθμό λ . Αυτό σημαίνει ότι οι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων είναι τυχαίες μεταβλητές ανεξάρτητες μεταξύ τους με μέση τιμή $1/\lambda$.
- Το δεύτερο γράμμα M δηλώνει τη διαδικασία εξυπηρέτησης των πακέτων μέσα στο σύστημα, η οποία γίνεται σύμφωνα με μια εκθετική διαδικασία Poisson με ρυθμό μ . Αυτό

σημαίνει ότι οι χρόνοι εξυπηρέτησης (μετάδοσης των πακέτων) είναι τυχαίες μεταβλητές ανεξάρτητες μεταξύ τους που ακολουθούν εκθετική κατανομή με μέση τιμή $1/\mu$.

- Ο τελευταίος αριθμός (1) δηλώνει το πλήθος των εξυπηρετητών, δηλαδή των γραμμών μετάδοσης των πακέτων – ενημερώσεων.

Για τη συνέχιση της ανάλυσης χρησιμοποιούμε τους παρακάτω συμβολισμούς (όπου πελάτης θεωρείται το πακέτο – ενημέρωση):

N = Μέσο πλήθος πελατών στο σύστημα

T = Μέσος χρόνος πελάτη μέσα στο σύστημα

NQ = Μέσο πλήθος πελατών που περιμένουν στην ουρά αλλά δεν εξυπηρετούνται ακόμα

W = Μέσος χρόνος αναμονής πελάτη στην ουρά

Από το θεώρημα του Little έχουμε τις παρακάτω βασικές εξισώσεις:

$$N = \lambda T, NQ = \lambda W$$

Επίσης αν p_n = πιθανότητα να υπάρχουν n πελάτες μέσα στο σύστημα (στην ουρά ή εξυπηρετούμενοι), τότε από αυτές τις πιθανότητες έχουμε

$$N = \sum_{n=0}^{\infty} n p_n$$

και χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Little

$$T = \frac{N}{\lambda}$$

Κατανομή αφίξεων – η διαδικασία Poisson

Στο σύστημα M/M/1 οι αφίξεις πακέτων θεωρείται ότι ακολουθούν μια διαδικασία Poisson. Η διαδικασία αυτή ορίζεται ως εξής:

Μια διαδικασία $\{A(t) | \geq 0\}$ η οποία λαμβάνει μη αρνητικές ακέραιες τιμές λέγεται ότι είναι διαδικασία Poisson με ρυθμό λ αν

1. $A(t)$ είναι μια διαδικασία που μετρά το συνολικό αριθμό αφίξεων από τη χρονική στιγμή 0 ως τη χρονική στιγμή t (θεωρούμε ότι $A(0) = 0$) και για $s < t$, $A(t) - A(s) =$ πλήθος αφίξεων στο διάστημα $(s, t]$.

2. Το πλήθος των αφίξεων σε ανεξάρτητα χρονικά διαστήματα είναι επίσης ανεξάρτητο.
3. Το πλήθος των αφίξεων σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα μήκους t είναι μια κατανομή Poisson με παράμετρο λt , δηλαδή για κάθε t τέτοιο ώστε $t > 0$,

$$P\{A(t + \tau) - A(t) = n\} = e^{-\lambda \tau} \frac{(\lambda \tau)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, \dots$$

Το μέσο πλήθος αφίξεων σε ένα χρονικό διάστημα μεγέθους τ είναι $\lambda \tau$ (εφόσον βασίζεται στο μέσο της κατανομής Poisson). Αυτό εύλογα μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το λ εκφράζει το ρυθμό αφίξεων (δηλαδή το μέσο πλήθος αφίξεων ανά μονάδα χρόνου).

Κατανομή εξυπηρέτησης

Πάλι στο σύστημα M/M/1 υποθέσαμε ότι η εξυπηρέτηση των πακέτων ακολουθούν μια εκθετική κατανομή με παράμετρο μ , δηλαδή αν s_n είναι ο χρόνος εξυπηρέτησης του πακέτου n ,

$$P\{s_n \leq s\} = 1 - e^{-\mu s}, \quad s \geq 0$$

Οι χρόνοι εξυπηρέτησης s_n είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και ανεξάρτητοι από τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των αφίξεων. Η παράμετρος μ λέγεται ρυθμός εξυπηρέτησης και εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο λειτουργεί ο εξυπηρετητής όταν έχει συνεχώς πακέτα – πελάτες στην ουρά (δηλαδή το πλήθος εξυπηρετούμενων ανά μονάδα χρόνου).

Μια σημαντική ιδιότητα της εκθετικής κατανομής είναι ότι δεν έχει μνήμη και αυτό εκφράζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P\{t_n > r + t \mid t_n > t\} = P\{t_n > r\}, \text{ για } r, t \geq 0$$

$$P\{s_n > r + t \mid s_n > t\} = P\{s_n > r\}, \text{ για } r, t \geq 0$$

Στο πλαίσιο του τηλεπικοινωνιακού καναλιού μετάδοσης η ανεξαρτησία στα χρονικά διαστήματα μεταξύ αφίξεων και στους χρόνους εξυπηρέτησης σημαίνει ότι το μήκος ενός εισερχόμενου πακέτου δεν επηρεάζει το χρόνο άφιξης του επόμενου πακέτου.

Υπάρχουν και άλλες περιπτώσεις τέτοιων συστημάτων ουρών αναμονής με διαφορετικές κατανομές χρόνων εξυπηρέτησης, όπως το M/D/1 (το D δηλώνει Deterministic) και το M/G/1 (το G δηλώνει General). Επίσης μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι από 1 εξυπηρετητές (π.χ. M/M/2). Σε όλες τις περιπτώσεις οι χρόνοι άφιξης

στην ουρά και εξυπηρέτησης από το σύστημα θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές ανεξάρτητες μεταξύ τους και καταναμημένες με την ίδια κατανομή.

2.3.2 Άλλα χαρακτηριστικά της Ηλικίας της Πληροφορίας

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα (εικόνα 6), η καμπύλη της Ηλικίας της Πληροφορίας έχει «πριονωτή» μορφή. Αυτό μας οδηγεί να ορίσουμε δύο ακόμα μεγέθη, τη μέση Ηλικία της Πληροφορίας (average Age of Information) και την Ηλικία Αιχμής (peak Age of Information) (Costa et al, 2016).

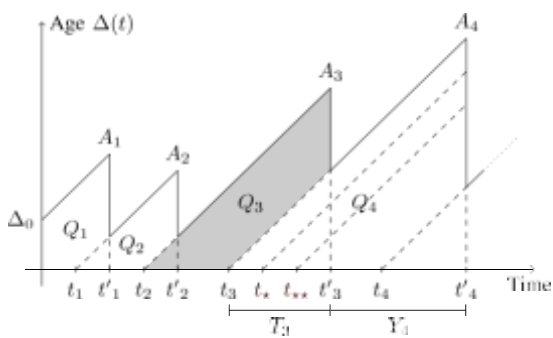
Μέση Ηλικία της Πληροφορίας

Η μέση Ηλικία της Πληροφορίας μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας ένα μέσο χρόνο. Αν υποθέσουμε ένα χρονικό παράθυρο $(0, \tau)$, τότε η μέση Ηλικία της Πληροφορίας ορίζεται όπως παρακάτω:

$$\Delta\tau = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \Delta(t) dt$$

Ηλικία Αιχμής

Ανάλογα με την εφαρμογή, ίσως είναι χρήσιμο να ορίσουμε τη μέγιστη τιμή της Ηλικίας της Πληροφορίας, την τιμή δηλαδή που θα έχει αμέσως πριν την παραλαβή στον κόμβο – προορισμό της επόμενης ενημέρωσης. Η Ηλικία Αιχμής θα είναι η Ηλικία που αντιστοιχεί στα σημεία αιχμής A_k όπως απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 7.



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση της έννοιας της Ηλικίας της Πληροφορίας (Costa et al, 2016).

Ας υποθέσουμε ότι $Y_k = t'_k - t'_{k-1}$, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την παραλαβή της ενημέρωσης $k-1$ ως το χρόνο παραλαβής της επόμενης ενημέρωσης k (στο σχήμα είναι $Y_4 = t'_4 - t'_3$). Επίσης $T_{k-1} = t'_{k-1} - t_{k-1}$, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται από τη δημιουργία του πακέτου – ενημέρωσης στον κόμβο πηγή ως την παραλαβή του στον κόμβο προορισμό (στο σχήμα $T_3 = t'_3 - t_3$). Η ηλικία αιχμής ορίζεται όπως παρακάτω:

$$A_k = T_k - 1 + Y_k$$

και είναι η τιμή που λαμβάνει η Ηλικία της Πληροφορίας αμέσως πριν την παραλαβή στον κόμβο – προορισμό της επόμενης ενημέρωσης (στο σχήμα $A_4 = T_3 + Y_4$).

3. Δρομολόγηση σε δίκτυα DTN χρησιμοποιώντας την έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας

3.1 Ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί την έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας

Έχει ήδη παρουσιαστεί ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για DTN δίκτυα που χρησιμοποιεί στο σχεδιασμό του την έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας. Το πρωτόκολλο αυτό είναι παραλλαγή του πρωτοκόλλου FRESH, η λειτουργία του οποίου παρουσιάστηκε περιληπτικά στην ενότητα 2.2.2. Το πρωτόκολλο FRESH προωθεί μόνο ένα αντίγραφο του μηνύματος και βασίζεται στην ιστορικότητα των συναντήσεων (contact times) μεταξύ των κόμβων. Όλοι οι κόμβοι αποθηκεύουν σε σχετικό πίνακα τη χρονική στιγμή της πιο πρόσφατης επαφής με κάθε άλλο κόμβο. Ο κόμβος – πηγή αναζητά (μεταξύ των κόμβων που είναι σε επαφή με τον κόμβο – πηγή) τον κόμβο που έχει καταχωρημένη την πιο πρόσφατη χρονική στιγμή επαφής με τον κόμβο – προορισμό και μεταδίδει το μήνυμα σε αυτόν. Το ίδιο γίνεται σε κάθε επόμενο κόμβο μέχρι να παραδοθεί το μήνυμα στον προορισμό του.

Στην παραλλαγή όπου λαμβάνεται υπόψη η Ηλικία της Πληροφορίας (Kallitsis et al, 2022), σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται η Ηλικία της Πληροφορίας κάθε μηνύματος (πακέτου) που βρίσκεται στο δίκτυο με βάση τη χρονοσφραγίδα του (σε σχέση με την τρέχουσα χρονική στιγμή). Αν ένα μήνυμα υπερβεί την καθορισμένη ηλικία λήξης (παράμετρος TTL), τότε το πακέτο θεωρείται παρωχημένο και απορρίπτεται προκειμένου να εξοικονομηθούν πόροι (χώρος στο buffer, ενέργεια κλπ). Σε αυτή τη λογική θα είναι και η δική μας πρόταση. Θα προτείνουμε μια παραλλαγή ενός πρωτοκόλλου που θα έχει στο σχεδιασμό του την Ηλικία της Πληροφορίας.

3.2 Το πρωτόκολλο NECTAR

Το πρωτόκολλο NECTAR χρησιμοποιεί μια τυχαία επαφή μεταξύ 2 κόμβων για τον υπολογισμό του δείκτη γειτονιάς (Neighborhood Index, ο τρόπος υπολογισμού του οποίου θα αναλυθεί παρακάτω) και μεταδίδει μηνύματα με ελεγχόμενο τρόπο. Κατά τη διάρκεια της επαφής, οι 2 κόμβοι αρχίζουν πρώτα τη μετάδοση μηνυμάτων των οποίων προορισμός είναι ένας από τους 2 κόμβους, κατόπιν ανταλλάσσουν πληροφορίες για τη γειτονιά (δηλαδή το Neighborhood Index) και τέλος προωθούν άλλα μηνύματα. Τα μηνύματα

προωθούνται σε κόμβους με μεγαλύτερο δείκτη γειτονιάς. Η διάδοση του Δείκτη Γειτονιάς επιτρέπει μια πιο ακριβή γνώση της τοπολογίας του δικτύου, η οποία βοηθά στην εργασία δρομολόγησης.

Οι λειτουργίες που εκτελούνται από το πρωτόκολλο NECTAR είναι οι εξής:

- Υπολογισμός δείκτη γειτονιάς (Neighborhood Index).
- Αλγόριθμος δρομολόγησης μηνυμάτων.
- Πολιτική απόρριψης μηνυμάτων.

Στον Πίνακα 1 περιγράφονται όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται:

Παράμετρος	Περιγραφή
Contact(i, j)	Περιγράφει τον αριθμό των χρονικών μονάδων που οι κόμβοι i και j παρέμειναν σε επαφή
Hops(i,j)	Περιγράφει το πλήθος των κόμβων που απαιτούνται ώστε το i να φτάσει στο j
TS	Τρέχουσα χρονοσφραγίδα
ts_update(i,j)	Χρονοσφραγίδα της τελευταίας ενημέρωσης διαδρομής από i έως j
a	Η μέγιστη τιμή του TTL (σε πλήθος κόμβων)
s	Η σταθερά γήρανσης
w	Συντελεστής βαρύτητας που εφαρμόζεται σε γνωστό Neighborhood Index
g	Καθορίζει τη μέγιστη χωρητικότητα buffer για τη λήψη μηνυμάτων κατά τη φάση epidemic.
MinEpidemicLevel	Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης το πρωτόκολλο NECTAR λειτουργεί όπως το epidemic
MaxEpidemicLevel	Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης το πρωτόκολλο NECTAR λειτουργεί σαν το epidemic ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου g.

Παράμετρος	Περιγραφή
$N(i, j)$	Neighborhood Index από τον κόμβο i στον κόμβο j

Πίνακας 1: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται από το πρωτόκολλο NECTAR

Υπολογισμός του δείκτη γειτονιάς (Neighborhood Index)

Ο δείκτης γειτονιάς (Neighborhood Index) βασίζεται στο ιστορικό των πρόσφατων επαφών, με τέτοιο τρόπο ώστε οι κόμβοι που είναι συχνοί γείτονες να παρουσιάζουν υψηλό δείκτη γειτονιάς. Όταν συμβεί η πρώτη συνάντηση (επαφή) μεταξύ των κόμβων i και j , ο δείκτης $N(i, j)$ λαμβάνει την τιμή 1 και στους δύο κόμβους και ενώ οι κόμβοι i και j βρίσκονται σε επαφή (σύνδεση), ο δείκτης γειτονιάς και η παράμετρος $Contact(i, j)$ αυξάνονται γραμμικά. Έπειτα οι κόμβοι i και j ενημερώνουν τον δείκτη γειτονιάς για προορισμούς – κόμβους που δεν βρίσκονται εντός εμβέλειας. Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος j έχει καλύτερο δείκτη γειτονιάς για τον κόμβο d από τον κόμβο i . Σε αυτήν την περίπτωση, ο δείκτης γειτονιάς $N'(i, d)$ θα υπολογιστεί με τον ακόλουθο τύπο:

$$N'(i, d) = \frac{Contact(j, d)}{(Hops(j, d) + 1) \times (TS - ts_{update(j, d)} + 1)^s}$$

Ο τύπος του δείκτη γειτονιάς, που φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση, ευνοεί την παράδοση μηνυμάτων σε γείτονες που είναι κοντά σε έναν προορισμό και έχουν έρθει σε επαφή πρόσφατα.

