



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΚΤΥΩΝ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

Μελέτη και Ανάπτυξη Πρωτοκόλλων Ανεκτικών σε Καθυστέρηση  
με χρήση της Ηλικίας της Πληροφορίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Γεωργίου Σ. Καλλίτση

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2022





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Υ-  
ΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙ-  
ΚΤΥΩΝ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

Μελέτη και Ανάπτυξη Πρωτοκόλλων Ανεκτικών σε Καθυστέρηση  
με χρήση της Ηλικίας της Πληροφορίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Γεωργίου Σ. Καλλίτση

**Επιβλέπων:** Συμεών Παπαβασιλείου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23<sup>η</sup> Ιουνίου 2022.

.....  
Συμεών Παπαβασιλείου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννα Ρουσσάκη  
Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Βασίλειος Καρυώτης  
Αν. Καθηγητής Ιονίου Πανεπιστημίου

Αθήνα, Ιούνιος 2022

.....  
**Γεώργιος Σ. Καλλίτσης**

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

© 2022 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη της σύνδεσης των λεγόμενων Delay Tolerant Networks (DTNs) με μια εξαιρετικά καινοτόμα μετρική που υπάγεται στο πεδίο του χρόνου και ονομάζεται Ηλικία της Πληροφορίας (Age of Information-AoI). Τα DTNs αποτελούν μια ειδική κατηγορία δικτύων, τα οποία συναντώνται κυρίως σε ακραία επίγεια και διαστημικά περιβάλλοντα, ενώ το AoI αποτελεί μετρική επίδοσης, η οποία έχει εισαχθεί στη θεωρία των ουρών αναμονής την τελευταία δεκαετία, αποτυπώνοντας τη φρεσκάδα της μεταδιδόμενης πληροφορίας

Πιο συγκεκριμένα, τα DTNs λόγω των ιδιοτήτων τους δε χρησιμοποιούν τα ίδια πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία χρησιμοποιούνται εκτενώς και στο παραδοσιακό Διαδίκτυο, καθώς δίνουν περισσότερη έμφαση στην τελική παράδοση των μεταδιδόμενων πακέτων, ανεξαρτήτως της καθυστέρησης, η οποία μπορεί να διαρκέσει ακόμα και ολόκληρες μέρες. Με άλλα λόγια, όπως υποδεικνύει και το όνομά τους τα DTNs δείχνουν μια σχετική ανοχή στο κομμάτι αυτό. Ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα δρομολόγησης στο DTN είναι το πρωτόκολλο FRESH, το οποίο βασίζεται στις πιο πρόσφατες συναντήσεις (encounters) κάθε κόμβου με όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Παρ' όλα αυτά, ιδίως εξαιτίας της απλότητάς του, δεν επικεντρώνεται τόσο στην ηλικία των πακέτων, καθιστώντας τα αρκετά συχνά παλαιωμένα, κυρίως εξαιτίας της συμφόρησης και των μεγάλων διαστημάτων διακοπής της συνδεσιμότητας μεταξύ των κόμβων. Στην εργασία αυτή, τροποποιείται κατάλληλα το πρωτόκολλο FRESH, θέτοντας ένα άνω όριο στην ηλικία των πακέτων (Age of Information), με σκοπό την εξασφάλιση της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης φρεσκάδας τους.

Η πειραματική αξιολόγηση του προτεινόμενου τροποποιημένου πρωτοκόλλου εν συγκρίσει με το αυθεντικό πρωτόκολλο FRESH διεξάγεται σε συνθετικά δίκτυα. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν το τεράστιο κέρδος που αποκομίζεται στο κομμάτι της ηλικίας των πακέτων και στη φρεσκάδα αυτών, δίχως να επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό η ρυθμαπόδοση του συστήματος, δηλαδή το ποσοστό των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων.

**Λέξεις-Κλειδιά:** Θεωρία Ουρών Αναμονής, Ηλικία της Πληροφορίας, Δίκτυα Ανεχτά στην Καθυστέρηση, Πρωτόκολλο FRESH



## Abstract

The purpose of this Diploma Thesis is the study of the potential connection between the so-called Delay Tolerant Networks (DTNs) with a highly innovative metric of temporal nature that is called the Age of Information (AoI). DTNs are a special category of networks designed mainly for extreme terrestrial and space environments, while AoI is a metric of performance, which has been introduced in the queueing theory over the last decade, capturing the freshness of the transmitted information.