Επιπλέον, εάν ο κόμβος i έχει ήδη μια διαδρομή προς τον κόμβο d και ο κόμβος j έχει καλύτερο δείκτη γειτονιάς στον κόμβο d , ο δείκτης $N(i; d)$, θα ενημερωθεί με σταθμισμένο τρόπο. Με αυτή την προσέγγιση ο υπολογισμός του δείκτη γειτονιάς μετριάξει τον αντίκτυπο νέων πληροφοριών και αποτρέπει κόμβους από δραστικές αλλαγές ενός γνωστού δείκτη γειτονιάς με δεδομένα που μπορεί να έχουν περιορισμένη εγκυρότητα. Ο δείκτης γειτονιάς αλλάζει, ωστόσο, η σχετική τιμή μειώνεται, επιτρέποντας έναν άλλο κόμβο, με καλύτερο δείκτη γειτονιάς, να είναι ο επόμενος κόμβος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$N(i, d) = \begin{cases} N'(i, d), & \text{αν ο κόμβος } d \text{ είναι άγνωστος} \\ \frac{(N(i, d) \times w) + N'(i, d)}{w + 1}, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Αλγόριθμος δρομολόγησης

Λαμβάνοντας υπόψη το περιορισμένο εύρος ζώνης του δικτύου, είναι επιθυμητό οι κόμβοι να επιλέγουν μηνύματα προς μετάδοση, εκμεταλλευόμενοι το διαθέσιμο χρόνο της επαφής και να μην υπάρχει απώλεια ευκαιρίας μετάδοσης. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης μηνυμάτων σε αυτή την περίπτωση καθορίζει την προτεραιότητα μετάδοσης κάθε μηνύματος που υπάρχει στον προσωρινό χώρο αποθήκευσης (buffer). Τα μηνύματα των οποίων ο προορισμός είναι η τρέχουσα επαφή μεταδίδονται πρώτα. Δηλαδή, εάν οι κόμβοι i και j δημιουργήσουν μια επαφή (σύνδεση), ο κόμβος i στέλνει πρώτα τα μηνύματα με προορισμό τον κόμβο j και αντίστροφα.

Τα μηνύματα που δημιουργούνται στο δίκτυο έχουν μια καθορισμένη τιμή TTL και αυτή η τιμή μειώνεται κατά ένα σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο. Τα μηνύματα με $TTL = 1$ θα παραδίδονται μόνο στον κόμβο προορισμού. Η μέγιστη τιμή του πεδίου TTL καθορίζεται από την παράμετρο a . Μετά από αυτή την πρώτη φάση, οι δύο κόμβοι ενημερώνουν το δείκτη γειτονιάς (Neighborhood Index) όπως περιγράφεται παραπάνω. Κατόπιν μεταδίδονται τα μηνύματα του κόμβου i που έχουν προορισμό τον κόμβο j και αντίστροφα. Παρακάτω δίνεται ο ψευδοκώδικας της λειτουργίας του πρωτοκόλλου NECTAR στον κόμβο i :

Ψευδοκώδικας λειτουργίας του πρωτοκόλλου NECTAR στον κόμβο i

For each encountered node j

for every destination in node i records.table

update Neighborhood Index (NI)

End

for each message in node i buffer

send messages with destination j (and vice versa)

if message.TTL > 1 # av TTL = 1 only Direct transmission #

if $NI(i, destination) < NI(j, destination)$

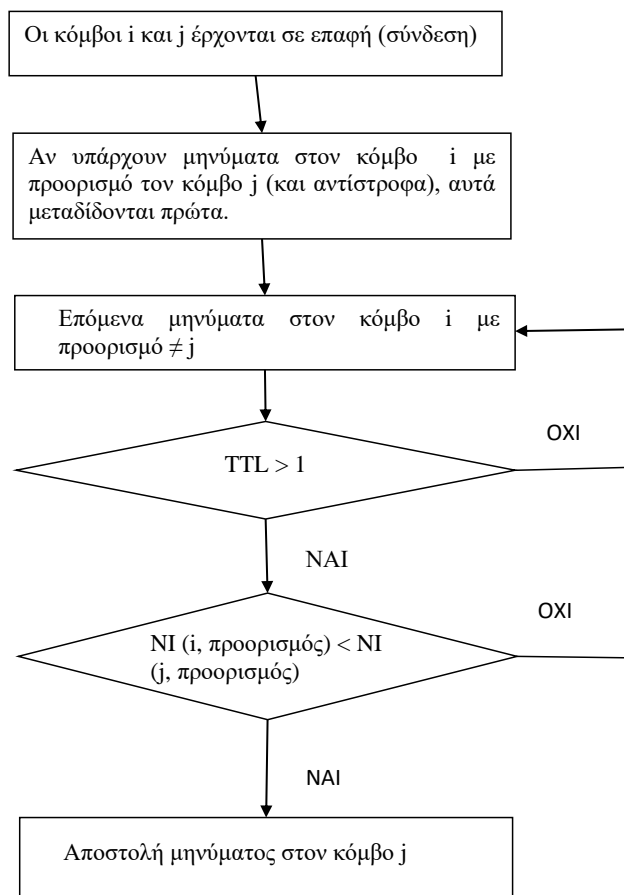
send message to node j

message.TTL = message.TTL - 1

End

End

Στην παρακάτω εικόνα δίνεται ένα συνοπτικό διάγραμμα ροής του αλγόριθμου δρομολόγησης NECTAR:



Εικόνα 8: Συνοπτικό διάγραμμα ροής αλγόριθμου δρομολόγησης NECTAR

Αφού παραδοθεί ένα μήνυμα στον προορισμό του, οι κόμβοι διατηρούν μόνο τις κεφαλίδες (headers) των μηνυμάτων για χρόνο `ttl_deleted` σε διαφορετικό χώρο αποθήκευσης για να αποφευχθεί η λήψη περιττών αντιγράφων του ίδιου μηνύματος. Αυτός ο μηχανισμός χρησιμοποιείται σαν `Passive Ack`. Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος `j` παρέδωσε το μήνυμα `X` στον προορισμό `d` και μετά μετακινήθηκε προς τον κόμβο `i`, που έχει το ίδιο μήνυμα `X` προς τον κόμβο `d` (που είναι όμως εκτός εμβέλειας του κόμβου `d`). Όταν οι κόμβοι `i` και `j` ενημερώνουν το δείκτη γειτονιάς, ο κόμβος `j` θα ενημερώσει ότι το μήνυμα `X` προς τον κόμβο `d` έχει ήδη παραδοθεί. Με την πληροφορία αυτή ο κόμβος `i` θα αποθηκεύσει ένα αντίγραφο της κεφαλίδας του μηνύματος `X` για χρόνο `ttl_deleted` στον καθορισμένο αποθηκευτικό χώρο.

Πολιτική απόρριψης μηνυμάτων

Η πλειοψηφία των κόμβων στα DTN δίκτυα έχει περιορισμένο διαθέσιμο προσωρινό χώρο αποθήκευσης και αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Ένας κόμβος μπορεί να μην είναι σε θέση να παραδώσει όλα τα μηνύματα λόγω έλλειψης χώρου στους γειτονικούς κόμβους. Ως εκ τούτου η πολιτική απόρριψης μηνυμάτων είναι απαραίτητη.

Τα ληφθέντα μηνύματα αποθηκεύονται και συσχετίζονται με δύο ακόμη παραμέτρους: `Mrepl`, που μετράει τον αριθμό των αντιγράφων μηνυμάτων και `Mslot = TimeStamp-ts_update`, το οποίο μετρά το χρόνο που έχει παρέλθει από την παραλαβή του μηνύματος. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του δείκτη γήρανσης του μηνύματος.

Η απόρριψη μηνύματος συμβαίνει όταν η περιοχή αποθήκευσης φτάσει στη μέγιστη χωρητικότητα. Η πολιτική απόρριψης μηνυμάτων έχει σκοπό να διατηρεί τα πρόσφατα μηνύματα και αυτά που έχουν προωθηθεί σε λίγους γείτονες. Έτσι μηνύματα με υψηλότερο δείκτη γήρανσης (`Mage`) απορρίπτονται σύμφωνα με τον τύπο

$$Mage = Mrepl \times Mslot$$

Η πρότασή μας

Η πρότασή μας είναι ένα τροποποιημένο πρωτόκολλο στο οποίο το πεδίο `TTL` θα αντικατασταθεί από ένα πεδίο `Maoui (Max Age of Information)`. Το πεδίο αυτό θα

μετρά το χρόνο που έχει παρέλθει από το χρόνο δημιουργίας του μηνύματος, δηλαδή θα είναι:

$$M_{aoi} = TS - T_{created}$$

Θα υπάρχει επίσης μια νέα παράμετρος T_{maxage} που θα καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ηλικία της πληροφορίας. Το πεδίο αυτό θα χρησιμοποιείται με 2 τρόπους:

- 1) Θα λαμβάνεται υπόψη στον αλγόριθμο δρομολόγησης ώστε τα μηνύματα με χαμηλή (ή υψηλή) τιμή στο πεδίο M_{aoi} να έχουν υψηλότερη (ή χαμηλότερη) προτεραιότητα στη δρομολόγηση (στο διατιθέμενο χρόνο που οι 2 κόμβοι θα είναι σε σύνδεση – επαφή), ανάλογα με τις απαιτήσεις στο συγκεκριμένο σύστημα.
- 2) Η πολιτική απόρριψης μηνυμάτων θα λαμβάνει υπόψη μόνο το πεδίο M_{aoi} και θα απορρίπτει μηνύματα για τα οποία έχει παρέλθει η μέγιστη επιτρεπόμενη ηλικία της πληροφορίας (T_{maxage}).

3.3 Το πρωτόκολλο Spray and Wait

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης Spray and Wait αποτελείται από δύο φάσεις:

- Φάση ψεκασμού (spray): Για κάθε μήνυμα που προέρχεται από ένα κόμβο - πηγή, δημιουργούνται L αντίγραφα μηνυμάτων τα οποία αρχικά προωθούνται από την πηγή (και πιθανώς άλλους κόμβους που λαμβάνουν αντίγραφο) σε L διαφορετικούς κόμβους.
- Φάση αναμονής: εάν ο προορισμός δεν βρεθεί στη φάση του ψεκασμού, καθένas από τους L κόμβους που φέρει ένα αντίγραφο του μηνύματος εκτελεί direct transmission (δηλαδή θα προωθήσει το μήνυμα μόνο στον προορισμό του).

Το πρωτόκολλο Spray and Wait συνδυάζει την ταχύτητα της δρομολόγησης του πρωτοκόλλου «πλημμύρας» (epidemic protocol) με την απλότητα και την οικονομία της άμεσης μετάδοσης (direct transmission). Η μετάδοση αρχίζει τη διάδοση αντιγράφων μηνυμάτων με έναν τρόπο παρόμοιο με την «πλημμύρα». Όταν υπάρχουν αρκετά αντίγραφα στο δίκτυο ώστε τουλάχιστον ένα από αυτά να βρει τον προορισμό του γρήγορα (με μεγάλη πιθανότητα), σταματά και επιτρέπει σε κάθε κόμβο που φέρει ένα

αντίγραφο να εκτελεί απευθείας μετάδοση. Έτσι το πρωτόκολλο Spray and Wait θα μπορούσε να θεωρηθεί ως συμβιβασμός μεταξύ σχημάτων μεμονωμένων και πολλαπλών αντιγράφων. Η περιγραφή του Spray and Wait αφήνει ανοιχτό το θέμα του πώς θα διαδοθούν αρχικά τα L αντίγραφα. Διαφορετικοί τρόποι μπορούν να βρεθούν για τον τρόπο «ψεκασμού». Ο απλούστερος τρόπος είναι ο κόμβος-πηγή να προωθήσει όλα τα L αντίγραφα στους πρώτους L διακριτούς κόμβους που θα συναντήσει. Παρακάτω δίνεται ο ψευδοκώδικας της λειτουργίας του πρωτοκόλλου Spray and Wait στον κόμβο i:

Ψευδοκώδικας λειτουργίας του πρωτοκόλλου Spray and wait στον κόμβο i

For each encountered node j

for each message in node i buffer

send messages with destination j (and vice versa)

*if message.relay > 0 # message.relay: πεδίο με αρχική τιμή L στον κόμβο –
πηγή το οποίο μειώνεται κατά 1 σε κάθε μετάδοση #*

send copy of message to node j

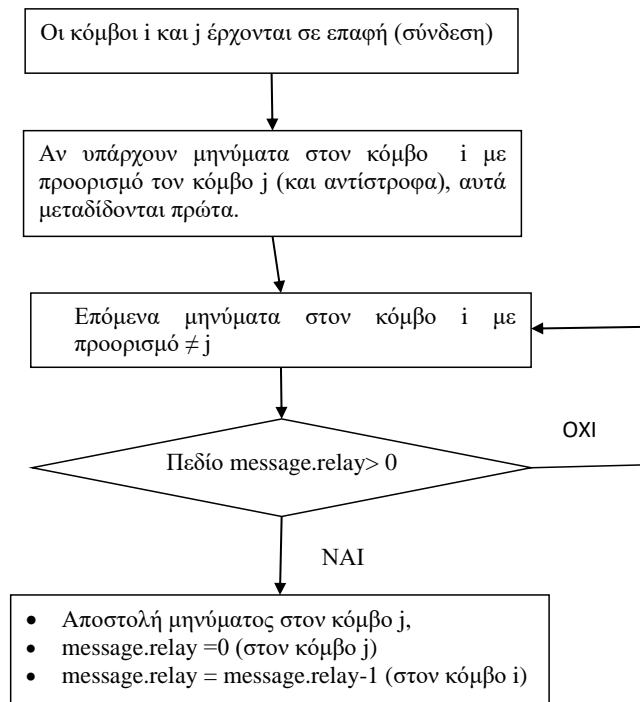
message.relay (on node j) = 0 # direct transmission only on node j #

message.relay (on node i) = message.relay - 1

End

End

Στην παρακάτω εικόνα δίνεται ένα συνοπτικό διάγραμμα ροής του αλγόριθμου δρομολόγησης Spray and Wait:



Εικόνα 9: Συνοπτικό διάγραμμα ροής αλγόριθμου δρομολόγησης Spray and Wait

Η πρόταση μας

Η πρότασή μας είναι ένα τροποποιημένο πρωτόκολλο στο οποίο θα προστεθεί πεδίο Ma_{oi} (Max Age of Information). Το πεδίο αυτό θα μετρά το χρόνο που έχει παρέλθει από το χρόνο δημιουργίας του μηνύματος, δηλαδή θα είναι:

$$Ma_{oi} = TS - T_{created}$$

Θα υπάρχει επίσης μια νέα παράμετρος T_{maxage} που θα καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ηλικία της πληροφορίας. Το πεδίο αυτό θα χρησιμοποιείται με 2 τρόπους:

- 1) Θα λαμβάνεται υπόψη στον αλγόριθμο δρομολόγησης ώστε τα μηνύματα με χαμηλή (ή υψηλή) τιμή στο πεδίο Ma_{oi} να έχουν υψηλότερη (ή χαμηλότερη) προτεραιότητα στη δρομολόγηση (στο διατιθέμενο χρόνο που οι 2 κόμβοι θα

είναι σε σύνδεση – επαφή), ανάλογα με τις απαιτήσεις στο συγκεκριμένο σύστημα.

- 2) Η πολιτική απόρριψης μηνυμάτων θα λαμβάνει υπόψη μόνο το πεδίο Μαοί και θα απορρίπτει μηνύματα για τα οποία έχει παρέλθει η μέγιστη επιτρεπόμενη ηλικία της πληροφορίας (Tmaxage).

4 Αξιολόγηση επίδοσης τροποποιημένου πρωτοκόλλου Spray and Wait with AoI

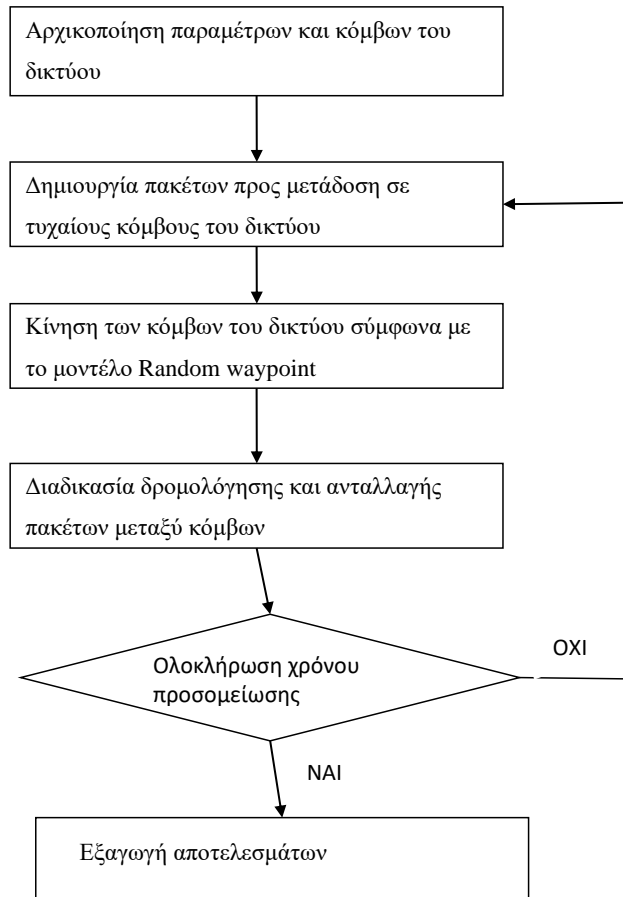
Στο ερευνητικό πεδίο της αξιολόγησης πρωτοκόλλων για ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα δεν υπάρχουν έτοιμες λύσεις προσομοίωσης για τον έλεγχο και δοκιμή λειτουργίας πειραματικών πρωτοκόλλων. Για τον λόγο αυτό έπρεπε να αναπτυχθεί ένα εργαλείο προσομοίωσης, μια εφαρμογή δηλαδή την οποία θα χρησιμοποιήσουμε για να δοκιμάσουμε τη λειτουργία του νέου πρωτοκόλλου σε σύγκριση με το ήδη υπάρχον (Spray and Wait). Η εργασία αυτή αποδείχθηκε η δυσκολότερη και πιο χρονοβόρα καθώς έπρεπε να προηγηθεί η εξοικείωση με το εργαλείο ανάπτυξης. Χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο MATLAB καθώς είναι ιδανικό για εργασίες προσομοίωσης, αφού δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας και χειρισμού πινάκων χωρίς ο χρήστης να τους δημιουργήσει και να τους ορίσει από πριν (όπως θα έπρεπε να γίνει, π.χ. αν χρησιμοποιούσαμε PYTHON με τα δεδομένα να αποθηκεύονται σε μια βάση MYSQL).

4.1 Συνοπτική περιγραφή και σχηματική απεικόνιση του προσομοιωτή

Όπως αναφέρθηκε η ανάπτυξη της εφαρμογής προσομοίωσης έγινε με το εργαλείο MATLAB. Ο κώδικας του προσομοιωτή αποτελείται από 5 κύρια τμήματα:

- Αρχικοποίηση παραμέτρων και κόμβων του δικτύου.
- Δημιουργία πακέτων προς μετάδοση σε τυχαίους κόμβους του δικτύου.
- Κίνηση των κόμβων του δικτύου σύμφωνα με το μοντέλο Randomwaypoint (θα αναλυθεί παρακάτω).
- Διαδικασία δρομολόγησης και ανταλλαγής πακέτων μεταξύ κόμβων.
- Επεξεργασία δεδομένων προσομοίωσης και εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Παρακάτω φαίνεται ένα συνοπτικό διάγραμμα ροής του προσομοιωτή που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της εργασίας.



Εικόνα 10: Συνοπτικό διάγραμμα ροής του προσομοιωτή

4.2 Περιγραφή των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων του προσομοιωτή

Όπως είναι αναμενόμενο για τη λειτουργία του προσομοιωτή χρησιμοποιήθηκαν 2 ειδών παράμετροι—σταθερές και μεταβλητές:

Σταθερές παράμετροι: Παράμετροι δηλαδή που έμειναν σταθερές σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Οι παράμετροι αυτές είναι οι παρακάτω:

- Μήκος πλευράς τετράγωνου χώρου προσομείωσης $L = 1000$ (η προσομείωση θεωρείται ότι υλοποιείται σε πεπερασμένο χώρο τετράγωνου σχήματος).

- Μέγιστη τιμή Time To Live (TTL) $T=10$ (για το πρωτόκολλο Spray and Wait η παράμετρος αυτή μετρά μεταδόσεις –hops).
- Μέγιστη τιμή Max Age of Information MAOI= 10 (για το πρωτόκολλο Spray and Wait with AoI η παράμετρος αυτή μετρά χρόνο).
- Παράμετρος κίνησης ($\text{imm}=0,8$): Η παράμετρος αυτή παίρνει τιμές από 0 (ακίνησια κόμβων) έως 1 (κίνηση όλων των κόμβων). Χρησιμοποιείται στο τμήμα κίνησης των κόμβων του δικτύου και εκφράζει την πιθανότητα να κινηθεί κάθε κόμβος (με πιθανότητα 0 έως 1). Όσο μεγαλύτερη η παράμετρος, τόσο μεγαλύτερη κινητικότητα εμφανίζουν οι κόμβοι (η τιμή 0,8 σημαίνει ότι κάθε κόμβος σε κάθε χρονική στιγμή κινείται με πιθανότητα 80% ή αλλιώς σε κάθε χρονική στιγμή κινείται το 80% των κόμβων).
- Παράμετρος μέγιστου πλήθους αντιγράφων κάθε μηνύματος στο δίκτυο, $MC=5$. Αυτό σημαίνει ότι κάθε μήνυμα επιτρέπεται να έχει μέχρι 5 αντίγραφα στο δίκτυο (εκτός του πρωτότυπου μηνύματος), δηλαδή κάθε μήνυμα μπορεί να υπάρχει σε $MC+1$ (το πολύ) διαφορετικούς κόμβους του δικτύου – όχι περισσότερους.

Μεταβλητές παράμετροι: Παράμετροι δηλαδή που μεταβάλλονται σε κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε. Οι παράμετροι αυτές είναι οι παρακάτω:

- Πλήθος κόμβων του δικτύου (N): Όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν στο δίκτυο τόσο περισσότερες συνδέσεις γίνονται, τα μηνύματα διαδίδονται (μέχρι $MC+1$ όπως είδαμε παραπάνω) οπότε αυξάνεται η πιθανότητα να παραδοθεί ένα μήνυμα – πακέτο.
- Εμβέλεια (Radio range, R): Εκφράζει την εμβέλεια κάθε κόμβου, την ακτίνα δηλαδή εντός της οποίας 2 κόμβοι θεωρείται ότι είναι σε σύνδεση – επαφή.
- Χρονική διάρκεια δοκιμής (sim_time): Είναι ο χρόνος που διαρκεί κάθε δοκιμή και μετρά το πλήθος των επαναλήψεων που τρέχει ο προσομοιωτής.
- Παράμετρος (K) που ορίζει το πλήθος των πακέτων που δημιουργούνται στη μονάδα του χρόνου κάθε δοκιμής. Το πλήθος των μοναδικών πακέτων που δημιουργούνται σε κάθε δοκιμή θα είναι το γινόμενο της παραμέτρου K επί τη διάρκεια κάθε δοκιμής (sim_time), δηλαδή
πλήθος μοναδικών πακέτων = $K \times \text{sim_time}$.

Να σημειώσουμε εδώ ότι η ταχύτητα και η γωνία κίνησης είναι μεταβλητές αλλά τυχαία μεταβαλλόμενες παράμετροι για την κίνηση κάθε κόμβου. Η ταχύτητα παίρνει

τιμές στο διαστήμα $[1, 10]$ ενώ η γωνία κίνησης (κατεύθυνση παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, 360]$).

4.3 Αναλυτική περιγραφή του προσομοιωτή

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο προσομοιωτής αποτελείται από τα 5 παρακάτω κύρια τμήματα:

- Αρχικοποίηση παραμέτρων και κόμβων του δικτύου.
- Δημιουργία πακέτων προς μετάδοση σε τυχαίους κόμβους του δικτύου.
- Κίνηση των κόμβων του δικτύου σύμφωνα με το μοντέλο Random waypoint (θα αναλυθεί παρακάτω).
- Διαδικασία δρομολόγησης και ανταλλαγής πακέτων μεταξύ κόμβων.

Επεξεργασία δεδομένων προσομοίωσης και εξαγωγή αποτελεσμάτων Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε με περισσότερες λεπτομέρειες τη λειτουργία κάθε τμήματος.

Αρχικοποίηση παραμέτρων και κόμβων του δικτύου

Στο τμήμα αυτό ορίζονται όλες οι παράμετροι που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επίσης δημιουργούνται όλοι οι N κόμβοι που θα χρησιμοποιηθούν σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Οι N αυτοί κόμβοι καταχωρούνται σε πίνακα όπου ορίζονται τυχαία οι αρχικές τους θέσεις (συντεταγμένες) στον τετράγωνο χώρο της δοκιμής μεγέθους $L \times L$. Επίσης δημιουργείται ο πίνακας όπου καταχωρούνται οι κόμβοι που είναι σε σύνδεση σε κάθε επανάληψη καθώς και το πλήθος τους, το πλήθος δηλαδή των γειτονικών (συνδεδεμένων) κόμβων κάθε κόμβου σε κάθε επανάληψη. Τέλος δημιουργείται ο πίνακας που περιέχει τα μηνύματα – πακέτα που θα δημιουργηθούν στο επόμενο τμήμα καθώς και ο πίνακας που κρατάτα αντίγραφα πακέτων (MC) και την παράμετρο TTL (για το αρχικό πρωτόκολλο Spray and Wait) ή MAOI (Max Age Of Information, για το τροποποιημένο πρωτόκολλο Spray and Wait with AoI).

Δημιουργία πακέτων προς μετάδοση σε τυχαίους κόμβους του δικτύου

Στο τμήμα αυτό δημιουργούνται K μοναδικά πακέτα – μηνύματα σε κάθε χρονική στιγμή (επανάληψη) προς μετάδοση σε τυχαίους κόμβους του δικτύου. Τα πακέτα έχουν τα εξής πεδία:

- ❖ Πεδίο Id: συνεχόμενοι αριθμοί.
- ❖ Id κόμβου πηγής: τυχαίες τιμές 1 ως N (πλήθος κόμβων).
- ❖ Id κόμβου προορισμού: τυχαίες τιμές 1 ως N (πλήθος κόμβων).
- ❖ Id τρέχοντα κόμβου: αρχικά ίσο με το Id κόμβου πηγής, αλλάζει στη συνέχεια.
- ❖ Χρονική στιγμή (σχισμή) δημιουργίας του πακέτου: η χρονική στιγμή (time) που δημιουργήθηκε το πακέτο.
- ❖ Ώρα παράδοσης του πακέτου: η χρονική στιγμή (time) που παραδόθηκε το πακέτο, αρχικά = 0.
- ❖ Κατάσταση πακέτου (status): 0:created, 1:transfer, 2: delivered, 3: deleted.
- ❖ Ώρα διαγραφής: η χρονική στιγμή (time) που διεγράφη το πακέτο.

Κίνηση των κόμβων του δικτύου σύμφωνα με το μοντέλο Random waypoint

Σε αυτό το τμήμα υλοποιείται η κίνηση των κόμβων σύμφωνα με το μοντέλο Random waypoint. Το μοντέλο αυτό προβλέπει ότι κάθε κόμβος, σε κάθε επανάληψη, κινείται ή μένει ακίνητος (ανάλογα με την παράμετρο imm που είδαμε παραπάνω). Αν ο κόμβος κινηθεί, επιλέγεται τυχαία κατεύθυνση και τυχαία ταχύτητα. Στο τέλος της κίνησης ενημερώνεται ο πίνακας με τη θέση του κόμβου καθώς και ο πίνακας που αποθηκεύονται οι κόμβοι που είναι σε σύνδεση – επαφή με αυτόν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Λιαδικασία δρομολόγησης και ανταλλαγής πακέτων μεταξύ κόμβων

Αυτό είναι το τμήμα όπου υλοποιείται η λειτουργία του πρωτοκόλλου. Για κάθε κόμβο που κινήθηκε στο προηγούμενο τμήμα, αν ο κόμβος έχει γείτονες (είναι σε σύνδεση με άλλους κόμβους) και αν ο κόμβος φέρει πακέτα, ελέγχουμε αν ο συνδεδεμένος κόμβος είναι ο κόμβος προορισμός κάποιου πακέτου, οπότε μεταδίδουμε το πακέτο στον προορισμό του και ενημερώνουμε τις σχετικές στήλες (ώρα παράδοσης και κατάσταση = 2 delivered).

Αν όχι (αν ο συνδεδεμένος κόμβος δεν είναι προορισμός κάποιου πακέτου), ελέγχουμε αν ο συνδεδεμένος κόμβος έχει ήδη το συγκεκριμένο πακέτο. Αν δεν το έχει και αν δεν έχει ήδη ξεπεραστεί το μέγιστο επιτρεπόμενο πλήθος αντιγράφων ($MC = 5$), τότε δημιουργούμε ένα αντίγραφο του πακέτου στο συνδεδεμένο κόμβο.

Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Στο τμήμα αυτό δημιουργείται πίνακας με όλα τα πακέτα που έχουν παραδοθεί και από αυτόν υπολογίζουμε σε κάθε δοκιμή και για τα 2 διαφορετικά πρωτόκολλα τα παρακάτω μεγέθη:

- ✚ Πλήθος παραδομένων πακέτων, μοναδικών πακέτων, δημιουργημένων πακέτων (σύνολο μοναδικών και αντιγράφων) και ανοιχτών (μη παραδομένων) πακέτων.
- ✚ Ποσοστό παραδομένων πακέτων σε σχέση με τα μοναδικά πακέτα.
- ✚ Το μέγιστο και ελάχιστο χρόνο παράδοσης καθώς φυσικά και το μέσο χρόνο παράδοσης όλων των (παραδομένων) πακέτων.

Αυτοί είναι οι σημαντικότεροι δείκτες απόδοσης πρωτοκόλλων δρομολόγησης, όπως αναφέρθηκαν και στην ενότητα 2.1.3. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θα παρατεθούν στη συνέχεια στην ενότητα 4.4.

4.4 Πίνακες και διαγράμματα αποτελεσμάτων

Για να μετρηθεί και να αξιολογηθεί η λειτουργία του πρωτοκόλλου Spray and Wait σε σχέση με το τροποποιημένο πρωτόκολλο Spray and Wait with AoI, τρέξαμε τον προσομοιωτή **42 φορές** για κάθε πρωτόκολλο, (δηλαδή συνολικά **84 φορές**) χρησιμοποιώντας τις παρακάτω τιμές για τις μεταβλητές παραμέτρους σε όλους σχεδόν τους δυνατούς συνδυασμούς τιμών:

- Πλήθος κόμβων (N): 50, 100, 200.
- Ακτίνα επαφής (R, Range): 50, 100, 150.
- Χρόνος προσομείωσης: 1000, 2000, 3000, 5000.
- Πλήθος μοναδικών πακέτων: 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 9000 και 10000.

Επιλέξαμε τόσο μεγάλο πλήθος δοκιμών με διαφορετικές παραμέτρους ώστε να είμαστε σίγουροι ότι τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από συγκεκριμένες συνθήκες και συνδυασμούς παραμέτρων (μεταβατικά φαινόμενα που εμφανίζονται αρχικά σε προσομοιώσεις διακριτών γεγονότων όπως η παρούσα). Κάθε μια από τις 42 δοκιμές έγινε με διαφορετικό συνδυασμό τιμών των παραπάνω παραμέτρων ίδιο όμως και για τα 2 πρωτόκολλα. Όσο μεγαλώνουν οι τιμές των παραμέτρων, κάποιοι συνδυασμοί παράγουν πολύ μεγάλο πλήθος πακέτων – περισσότερα από 50.000 πακέτα – με αποτέλεσμα ο

χρόνος προσομείωσης να υπερβαίνει τις 4 ώρες για τις συγκεκριμένες δοκιμές. Έγιναν μόνο 2 δοκιμές αυτού του μεγέθους.

Παρακάτω φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα από τις 42 δοκιμές για κάθε πρωτόκολλο:

Πίνακας 2: Πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων δοκιμών

Οι 42 δοκιμές έχουν δομηθεί με συγκεκριμένο τρόπο. Για κάθε ένα συνδυασμό των 3 βασικών παραμέτρων (πλήθος κόμβων N , ακτίνα επαφής – σύνδεσης R και χρόνος προσομείωσης), κάναμε 5 δοκιμές με διαφορετικό πλήθος μοναδικών πακέτων. Ο σκοπός είναι να εξαλειφθούν τυχαίες επιδόσεις από συγκεκριμένους συνδυασμούς τιμών. Κάτω από κάθε πεντάδα δοκιμών φαίνονται τα αντίστοιχα σύνολα και η μέση τιμή των μεγαθών (όπου αυτό είναι εφαρμόσιμο – ο ελάχιστος χρόνος παράδοσης ήταν 1 σε όλες τις δοκιμές οπότε δεν έχει νόημα ως δείκτης επίδοσης).

Παρακάτω δίνεται πίνακας αποτελεσμάτων όπου φαίνονται μόνο συνοπτικά αποτελέσματα για κάθε 5άδα δοκιμών:

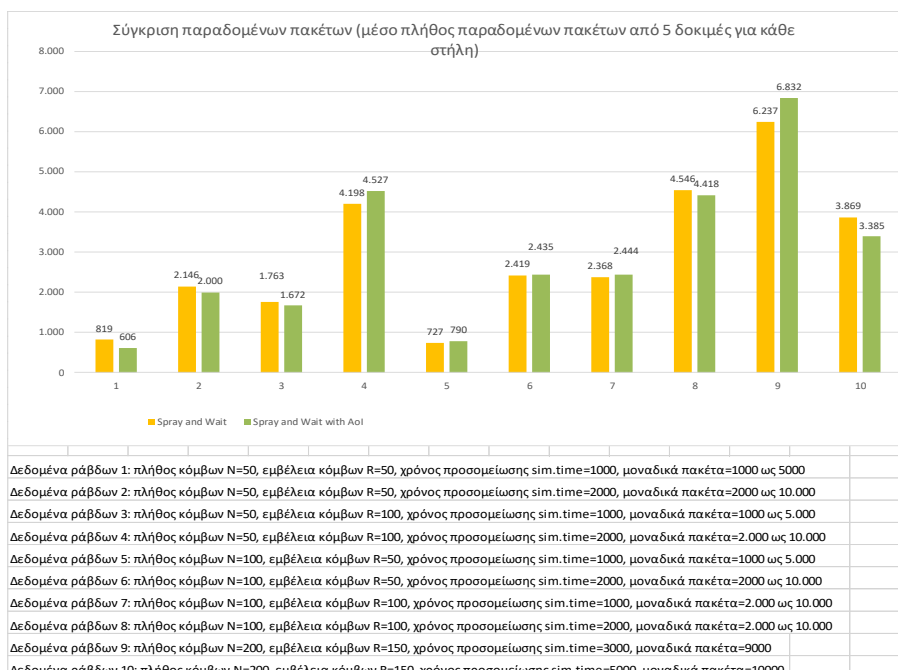
ΠΛΗΘΟΣ ΚΟΜΒΩΝ (N)	ΑΚΤΙΝΑ ΕΠΑΦΗΣ (RANGE:R)	ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗΣ (SIM.TIME)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΛΗΘΟΣ ΠΑΚΕΤΩΝ		ΠΛΗΘΟΣ ΜΟΝΑΔΙΚΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ		ΠΑΚΕΤΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΔΟΘΗΚΑΝ			ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΑΡΑΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ			ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ			ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ				
			SaW	SaW with AoI	SaW	SaW with AoI	SaW	SaW with AoI	ΔΙΑΦΟΡΑ	SaW	SaW with AoI	ΔΙΑΦΟΡΑ	SaW	SaW with AoI	ΔΙΑΦΟΡΑ	SaW	SaW with AoI	ΔΙΑΦΟΡΑ		
50	50	1.000			15.000	15.000	819	606	-26,03%	22,63%	17,05%	-5,59%	932,13	974,80	4,58%	238,74	227,58	-4,67%		
50	50	2.000			30.000	30.000	2.146	2.000	-6,78%	28,71%	26,71%	-2,00%	1938,67	1915,67	-1,19%	514,57	472,37	-8,20%		
50	100	1.000			15.000	15.000	1.763	1.672	-5,18%	48,47%	44,97%	-3,50%	959,40	941,80	-1,83%	161,55	171,85	6,38%		
50	100	2.000			30.000	30.000	4.198	4.527	7,86%	58,56%	62,18%	3,62%	1938,87	1949,47	0,55%	351,91	362,09	2,89%		
100	50	1.000			15.000	15.000	727	790	8,59%	20,26%	22,02%	1,77%	978,40	940,73	-3,85%	212,90	211,45	-0,68%		
100	50	2.000			30.000	30.000	2.419	2.435	0,64%	32,52%	33,81%	1,29%	1910,00	1957,93	2,51%	461,92	478,61	3,61%		
100	100	1.000			18.000	18.000	2.368	2.444	3,18%	45,07%	46,22%	1,16%	974,11	972,67	-0,15%	158,37	160,18	1,14%		
100	100	2.000			30.000	30.000	4.546	4.418	-2,83%	62,69%	60,80%	-1,89%	1954,80	1963,67	0,45%	348,19	353,38	1,49%		
200	150	3.000			53.448	53.355	9.000	9.000	6.237	6.832	9,54%	69,30%	75,90%	6,60%	2.952	2923	-0,98%	455,91	431,56	-5,34%
200	150	5.000			59.204	59.320	10.000	10.000	3.869	3.385	-12,51%	38,69%	33,85%	-4,84%	4.942	4.836	-2,14%	852,88	816,77	-4,23%

Πίνακας 3: Πίνακας συνοπτικών αποτελεσμάτων δοκιμών

Οι δείκτες που μετράμε στις παραπάνω 42 δοκιμές είναι οι εξής:

- Πλήθος (και ποσοστό) παραδομένων πακέτων μεταξύ των 2 πρωτοκόλλων στη διάρκεια κάθε δοκιμής με τις ίδιες φυσικά παραμέτρους.
- Μέγιστος χρόνος παράδοσης.
- Μέσος χρόνος παράδοσης.

Όπως φαίνεται στα αναλυτικά αποτελέσματα, η επίδοση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου Spray and Wait with Age Of Information δεν είναι σε όλες τις περιπτώσεις καλύτερη από το αρχικό πρωτόκολλο. Αυτό δεν είναι απαραίτητα αρνητικό αποτέλεσμα. Εξαρτάται πάντα από τις ιδιαίτερες συνθήκες και απαιτήσεις στις οποίες καλείται να λειτουργήσει κάθε πρωτόκολλο. Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε γραφήματα στα οποία είναι πιο κατανοητή η σύγκριση μεταξύ των 2 πρωτοκόλλων

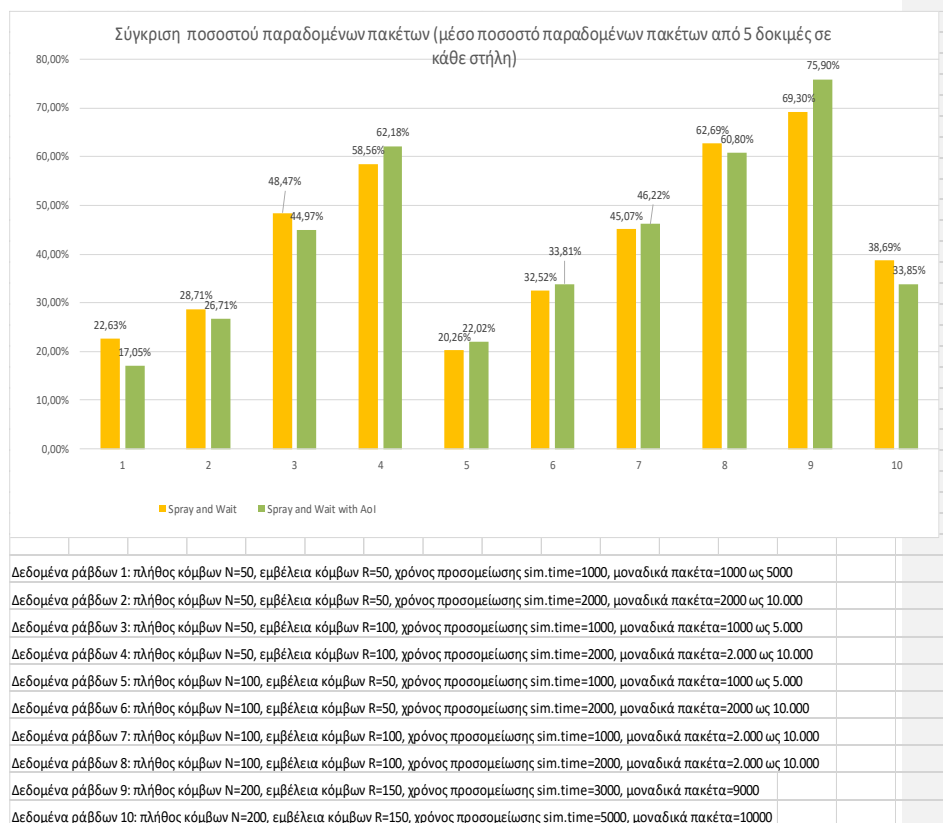


Εικόνα 11: Σύγκριση μέσου πλήθους παραδομένων πακέτων

Στο παραπάνω γράφημα (εικόνα 11) απεικονίζεται η σύγκριση μόνο του **μέσου πλήθους (μοναδικών) παραδομένων πακέτων** όπως αυτά αναλυτικά αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακα 3 (πίνακας συνοπτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη στήλη Πλήθος παραδομένων πακέτων. Σημειώνεται ότι το μέσο πλήθος αναφέρεται στο πλήθος των 5 δοκιμών με τις ίδιες παραμέτρους (πλήθος κόμβων, εμβέλεια κόμβων, χρόνος προσομοίωσης) και 5 διαφορετικά μεγέθη για το πλήθος πακέτων (1.000 ως 10.000 μοναδικά πακέτα). Παρατηρούμε ότι όσο το δίκτυο γίνεται πυκνότερο και συνεκτικότερο (πλήθος κόμβων $N=100$, εμβέλεια $R=100$), βελτιώνεται η επίδοση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου. Αυτό όμως δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.

Στο επόμενο γράφημα (εικόνα 12) απεικονίζεται η σύγκριση μόνο του **μέσου ποσοστού παραδομένων (μοναδικών) πακέτων** όπως αυτά αναλυτικά αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακα 3 (πίνακας συνοπτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη στήλη Ποσοστό παραδομένων πακέτων. Εφόσον τα 2 μεγέθη (πλήθος και ποσοστό) έχουν άμεση συσχέτιση, ισχύει η ίδια παρατήρηση ότι όσο το δίκτυο γίνεται πυκνότερο και συνεκτικότερο (πλήθος κόμβων $N=100$, εμβέλεια $R=100$), βελτιώνεται η επίδοση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου (όχι σε όλες τις περιπτώσεις).

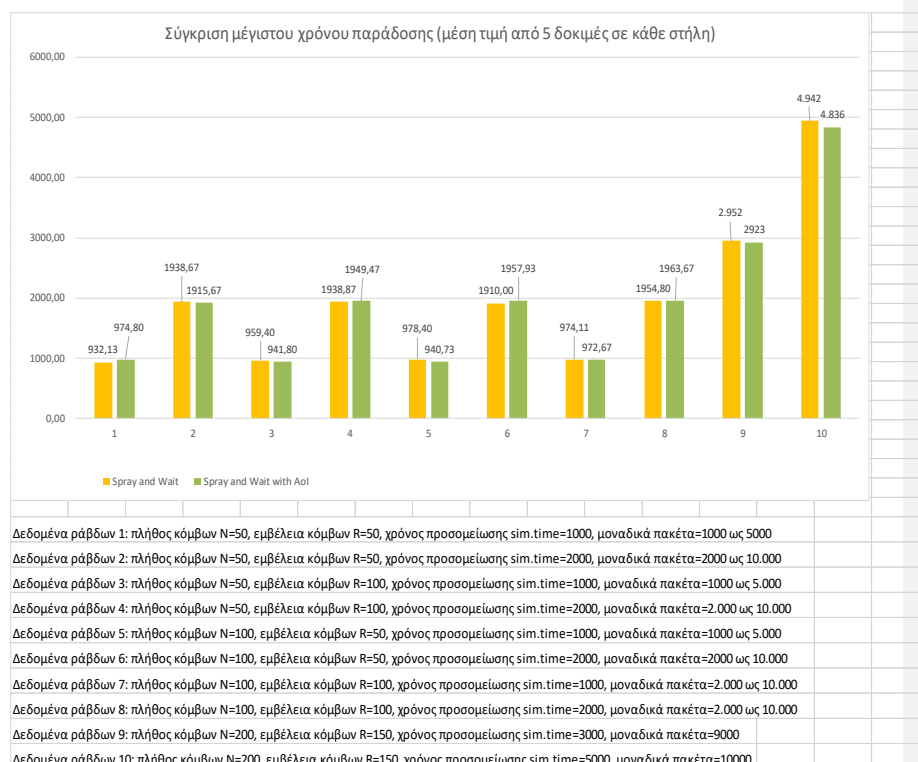
Να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί στα 2 παραπάνω μεγέθη γίνονται στη βάση των μοναδικών πακέτων που παράγονται στη διάρκεια της δοκιμής (στήλη Πλήθος μοναδικών πακέτων των πινάκων 2 και 3) και όχι του συνολικού πλήθους πακέτων στα οποία περιέχονται και τα αντίγραφα που παράγονται (στήλη Συνολικό πλήθος πακέτων των πινάκων 2 και 3). Επίσης, όπως αναφέρεται παραπάνω, οι μέσες τιμές αναφέρονται στις 5 δοκιμές για κάθε ένα συνδυασμό των 3 βασικών παραμέτρων (πλήθος κόμβων N , ακτίνα επαφής – σύνδεσης R και χρόνος προσομοίωσης) με διαφορετικό πλήθος μοναδικών πακέτων (1000 – 10.000 μοναδικά πακέτα).



Εικόνα 12: Σύγκριση μέσου ποσοστού παραδομένων πακέτων

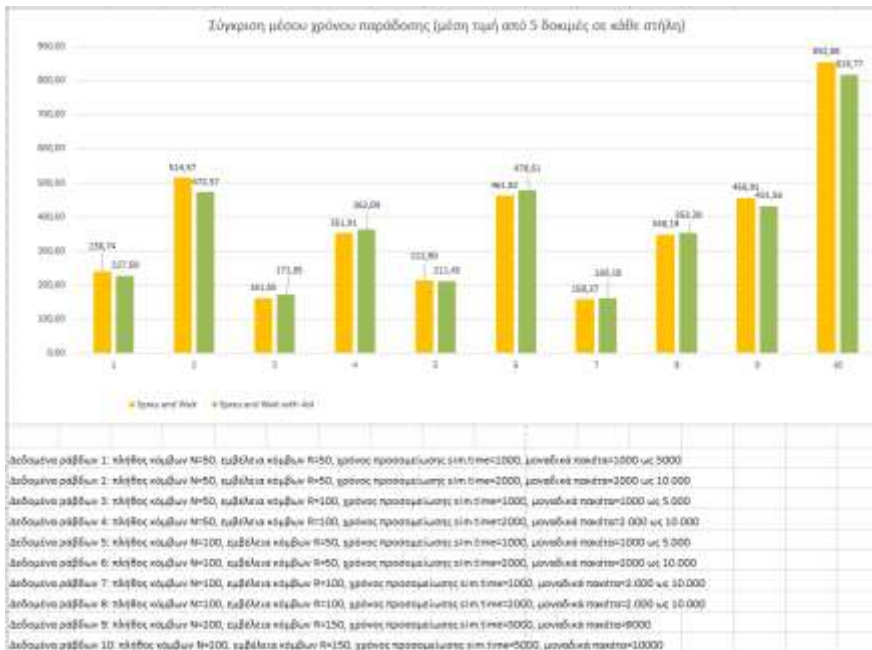
Στο επόμενο γράφημα (εικόνα 13) απεικονίζεται η σύγκριση μόνο του **μέγιστου χρόνου παράδοσης των παραδομένων (μοναδικών) πακέτων** όπως αναλυτικά αναφέρεται στον παραπάνω Πίνακα 3 (πίνακας συνοπτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη στήλη Μέγιστος χρόνος παράδοσης. Παρατηρούμε και εδώ ότι στις περισσότερες

περιπτώσεις (και στις 2 τελευταίες μεγάλες δοκιμές στις ράβδους 9 και 10) η επίδοση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου είναι γενικά καλύτερη από αυτή του αρχικού. Όμως και πάλι αυτό δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.



Εικόνα 13: Σύγκριση μέγιστου χρόνου παράδοσης

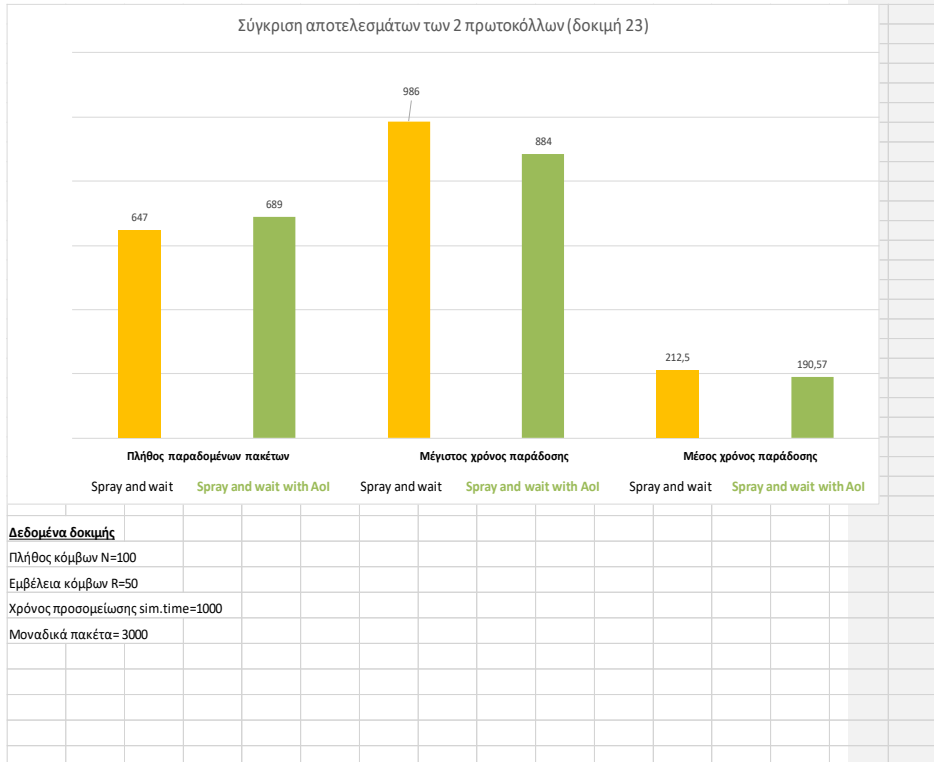
Στο επόμενο γράφημα (εικόνα 14) απεικονίζεται η σύγκριση μόνο του μέσου χρόνου παράδοσης των παραδομένων (μοναδικών) πακέτων όπως αναλυτικά αναφέρεται στον παραπάνω Πίνακα 3 (πίνακας συνοπτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη στήλη Μέσος χρόνος παράδοσης. Παρατηρούμε ότι στις 2 τελευταίες μεγάλες δοκιμές στις ράβδους 9 και 10) η επίδοση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου είναι γενικά καλύτερη από αυτή του αρχικού. Όμως και πάλι αυτό δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.



Εικόνα 14: Σύγκριση μέσου χρόνου παράδοσης

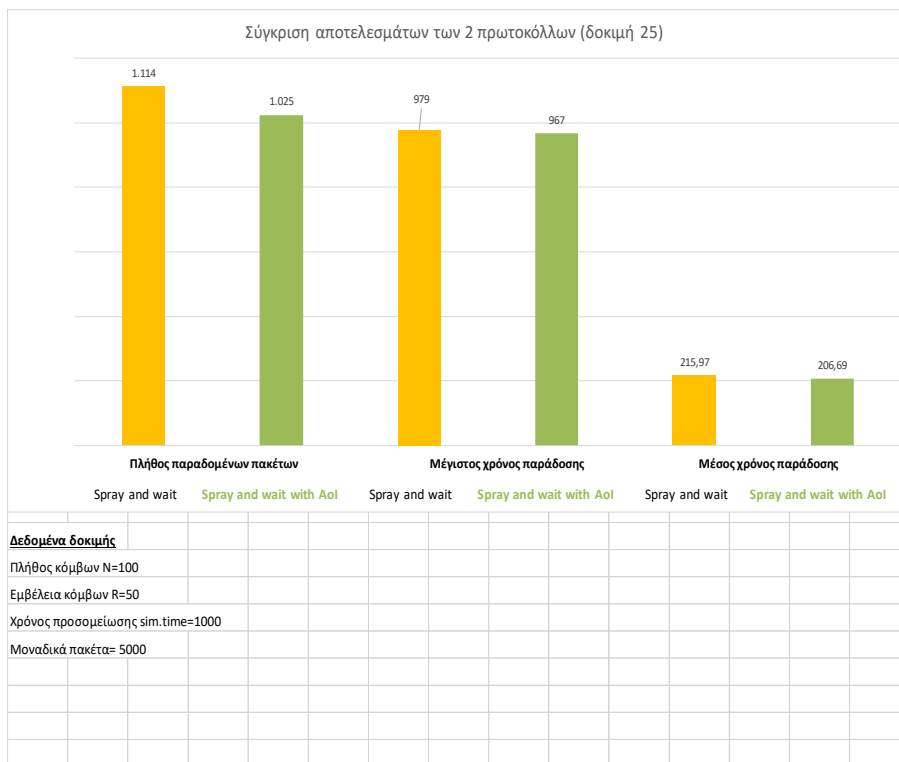
Τα παραπάνω 4 γραφήματα απεικονίζουν συνοπτικά τη σύγκριση μεταξύ των 2 πρωτοκόλλων αναφορικά με τους 4 βασικούς δείκτες λειτουργίας (πλήθος και ποσοστό παράδοσης πακέτων, μέσος και μέγιστος χρόνος παράδοσης πακέτων). Παρακάτω όμως θα παραθέσουμε μερικά ακόμα γραφήματα που απεικονίζουν τη σύγκριση απόδοσης των 2 πρωτοκόλλων σε μερικές αντιπροσωπευτικές δοκιμές, από τις συνολικά 42 που πραγματοποιήσαμε και αναφέρονται αναλυτικά στον παραπάνω πίνακα 2.

Στο επόμενο γράφημα (εικόνα 15) απεικονίζεται η σύγκριση των χαρακτηριστικών δεικτών απόδοσης (πλήθος παράδομένων πακέτων, μέσος και μέγιστος χρόνος παράδοσης πακέτων) όπως αναλυτικά αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακα 2 (πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη δοκιμή με αριθμό 23. Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη δοκιμή, η επίδοση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου είναι καλύτερη από αυτή του αρχικού και στους 3 σχετικούς δείκτες.



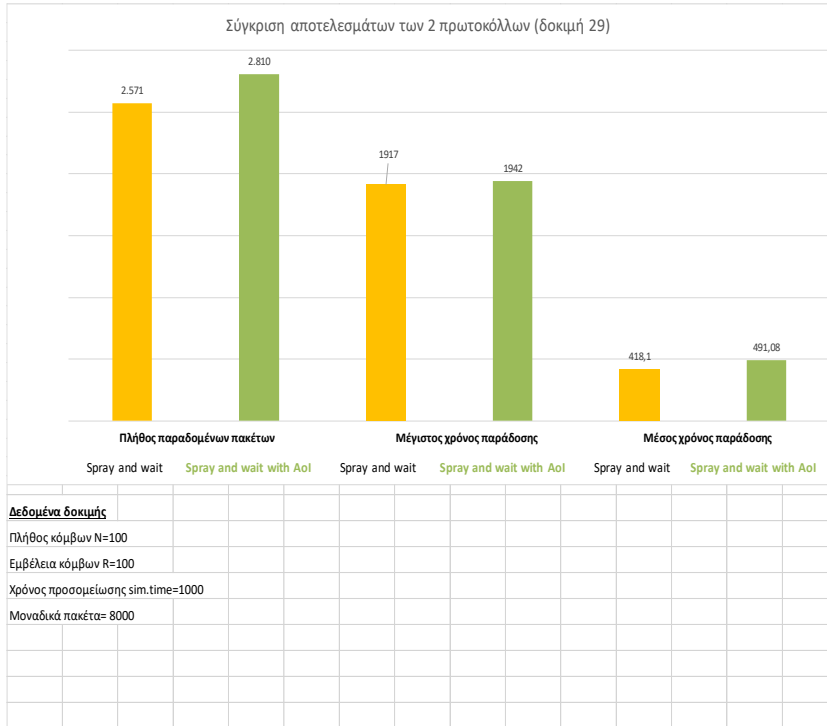
Εικόνα 15: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 23)

Στο επόμενο γράφημα (εικόνα 16) απεικονίζεται η σύγκριση των χαρακτηριστικών δεικτών απόδοσης (πλήθος παραδομένων πακέτων, μέσος και μέγιστος χρόνος παράδοσης πακέτων) όπως αναλυτικά αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακα 2 (πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη δοκιμή με αριθμό 25. Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη δοκιμή, το αρχικό πρωτόκολλο έχει περισσότερα παραδομένα πακέτα, όμως το τροποποιημένο πρωτόκολλο έχει καλύτερη επίδοση στο μέγιστο χρόνο παράδοσης και στο μέσο χρόνο παράδοσης πακέτων – μηνυμάτων.



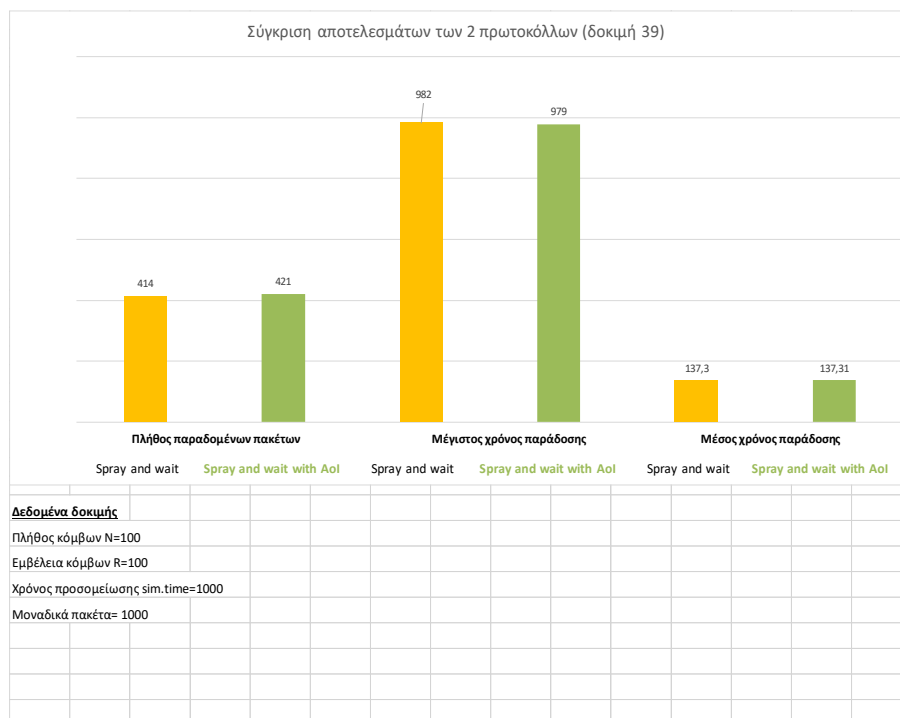
Εικόνα 16: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 25)

Στο επόμενο γράφημα (εικόνα 17) απεικονίζεται η σύγκριση των χαρακτηριστικών δεικτών απόδοσης (πλήθος παραδομένων πακέτων, μέσος και μέγιστος χρόνος παράδοσης πακέτων) όπως αναλυτικά αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακα 2 (πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη δοκιμή με αριθμό 29. Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη δοκιμή, το τροποποιημένο πρωτόκολλο έχει περισσότερα παραδομένα πακέτα, όμως το αρχικό πρωτόκολλο έχει καλύτερη επίδοση στο μέγιστο χρόνο παράδοσης και στο μέσο χρόνο παράδοσης πακέτων – μηνυμάτων.



Εικόνα 17: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 29)

Στο επόμενο γράφημα (εικόνα 18) απεικονίζεται η σύγκριση των χαρακτηριστικών δεικτών απόδοσης (πλήθος παραδομένων πακέτων, μέσος και μέγιστος χρόνος παράδοσης πακέτων) όπως αναλυτικά αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακα 2 (πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη δοκιμή με αριθμό 39. Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη δοκιμή, το τροποποιημένο πρωτόκολλο έχει περισσότερα παραδομένα πακέτα και καλύτερη επίδοση στο μέγιστο χρόνο παράδοσης όμως στο μέσο χρόνο παράδοσης πακέτων – μηνυμάτων οι επιδόσεις και των 2 πρωτοκόλλων είναι σχεδόν ίδιες.



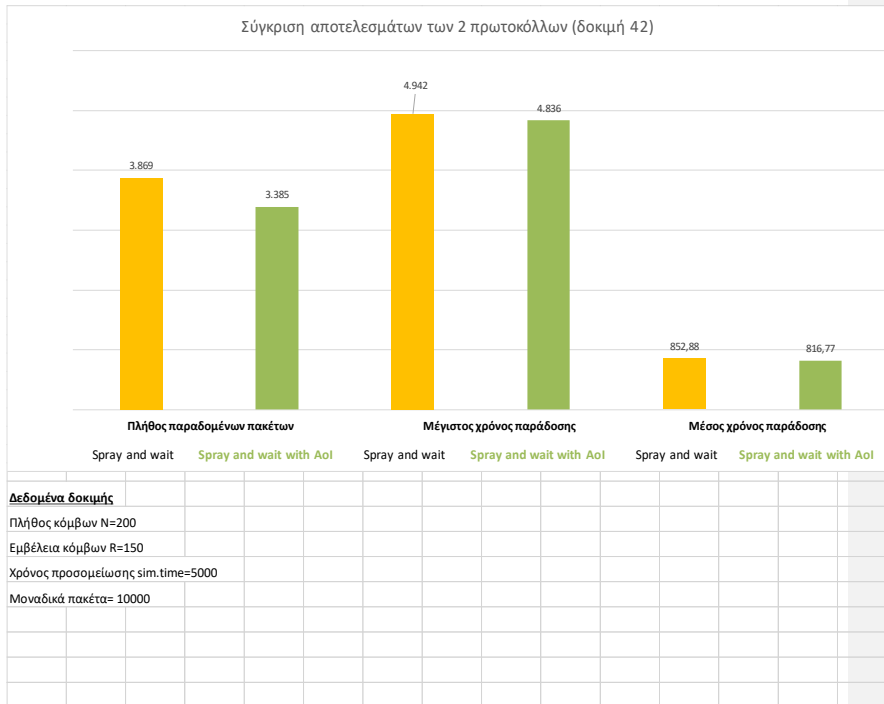
Εικόνα 18: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 39)

Στο επόμενο γράφημα (εικόνα 19) απεικονίζεται η σύγκριση των χαρακτηριστικών δεικτών απόδοσης (πλήθος παραδομένων πακέτων, μέσος και μέγιστος χρόνος παράδοσης πακέτων) όπως αναλυτικά αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακα 2 (πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη δοκιμή με αριθμό 41–η πρώτη από τις 2 μεγάλες δοκιμές. Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη δοκιμή, Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη δοκιμή, η επίδοση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου είναι καλύτερη από αυτή του αρχικού και στους 3 σχετικούς δείκτες.



Εικόνα 19: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 41)

Στο τελευταίο γράφημα που θα παρουσιάσουμε (εικόνα 20) απεικονίζεται η σύγκριση των χαρακτηριστικών δεικτών απόδοσης (πλήθος παραδομένων πακέτων, μέσος και μέγιστος χρόνος παράδοσης πακέτων) όπως αναλυτικά αναφέρονται στον παραπάνω Πίνακα 2 (πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων δοκιμών) στη δοκιμή με αριθμό 42–η τελευταία και μεγαλύτερη δοκιμή. Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη δοκιμή (όπως και στην παραπάνω δοκιμή με αριθμό 25), το αρχικό πρωτόκολλο έχει περισσότερα παραδομένα πακέτα, όμως το τροποποιημένο πρωτόκολλο έχει καλύτερη επίδοση στο μέγιστο χρόνο παράδοσης και στο μέσο χρόνο παράδοσης πακέτων – μηνυμάτων.



Εικόνα 20: Σύγκριση δεικτών απόδοσης (δοκιμή 42)

5. Μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις της παρούσας εργασίας

Στην εργασία αυτή εργαστήκαμε με πρωτόκολλα δρομολόγησης σε ανεκτικά στην καθυστέρηση δίκτυα. (Delay Tolerant Networks). Αγνοήσαμε όμως κάποια χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών προκειμένου να κάνουμε απλούστερη την υλοποίηση των δοκιμών.

- Θεωρήσαμε ότι οι κόμβοι έχουν απεριόριστο χώρο αποθήκευσης και απεριόριστη διαθέσιμη ενέργεια. Στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει. Ένα από τα χαρακτηριστικά στοιχεία των κόμβων που συνθέτουν αυτά τα δίκτυα (όπως αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.1.1), είναι ότι οι κόμβοι συχνά έχουν περιορισμένο χώρο αποθήκευσης και περιορισμένο χρόνο ζωής της μπαταρίας προκειμένου να επιτευχθεί μικρότερο βάρος ή/ και όγκος.
- Στην προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο κινητικότητας Random Waypoint το οποίο υποθέτει εντελώς τυχαία κίνηση. Υπάρχουν όμως αρκετά ακόμα μοντέλα κινητικότητας (random walk, street random waypoint, Manhattan mobility model, freeway mobility model και άλλα). Τα μοντέλα αυτά έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά (στοχαστικά μοντέλα, αναλυτικά μοντέλα για προσομοίωση συγκεκριμένων σεναρίων και υβριδικά μοντέλα) και προορίζονται για διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης κινητικότητας (κίνηση πεζών σε αστικό περιβάλλον, κίνηση οχημάτων σε δρόμο κλπ) (Bai et al, 2012, Vasanthi et al, 2012).
- Θα είχε ενδιαφέρον μια δοκιμή με κάποιο από τα παραπάνω περισσότερο ρεαλιστικά μοντέλα κινητικότητας, όπως αυτά που ταιριάζουν σε ανθρώπινες συμπεριφορές ή μοντέλα κινητικότητας άγριων ζώων.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Abraham, A. (2012) Routing strategies in DelayTolerant Networks: a Survey
- Angelakis, V., Gazoni, N., Yuan, D., (2012) Probabilistic routing in opportunistic ad hoc networks
- Bai, F., Helmy, A., (2012) A survey of mobility models in wireless adhoc networks
- Balasubramanian, A., Levine, B.N., Venkataramani, A., (2007) DTN Routing as a Resource Allocation Problem
- Balasubramanian, A., Levine, B.N., Venkataramani, A., (2010) Replication Routing in DTNs: A Resource Allocation Approach
- Benhamida, F., Bouabdellah, A., Challal, Y., (2017) Using delay tolerant network for the Internet of Things: Opportunities and challenges
- Bertsekas D., Gallager R., (1992) Data Networks
- Burgess, J., Gallagher, B., Jensen, D., Levine, B., (2006) MaxProp Routing for Vehicle-Based Disruption-tolerant Networks
- Burns, B., Brock, O., Levine, B., (2005) MV Routing and Capacity Building in Disruption Tolerant Networks
- Cao, Y., Sun, Z., (2013) Routing in Delay/Disruption Tolerant Networks: A Taxonomy, Survey and Challenges
- Cerf, V. et al (2007) Delay-Tolerant Networking Architecture (RFC 4838)
- Costa, M., Codreanu, M., Ephremidis, A., (2016) On the Age of Information in Status Update Systems With Packet Management
- D'Souza, R., Jose, J., (2010) Routing protocols in delay tolerant networks: A comparative survey
- Demmer, M., Fall, K., (2007) DTLSR: Delay Tolerant Routing for Developing Regions
- Dubois – Ferriere, H., Grossglauser, M., Vetterli, M., (2003) Efficient Route Discovery in Mobile Ad Hoc Networks Using Encounter Ages

- Fall, K. (2003) A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets
- Fatimah, A., Johari, R., (2016) Delay tolerant network: Routing issues and performance
- Ferriere, H., Grosglauer, M., Vetterli, M., (2003) Age matters: Efficient route discovery in mobile ad hoc networks using encounter ages
- Filho, J., Patel, A., Batista, B., Celestino, J., (2016) A systematic technical survey of DTN and VDTN routing protocols
- Henriksson, D., Abdelzaher, T., Ganti, R., (2007) A Caching-Based Approach to Routing in Delay-Tolerant Networks
- Hui, P., Crowcroft, J., Yoneki, E., (2011) BUBBLE Rap: Social-based Forwarding in Delay Tolerant Networks
- Jain, S., Fall, K., Patra, R., (2004) Routing in a delay tolerant network
- Jones, E., Ward, P., (2011) Routing Strategies for Delay-Tolerant Networks
- Kallitsis, G., Karyotis, V., Papavassiliou, S., (2022) On the Potential of Enhancing Delay-Tolerant Routing Protocols via Age of Information.
- Kaul, S., Gruteser, M., Rai, V., Kenney, J., (2011) Minimizing age of information in vehicular networks
- Kaul, S., Yates, R., Gruteser, M., (2012) Real-Time Status: How Often Should One Update
- Khabbaz, M., Assi, C., Fawaz, W. (2011) Disruption-tolerant networking A comprehensive survey on recent developments and persisting challenges
- Kosta, A., Pappas, N., Angelakis, V., (2017) Age of Information: A New Concept, Metric, and Tool
- Lee, U., Young Oh, S., Lee, K., Gerla, M., (2008) RelayCast: Scalable Multicast Routing in Delay Tolerant Networks
- Li, Y., Cheng, X., Liu, Q., You, X., (2010) A Novel Congestion Control Strategy in Delay Tolerant Networks
- Li, Z., Shen, H., (2013) SEDUM: Exploiting Social Networks in Utility-Based Distributed Routing for DTNs

- Lin, C.S., Chang, W.S., Chen, L.J., Chou, C.F., (2008) Performance Study of Routing Schemes in DTN
- Lindgren, A., Doria, A., Schelen, O., (2003) Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks
- Liu, C., Wu, J., (2007) Scalable Routing in Delay Tolerant Networks
- Mao, Y., Zhou, C., Ling, Y., Lloret, J., (2019) An Optimized Probabilistic Delay Tolerant Network (DTN) Routing Protocol Based on Scheduling Mechanism for Internet of Things (IoT)
- Musolesi, M., Mascolo, C., (2008) Car: Context-aware adaptive routing for delay-tolerant mobile networks
- NASA, (2003) Delay-Tolerant Networking
- Nelson, S., Bahkt, M., Kravets R., (2009) Encounter-Based Routing in DTNs
- Oliveira, E., Albuquerque, C., (2009) Nectar: A DTN routing protocol based on neighborhood contact history
- Puri, P., Singh, M., (2013) A survey paper on routing in delay-tolerant networks
- Rahman, R., Frater, M., (2015) Delay-tolerant networks (DTNs) for underwater communications
- Shen, J., Sangman, M., Chung, I., (2008) Routing protocols in delay tolerant networks: A comparative survey
- Spyropoulos, T., Psounis, K., Raghavendra, C., (2005) Spray and Wait: An Efficient Routing scheme for Intermittently Connected mobile networks
- Spyropoulos, T., Psounis, K., Raghavendra, C., (2008) Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The single-copy case
- Spyropoulos, T., Psounis, K., Raghavendra, C., (2008) Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case
- Stallings, W., (2007) Data and Computer Communications
- Tovar, A., Friesen, T., Ferens, K., Mcleod, B., (2010) A DTN wireless sensor network for wildlife habitat monitoring

- Uddin, Y., Ahmadi, H., Abdelzaher, T., Kravets, R., (2013) Intercontact routing for energy constrained disaster response networks
- Vahdat, A., Becker, D., (2000) Epidemic routing for partially connected ad hoc networks
- Vasanthi, V., Hemalatha, M., (2012) Simulation and Evaluation of Different Mobility Models in Ad-Hoc Sensor Network over DSR Protocol Using Bonnmotion Tool
- Verma, A., Savita, Kumar, S., (2020) Routing Protocols in Delay Tolerant Networks: Comparative and Empirical Analysis
- Wong, K., Wan, T., (2017) Reliable Multicast Disruption Tolerant Networking: Conceptual Implementation Using Message Ferry
- Xue, J., Li, J., Cao, Y., Fang, J., (2009) Advanced PROPHET Routing in Delay Tolerant Networks
- Yuan, Q., Cardei, I., Wu, J., (2009) Predict and relay: an efficient routing in disruption tolerant networks
- Zhang, J., Wang, G., Liu, C., Zhao, F., Zhang, X. (2018) Delay Tolerant Network and the Algorithms of DTN routing
- Zhang, Z. (2006) Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks

Παράρτημα Α: Κώδικας προσομοιωτή

Κώδικας προσομοιωτή αρχικού πρωτοκόλλου Spray and Wait (SaW)

```
% SIMULATOR FOR Spray and Wait DTN PROTOCOL
clear all;
% SIMULATION PARAMETERS
N=100; % number of network nodes
L=1000; % side of square network area
R=50; % radio range
T=10; % the maximum value of TTL
M=10000; % παράμετρος που ορίζει το Μέγιστο
μέγεθος του πίνακα πακέτων
sim_time=2000; % παράμετρος που ορίζει τη χρονική
διάρκεια κάθε δοκιμής
K = 5; % παράμετρος που ορίζει πόσα πακέτα
δημιουργούνται στη μονάδα του χρόνου (ies)
imm=0.8; % παράμετρος κίνησης, όσο μεγαλύτερη,
μεγαλύτερη κινητικότητα
MC = 5; % παραμετρος που οριζει το
μεγιστοπληθοςαντιγραφων ενός μηνυματος στο δικτιο (MaxCopies)

% Node location initialization in the LxLnetwork area
coordinateMatrix=rand(N,2)*L; %Table Nx2 that stores the initial
location of nodes. The output of rand function is in [0,1].
[adjacencyMatrix,nodeDegree]=FindTopology(coordinateMatrix,N,R);

%Topology plot
% topology=newplot; %start a new figure diagram for the
topology
% hold on;
% for k=1:N
%
plot(coordinateMatrix(k,1),coordinateMatrix(k,2),'s','MarkerSize',
3,'MarkerFaceColor','b');
% end
% grid on;
% gplot(adjacencyMatrix,coordinateMatrix);

% Main simulation loop for time=sim_time

pkt = zeros(M, 10); % δημιουργώ πίνακα που θα περιέχει M
πακέτα που δημιουργούνται, αρχικαγεματος με 0
pkt_copies = zeros(8*M, 4); % δημιουργώ πίνακα που θα περιέχει
το πλήθος αντιγράφων που έχουν ως τώρα μεταδοθεί
% για κάθε διαφορετικό μήνυμα, αρχικαγεματος με 0
pn = 5; %randi([1 K],1,1); % σε κάθε μονάδα χρόνου επιλέγω
τυχαία πόσα πακέτα θα δημιουργηθούν, 1 ως K, racketnumber
PC= 1; % μεταβλητη που δειχνει σε ποιο σημειο
του πινακαpkt θα πρέπει να γίνει εισαγωγή πακέτου, PacketCounter
UP=0; % μεταβλητη που μετρά μοναδικά πακετα,
UniquePackets
```

```

for time= 1: sim_time                % main simulation loop

    %Packets creation

    for p = 1: pn                      % loop
    πουδημιουργείsim_time * pnπακέτα (σεκαθε loop
    δημιουργούνταιipnπακέτα)
    pkt(PC,1) = PC;                    % πεδίο Id Packet Counter
    pkt(PC,2) = randi([1 N],1,1);      % τυχαία επιλογή του κόμβου πηγή
    (SourcenodeId)
    pkt(PC,3) = randi([1 N],1,1);      % τυχαία επιλογή του κόμβου
    προορισμού (DestinationnodeId)
    pkt(PC,4) = pkt(PC,2);             % ο τρέχων κόμβος (cuId) είναι ο
    κόμβος πηγή
    pkt(PC,5) = time;                  % η ώρα δημιουργίας του πακέτου
    %pkt(PC,6) = T;                    % η παράμετρος TTL θα
    παίρνει αρχικατιμη T= max TTL
    pkt(PC,7) = 0;                     % αρχικά η ώρα παράδοσης τίθεται
    =0
    pkt(PC,8) = 0;                     % status, 0:created, 1:transfer,
    2: delivered, 3: deleted
    %pkt(PC,9) = 0;                    % πληθος κόμβων που διένυσε το
    πακέτο, αρχικά = 0
    pkt(PC,10)= 0;                     % ώρα διαγραφης, αρχικά τίθεται
    =0
    pkt_copies(PC,1) = PC;             % η πρωτηστηλη του
    πινακαpkt_copies θα ειναιση με το πεδίο Id
    pkt_copies(PC,2) = 0;              % η 2η στηλη του
    πινακαpkt_copies, αρχικά = 0
    pkt_copies(PC,3) = T;              % η παράμετρος TTL θα παίρνει
    αρχικατιμη T= max TTL
    pkt_copies(PC,4) = 0;              % πληθος κόμβων που διένυσε το
    πακέτο, αρχικά = 0
    PC= PC +1;                         % δειχνει στην
    επομενηγραμμη του πινακαpkt
    UP= UP+1                            % μετραμε μοναδικα πακετα

end

%Pkt= table(pkt.Id 1, pkt.scId 2, pkt.deId 3 , pkt.cuId 4,
pkt.crTime 5, pkt.pkt.TTL 6, pkt.delTime 7,
%pkt.status 8, pkt.trNodes 9, pkt.erTime 10, pkt.relays 11)

%Node movement

forcurNode= 1:N                      % διατρέχωτουςNκόμβους,
curNodeειναιιοτρεχονκομβος
c= rand;                              % επιλέγω τυχαίο αριθμό c (0 ως 1)
if c <imm                             % αν ο τυχαίος c είναι< από τη
σταθεραακινησιας, ο κόμβος κινείταιαλλιως επόμενος κομβοςcurNode
slope = rand*360;                     % επιλέγω τυχαία κατεύθυνση
v = rand*10;                          % επιλεγωτυχαίαταχυτητα
dist= v*1;                             % υπολογιζω την αποσταση που διενυσε ο κομβος
σε μια χρονοθυρίδα

```

```
newx = coordinateMatrix(curNode,1) + dist*cos(slope); % Η
νεασυντ/νη χ θα είναι η προηγούμενη +
% + απόσταση * cos(γωνίας)
ifnewx>L
newx = L-(newx-L); % αν η νεασυντ/νη χ είναι > L, τότε ο
κομβοςγυρναπισωκαταnewx-L
end
coordinateMatrix(curNode,1)= newx; % η νεασυντ/νη χ αποθηκευεται
στον πίνακα

newy = coordinateMatrix(curNode,2) + dist*sin(slope); % Η
νεασυντ/νη γ θα είναι η προηγούμενη +
% + απόσταση * sin(γωνίας)
ifnewy>L
newy = L-(newy-L); % αν η συντ/νη γ είναι > L, τότε ο
κομβοςγυρναπισωκαταnewy-L
end
coordinateMatrix(curNode,2)= newy; % η νεασυντ/νη γ αποθηκευεται
στον πίνακα
end
end

[adjacencyMatrix,nodeDegree]=FindTopology(coordinateMatrix,N,R); %
εδώ υπολογίζονται ξανά οι κόμβοι που είναι σε σύνδεση
% από το πεδίο nodeDegree, if nodeDegree >= 1 then node in connection
with (nodeDegree) nodes

% μηδενισμος της διαγωνίου του adjacencyMatrix, ωστε να εχει 0
στη διαγωνιο
for z= 1:N % διατρέχω τον πίνακα adjacencyMatrix και θετω 0
στη διαγωνιο
adjacencyMatrix(z,z)=0;

end

% routing operation - packet exchange

for movNode = 1:N % movNode: κομβος που κινήθηκε στο τμήμα
Node movement, διατρέχω όλους τους N κομβους

if nodeDegree(movNode) >= 1 %
An ο κομβος movNode είναι σε σύνδεση με nodeDegree κομβους

for conNode = 1: N %
διατρέχω τον adjacency matrix στη γραμμή movNode από 1..N και ψαχνο να βρω
1, δηλ. κομβο σε επαφή

if adjacencyMatrix(movNode,conNode) == 1 %
ανοι κομβοι conNode, movNode είναι σε επαφή

PC1=PC-1;
```



```

for curPktrow = 1: PC1 %
διατρέχω τον πίνακα pkt (που έχει μέγεθος PC-1 ως τώρα) στη στήλη 4
για να βρω πακέτα, curPktrow είναι Id πακέτου - γραμμή στο pkt
% με pkt(curPktrow,4) = monNode δηλ. να βρω αν υπάρχει πακέτο που
είναι αποθηκευμένο στον κομβο monNode

%debug1= pkt(curPktrow,4);

if pkt(curPktrow,4) == monNode % θα μπει στο
ίφ μόνο αν βρεθεί πακέτο στον κομβο monNode

if pkt(curPktrow,3) == conNode % δηλ. αν ο conNode
είναι ο κομβός - προορισμός, παραδίδω το πακέτο
pkt(curPktrow,4) = conNode; % ο τρέχον κομβός είναι ο
conNode
pkt(curPktrow,7) = time; % ο χρόνος παραδοσης είναι ο
τρέχον χρόνος
pkt(curPktrow,8) = 2; % status = delivered
%pkt(curPktrow,9)=
pkt(curPktrow,9)+1; % πλήθος κομβών που διένυσε το πακέτο
pkt_copies(pkt(curPktrow,1),2) = pkt_copies(pkt(curPktrow,1),2)
+1; % πλήθος κομβών που διένυσε το πακέτο
end

%debug2=pkt_copies(pkt(curPktrow,1),2); %copies του πακέτου
στη γραμμή curPktrow
if pkt_copies(pkt(curPktrow,1),2) < MC && pkt(curPktrow,8)~= 2
% pkt(curPktrow,1)= Id πακέτου
%αν το τρέχον πακέτο δεν έχει
ηδη μεταδοθεί σε MC κομβούς και δεν παραδόθηκε στο προηγ/νο if
%εδώ υλοποιείται το
πρωτοκόλλο Spray and wait
found=0; % αρχή της μεταβλητής που
δηλώνει ότι βρέθηκε το πακέτο στο συνδ/νο κομβο conNode
for d=1: PC-1 %
διατρέχω τον πίνακα pkt για να βρω αν το πακέτο με Id =
curPktrow υπάρχει ηδη στον κομβο conNode

%debug3= pkt(curPktrow,1);

%debug4= pkt(d,4);

if pkt(d,1)== pkt(curPktrow,1)
&& pkt(d,4) == conNode % pkt(curPktrow,1)= Id πακέτου
% δηλ. αν το πακέτο υπάρχει ηδη στον κομβο conNode με τον οποίο ο
κομβός monNode είναι σε σύνδεση
found=1; % εδώ χρησιμοποιώ τη μεταβλητή found=1 που
δηλώνει ότι βρέθηκε το πακέτο με Id=curPktrow στον κομβο conNode
break;

end
end

% αλλιώς εισάγω ενα αντιγραφο του
πακέτου curPktrow στον κομβο conNode, γράφω

```

```

% στη γραμμη PC του πινακαpkt
iffound~=1 % αν το πακετο με Id=curPktrow δε
βρεθηκε στον κομβοconNode, εισαγω νέο αντιγραφο στον πινακαpkt
pkt(PC,1) = pkt(curPktrow,1); % πεδίο Ιδιδιο με το αρχικό
pkt(PC,2) = pkt(curPktrow,2); % ο κομβος πηγής του αρχικού
πακέτου (SourcenodeId)
pkt(PC,3) = pkt(curPktrow,3); % ο κόμβος προορισμός του
αρχικού πακέτου (DestinationnodeId)
pkt(PC,4) = conNode; % ο τρέχων κόμβος (cuId) είναι
ο κόμβος σε επαφηconNode
pkt(PC,5) = pkt(curPktrow,5); % η ώρα δημιουργίας του
αρχικού πακέτου
pkt(PC,7) = 0; % η ώρα παράδοσης παραμένει =0
pkt(PC,8) = 1; % status, 1:transfer
%pkt(PC,9) = pkt(curPktrow,9)
+ 1; % πληθος κόμβων που διένυσε το πακέτο, αρκικά = 0
pkt(PC,10)= 0; % ώρα διαγραφης, παραμένει =0
pkt_copies(pkt(curPktrow,1),3) = pkt_copies(pkt(curPktrow,1),3) -
1; % pkt(curPktrow,1)=Idπακετου, η παράμετρος TTL -1
ifpkt_copies(pkt(curPktrow,1),3)== 0 % αν η παράμετρος TTL γίνεται
0, το πακετοδιαγραφεται
pkt(PC,8)=3; % status=3:deleted
pkt(PC,10)= time; % ώρα διαγραφης = time,
τρεχουσαωρα
end
pkt_copies(pkt(curPktrow,1),2) = pkt_copies(pkt(curPktrow,1),2)
+1; % η στηλη που μετρά τα αντίγραφα του πακετουcurPktrowγινεται
+1
PC=PC+1;
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end

% Υπολογισμοσδεικτων

% υπολογισμοσdeliveredπακετων
DP=0; % μεταβλητη που μετρα τα παραδομεναπακετα, αρχικα =0
for cd = 1: PC-1 % countdelivered, διατρεχω τον πινακαpkt για να
βρω πακετα με status =2
if pkt(cd,8) ==2
DP=DP +1;
end
end
end
GP = PC - 1; % Generated packets στη διαρκεια της δοκιμης
OP = PC-1 - DP; % Open (not delivered) packets στη διαρκεια
της δοκιμης
SP = DP/OP; % ποσοστο παραδομενων πακετων στη διαρκεια της
δοκιμης

```

```
% υπολογισμος χρονων παραδοσης
pkt_time = zeros(10*M, 4); % δημιουργώ πίνακα που θα περιέχει το
Id κάθε πακετου, την ωρα δημιουργιας και
% παραδοσηςκαθως και τη διαφορα τους, αρχικα γεματος με 0
PCD=0; %
PacketCounterDelivered, μεταβλητη που μετρα το μεγεθος
% του πινακα pkt_time, δηλ το πληθος των παραδομενωνπακετων
for pt = 1: PC - 1 % packet time,
διατρεχω τον πινακα pkt και αντιγραφω τιμές
if pkt(pt,7)~=0 % μονο για
παραδομεναπακετα, δηλ.(pt,7)<>0
pkt_time(pt,1)= pt; % η 1η στηλη του
πινακαpkt_timeειναι το Id του πακετου
pkt_time(pt,2)= pkt(pt,5); % η 2η στηλη του
πινακαpkt_timeειναι η ωραδημιουργιας
pkt_time(pt,3)= pkt(pt,7); % η 3η στηλη του
πινακαpkt_timeειναι η ωραπαραδοσης
pkt_time(pt,4)= pkt_time(pt,3) - pkt_time(pt,2); % η διαφορα των 2
χρονωνειναι ο χρονος που περασε ως την παραδοση
PCD=PCD+1;
end
end

time_sum=0; % μεταβλητη που μαζεวยει το συνολικοχρονοπαραδοσης
time_min=10000; % ο ελάχιστος χρονοςπαραδοσης στη δοκιμη, αρχικα
=0
time_max=0; % ο μεγιστοςχρονοςπαραδοσης στη δοκιμη, αρχικα =0
for ac = 1: PC-1 % διατρεχω τον πινακαpkt_time μέχρι PC-1 διοτι ο
πινακας περιέχει και μηδενικές εγγραφές, ac=avgcalc

ifpkt_time(ac,4)~=0 % δε λαμβάνω υπόψη μηδενικές τιμές
time_sum=time_sum+pkt_time(ac,4);

iftime_min>pkt_time(ac,4) % υπολογιζω το μικροτεροχρονο
time_min=pkt_time(ac,4);
end

if time_max<pkt_time(ac,4) % υπολογιζωτομεγαλυτεροχρονο
time_max=pkt_time(ac,4);
end
end
end
AV_TIME=time_sum/PCD;
MIN_TIME= time_min;
MAX_TIME= time_max;
```

Κώδικας προσομοιωτή τροποποιημένου πρωτοκόλλου Spray and Wait with Age of Information (SaW with AoI)

```
% SIMULATOR FOR Spray and Wait with AoI DTN PROTOCOL
clear all;
% SIMULATION PARAMETERS
N=100; % number of network nodes
L=1000; % side of square network area
R=50; % radio range
T=10; % the maximum value of TTL
M=20000; % παράμετρος που ορίζει το Μέγιστο
μέγεθος του πίνακα πακέτων
sim_time=2000; % παράμετρος που ορίζει τη χρονική
διάρκεια κάθε δοκιμής
K = 5; % παράμετρος που ορίζει μέχρι πόσα πακέτα
δημιουργούνται στη μονάδα του χρόνου)
imm=0.8; % παράμετρος κίνησης, όσο μεγαλύτερη,
μεγαλύτερη κινητικότητα
MC = 5; % παραμετρος που οριζει το
μεγιστοπληθοςαντιγραφων ενός μηνυματος στο δικτιο (MaxCopies)
MAOI=10; % παραμετρος που οριζει τη μεγιστηΗτιΠ
(MaxAge Of Information

% Node location initialization in the LxLnetwork area
coordinateMatrix=rand(N,2)*L; %Table Nx2 that stores the initial
location of nodes. The output of rand function is in [0,1].
[adjacencyMatrix,nodeDegree]=FindTopology(coordinateMatrix,N,R);

%Topology plot
% topology=newplot; %start a new figure diagram for the
topology
% hold on;
% for k=1:N
%
plot(coordinateMatrix(k,1),coordinateMatrix(k,2),'s','MarkerSize',
3,'MarkerFaceColor','b');
% end
% grid on;
% gplot(adjacencyMatrix,coordinateMatrix);

% Main simulation loop for time=sim_time

pkt = zeros(M, 10); % δημιουργώ πίνακα που θα περιέχει M
πακέτα που δημιουργούνται, αρχικαγεματος με 0
pkt_copies = zeros(8*M, 4); % δημιουργώ πίνακα που θα περιέχει
το πλήθος αντιγράφων που έχουν ως τωρα μεταδοθεί
% για κάθε διαφορετικό μήνυμα, αρχικαγεματος με 0
rn = 5; %randi([1 K],1,1); % σε κάθε μονάδα χρόνου επιλέγω
τυχαία πόσα πακέτα θα δημιουργηθούν, 1 ως K, packetnumber
PC= 1; % μεταβλητη που δειχνει σε ποιο σημειο
του πινακαpkt θα πρέπει να γίνει εισαγωγή πακέτου, PacketCounter
```

```

UP=0; % μεταβλητη που μετρά μοναδικά πακέτα,
UniquePackets

for time= 1: sim_time % main simulation loop

    %Packets creation

    for p = 1: pn % loop
    πουδημιουργείsim_time * pnπακέτα (σεκαθε loop
    δημιουργούνταιipnπακέτα)
    pkt(PC,1) = PC; % πεδίο Id Packet Counter
    pkt(PC,2) = randi([1 N],1,1); % τυχαία επιλογή του κόμβου πηγή
    (SourcenodeId)
    pkt(PC,3) = randi([1 N],1,1); % τυχαία επιλογή του κόμβου
    προορισμου (DestinationnodeId)
    pkt(PC,4) = pkt(PC,2); % ο τρέχων κόμβος (cuId) είναι ο
    κόμβος πηγή
    pkt(PC,5) = time; % η ώρα δημιουργίας του πακέτου

    pkt(PC,7) = 0; % αρχικά η ώρα παράδοσης τίθεται
    =0
    pkt(PC,8) = 0; % status, 0:created, 1:transfer,
    2: delivered, 3: deleted

    pkt(PC,10)= 0; % ώρα διαγραφης, αρχικά τίθεται
    =0
    pkt_copies(PC,1) = PC; % η πρωτηστηλη του
    πινακαpkt_copies θα ειναιση με το πεδίο Id
    pkt_copies(PC,2) = 0; % η 2η στηλη του
    πινακαpkt_copies, αρχικά = 0
    pkt_copies(PC,3) = 0; % η παράμετρος AoI θα παίρνει
    αρχικατιμη =0
    pkt_copies(PC,4) = 0; % πληθος κόμβων που διένυσε το
    πακέτο, αρχικά = 0
    PC= PC +1; % δειχνει στην
    επομενηγραμμη του πινακαpkt
    UP= UP+1 % μετραμε μοναδικα πακετα

    end

    %Pkt= table(pkt.Id 1, pkt.scId 2, pkt.deId 3 , pkt.cuId 4,
    pkt.crTime 5, pkt.pkt.TTL 6, pkt.delTime 7,
    %pkt.status 8, pkt.trNodes 9, pkt.erTime 10, pkt.relays 11)

    %Node movement

    forcurNode= 1:N % διατρέχωτουςNκόμβους,
    curNodeειναιιοτρεχονκομβος
    c= rand; % επιλέγω τυχαίο αριθμό c (0 ως 1)
    if c <imm % αν ο τυχαίος c είναι< από τη
    σταθεραακινησιας, ο κόμβος κινείταιαλλιως επόμενος κομβοςcurNode
    slope = rand*360; % επιλέγω τυχαία κατεύθυνση
    v = rand*10; % επιλεγωτυχαίαταχυτητα
    dist= v*1; % υπολογιζω την αποσταση που διενυσε ο κομβος
    σε μια χρονοθυρίδα

```

```
newx = coordinateMatrix(curNode,1) + dist*cos(slope); % Η
νεασυντ/νη χ θα είναι η προηγούμενη +
% + απόσταση * cos(γωνίας)
ifnewx>L
newx = L-(newx-L); % αν η νεασυντ/νη χ είναι > L, τότε ο
κομβοςγυρναπισωκαταnewx-L
end
coordinateMatrix(curNode,1)= newx; % η νεασυντ/νη χ αποθηκευεται
στον πινακα

newy = coordinateMatrix(curNode,2) + dist*sin(slope); % Η
νεασυντ/νη γ θα είναι η προηγούμενη +
% + απόσταση * sin(γωνίας)
ifnewy>L
newy = L-(newy-L); % αν η συντ/νη γ είναι > L, τότε ο
κομβοςγυρναπισωκαταnewy-L
end
coordinateMatrix(curNode,2)= newy; % η νεασυντ/νη γ αποθηκευεται
στον πινακα
end
end

[adjacencyMatrix,nodeDegree]=FindTopology(coordinateMatrix,N,R); %
εδώ υπολογίζονται ξανά οι κόμβοι που είναι σε σύνδεση
% από το πεδίο nodeDegree, if nodeDegree >= 1 then node in connection
with (nodeDegree) nodes

% μηδενισμος της διαγωνίου του adjacencyMatrix, ωστε να εχει 0
στη διαγωνιο
for z= 1:N % διατρέχω τον πίνακα adjacencyMatrix και θετω 0
στη διαγωνιο
if adjacencyMatrix(z,z)==1
adjacencyMatrix(z,z)=0;
end
end

% routing operation - packet exchange

for movNode = 1:N % movNode: κομβος που κινήθηκε στο τμήμα
Node movement, διατρέχω όλους τους N κομβους

if nodeDegree(movNode) >= 1 %
An ο κομβος movNode είναι σε σύνδεση με nodeDegree κομβους

for conNode = 1: N %
διατρέχω τον adjacency matrix στη γραμμή movNode από 1..N και ψαχνο να βρω
1, δηλ. κομβο σε επαφή

if adjacencyMatrix(movNode,conNode) == 1 %
ανοι κομβοι conNode, movNode είναι σε επαφή
```

```

for curPktrow = 1: PC-1 % διατρέχω τον πίνακα
pkt (που έχει μεγεθος PC-1 ως τώρα) στη στηλη 4 για να βρω πακέτα,
curPktrowείναιIdπακετου - γραμμή στο pkt
% με pkt(curPktrow,4) = monNode δηλ. να
βρω αν υπάρχει πακετο που είναι αποθηκευμενο στον κομβομονNode

%debug1= pkt (curPktrow,4);

if pkt (curPktrow,4) == monNode % θα μπει στο
ifμονο αν βρεθειπακετο στον κομβομονNode

ifpkt (curPktrow,3) == conNode % δηλ. αν ο conNode
είναι ο κομβος - προορισμος, παραδίδω το πακέτο
pkt (curPktrow,4) = conNode; % ο τρεχονκομβος είναι ο
conNode
pkt (curPktrow,7) = time; % ο χρονοςπαραδοσης είναι ο
τρεχονχρονος
pkt (curPktrow,8) = 2; % status = delivered
%pkt (curPktrow,9)=
pkt (curPktrow,9)+1; % πληθοςκομβων που διενυσε το πακετο
pkt_copies (pkt (curPktrow,1),2) = pkt_copies (pkt (curPktrow,1),2)
+1; % πληθοςκομβων που διενυσε το πακετο
end

%debug2=pkt_copies (pkt (curPktrow,1),2); %copies του πακετου
στη γραμμή curPktrow
ifpkt_copies (pkt (curPktrow,1),2) < MC &&pkt (curPktrow,8)~= 2
% pkt (curPktrow,1)= Idπακετου
%αν το τρεχονπακετο δεν έχει
ηδημεταδοθει σε MC κομβους και δεν παραδόθηκε στο προηγ/νοif
%εδώ υλοποιειται το
πρωτοκολλοSpray and wait
found=0; % αρχ/ση της μεταβλητής που
δηλώνει ότι βρέθηκε το πακέτο στο συνδ/νοκομβοconNode
for d=1: PC-1 %
διατρεχω τον πινακαpkt για να βρω αν το πακετο με Id =
curPktrowυπαρχειηδη στον κομβοconNode

%debug3= pkt (curPktrow,1);

%debug4= pkt (d,4);

if pkt (d,1)== pkt (curPktrow,1)
&& pkt (d,4) == conNode % pkt (curPktrow,1)= Id πακετου
% δηλ. αν το πακετουπαρχειηδη στον κομβοconNode με τον οποιο ο
κομβοςmonNode είναι σε σύνδεση
found=1; % εδώ χρησιμοποιώ τη μεταβλητηfound=1 που
δηλώνει ότι βρέθηκε το πακέτο με Id=curPktrow στον κομβοconNode
break;

end
end

% αλλιωσεισαγωνεοαντιγραφο του
πακετουcurPktrow στον κομβοconNode, γραφώ

```

```

    % στη γραμμη PC του πινακαpkt
    iffound~=1 % αν το πακετο με Id=curPktrow δε
    βρεθηκε στον κομβοconNode, εισαγω νέο αντιγραφο στον πινακαpkt
    pkt(PC,1) = pkt(curPktrow,1); % πεδίο Ιδιδιο με το αρχικό
    pkt(PC,2) = pkt(curPktrow,2); % ο κομβος πηγή του αρχικού
    πακέτου (SourceNodeId)
    pkt(PC,3) = pkt(curPktrow,3); % ο κόμβος προορισμός του
    αρχικού πακέτου (DestinationnodeId)
    pkt(PC,4) = conNode; % ο τρέχων κόμβος (cuId) είναι
    ο κόμβος σε επαφηconNode
    pkt(PC,5) = pkt(curPktrow,5); % η ώρα δημιουργίας του
    αρχικού πακέτου
    pkt(PC,7) = 0; % η ώρα παράδοσης παραμένει =0
    pkt(PC,8) = 1; % status, 1:transfer
    %pkt(PC,9) = pkt(curPktrow,9)
+ 1; % πληθος κόμβων που διένυσε το πακέτο, αρκικά = 0
    pkt(PC,10) = 0; % ώρα διαγραφης, παραμένει =0
    pkt_copies(pkt(curPktrow,1),3) = pkt_copies(pkt(curPktrow,1),3) +
    1; % pkt(curPktrow,1)=Idπακετου, η παράμετρος AoI +1
    ifpkt_copies(pkt(curPktrow,1),3)== MAOI % αν η παράμετρος AoI
    γίνει MaxAoI, το πακετοδιαγραφεται
    pkt(PC,8)=3; % status=3:deleted
    pkt(PC,10)= time; % ώρα διαγραφης = time,
    τρεχουσαωρα
    end
    pkt_copies(pkt(curPktrow,1),2) = pkt_copies(pkt(curPktrow,1),2)
    +1; % η σιηλη που μετρά τα αντίγραφα του πακετουcurPktrowγινεται
    +1
    PC=PC+1;
    end
        end
            end
                end
                    end
                        end
                            end
                                end
                                    end
                                        end
                                            end
                                                end
                                                    end
                                                        end
                                                            end
                                                                end
                                                                    end
                                                                        end
                                                                            end
                                                                                end
                                                                                    end
                                                                                        end
                                                                                            end
                                                                                                end
                                                                                                    end
                                                                                                        end
                                                                                                            end
                                                                                                                end
                                                                                                                    end
                                                                                                                        end
                                                                                                                            end
                                                                                                        end
                                                                                                    end
                                                                                                end
                                                                                            end
                                                                                        end
                                                                                    end
                                                                                end
                                                                            end
                                                                        end
                                                                    end
                                                                    % Υπολογισμοςδεικτων
                                                                    % υπολογισμοςdeliveredπακετων
                                                                    DP=0; % μεταβλητη που μετρα τα παραδομεναπακετα, αρχικα =0
                                                                    for cd = 1: PC-1 % countdelivered, διατρεχω τον πινακαpkt για να
                                                                    βρω πακετα με status =8
                                                                    if pkt(cd,8) ==2
                                                                    DP=DP +1;
                                                                    end
                                                                    end
                                                                    GP = PC - 1; % Generated packets στηδιαρκειατηςδοκιμης
                                                                    OP = PC-1 - DP; % Open (not delivered) packets
                                                                    στηδιαρκειατηςδοκιμης

```



```
SP = DP/UP;           % ποσοστοπαραδομενωνπακετων στη διαρκεια της
δοκιμης

% υπολογισμοςχρονωνπαραδοσης
pkt_time = zeros(10*M, 4); % δημιουργώ πίνακα που θα περιέχει το
Idκαθεπακετου, την ωραδημιουργιας και
% παραδοσηςκαθως και τη διαφορα τους, αρχικαγεματος με 0
PCD=0; %
PacketCounterDelivered, μεταβλητη που μετρα το μεγαθος
% του πινακαpkt_time, δηλ το πληθος των παραδομενωνπακετων
for pt = 1: PC - 1 % packet time,
διατρεχω τον πινακαpkt και αντιγραφω τιμές
ifpkt(pt,7)~=0 % μονο για
παραδομεναπακετα, δηλ. (pt,7)<>0
pkt_time(pt,1)= pt; % η 1η στηλη του
πινακαpkt_timeειναι το Id του πακετου
pkt_time(pt,2)= pkt(pt,5); % η 2η στηλη του
πινακαpkt_timeειναι η ωραδημιουργιας
pkt_time(pt,3)= pkt(pt,7); % η 3η στηλη του
πινακαpkt_timeειναι η ωραπαραδοσης
pkt_time(pt,4)= pkt_time(pt,3) - pkt_time(pt,2); % η διαφορα των 2
χρονωνειναι ο χρονος που περασε ως την παραδοση
PCD=PCD+1;
end
end

time_sum=0; % μεταβλητη που μαζεวยει το συνολικοχρονοπαραδοσης
time_min=10000; % ο ελάχιστος χρονοςπαραδοσης στη δοκιμη, αρχικα
=0
time_max=0; % ο μεγατοςχρονοςπαραδοσης στη δοκιμη, αρχικα =0
for ac = 1: PC-1 % διατρεχω τον πινακαpkt_time μέχρι PC-1 διοτι ο
πινακας περιέχει και μηδενικές εγγραφές, ac=avgcalc

ifpkt_time(ac,4)~=0 % δε λαμβάνω υπόψη μηδενικές τιμές
time_sum=time_sum+pkt_time(ac,4);

iftime_min>pkt_time(ac,4) % υπολογιζω το μικροτεροχρονο
time_min=pkt_time(ac,4);
end

if time_max<pkt_time(ac,4) % υπολογιζωτομεγαλυτεροχρονο
time_max=pkt_time(ac,4);
end
end
end
AV_TIME=time_sum/PCD;
MIN_TIME= time_min;
MAX_TIME= time_max;
```



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

*Ξενοφών Τιμόλογος, Βελτίωση Λειτουργίας Προτοκόλλων Δρομολόγησης με
χρήση Ηλικίας-της-Πληροφορίας*

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.