More specifically, DTNs due to their peculiarities do not use the same routing protocols that are widely used on the traditional Internet, as they place more emphasis on the final delivery of the transmitted packets, regardless of the delay, which can last even days. In other words, as their name suggests, DTNs show a relative tolerance for this. One of the most common routing protocols in DTN is the FRESH protocol, which is based on the most recent encounters of each node with all other nodes in the network. However, mainly due to its simplicity, it does not focus so much on the age of the packets, making them quite often obsolete, due to congestion and long interruptions of connectivity between nodes. In this work, the FRESH protocol is modified accordingly, setting an upper bound in the age of the packages (Age of Information), in order to ensure their maximum freshness.

The experimental evaluation of the proposed modified protocol in comparison with the original FRESH protocol is carried out in synthetic networks. The results show the huge profit that is obtained in the field of the age of the packages and in their freshness, without greatly affecting the system throughput, i.e., the percentage of successfully transmitted packages.

**Keywords:** Queueing systems theory, Age of Information, Delay Tolerant Networks, FRESH Protocol





## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους ήταν αρωγοί στην προσπάθειά μου για την εκπόνηση της Διπλωματικής μου Εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον επιβλέποντα μου Καθηγητή, κύριο Παπαβασιλείου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο επιστημονικό θέμα.

Επιπλέον, οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Αναπληρωτή Καθηγητή κύριο Καρυώτη, ο οποίος ήταν δίπλα μου από την αρχή μέχρι το τέλος με την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε και με τις κατευθύνσεις και συμβουλές του που συνέβαλαν σε σημαντικό βαθμό στην τελική περάτωση της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου Μαρία και Σταύρο, τα αδέρφια μου Κωνσταντίνο και Ειρήνη, καθώς και τους φίλους μου για την υπομονή, την πίστη και την στήριξη που προσέφεραν σε μένα κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

# Περιεχόμενα

Πίνακας Περιεχομένων	vi
Κατάλογος Σχημάτων	vii
Κατάλογος Πινάκων	viii
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγικά Στοιχεία . . . . .	1
1.2 Βασικά Αποτελέσματα-Διάρθρωση της Εργασίας . . . . .	1
<b>2 Σχετική Βιβλιογραφία</b>	<b>3</b>
2.1 Ηλικία της Πληροφορίας . . . . .	3
2.1.1 Περιγραφή Γενικού Μοντέλου . . . . .	3
2.1.2 Το M/M/1 Μοντέλο Συστήματος . . . . .	6
2.1.3 Το M/D/1 Μοντέλο Συστήματος . . . . .	7
2.1.4 Το D/M/1 Μοντέλο Συστήματος . . . . .	8
2.2 Δίκτυα Ανεκτά στην Καθυστέρηση . . . . .	11
2.2.1 Γενικά Στοιχεία . . . . .	11
2.2.2 Αρχιτεκτονική DTN . . . . .	12
2.2.3 Δρομολόγηση στο DTN . . . . .	12
<b>3 Το Πρωτόκολλο FRESH και Προτεινόμενες Παραλλαγές</b>	<b>35</b>
3.1 Περιγραφή Πρωτοκόλλου FRESH . . . . .	35
3.2 Περιγραφή Τροποποιημένου Πρωτοκόλλου . . . . .	37
<b>4 Πειραματική Αξιολόγηση-Προσομοίωση</b>	<b>39</b>
4.1 Γενικά Στοιχεία . . . . .	39
4.2 Διαστασιολόγηση της Προσομοίωσης . . . . .	43
4.3 Προσομοιώσεις Μεγαλύτερης Κλίμακας . . . . .	47
4.4 Γραφικές Παραστάσεις-Συμπεράσματα . . . . .	52
<b>5 Επίλογος</b>	<b>62</b>
5.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα . . . . .	62
5.2 Μελλοντικές Κατευθύνσεις . . . . .	62

# Κατάλογος Σχημάτων

1	Το βασικό μοντέλο συστήματος [19] . . . . .	3
2	Γραφική απεικόνιση της Ηλικίας της Πληροφορίας [19] . . . . .	5
3	Μέση ηλικία έναντι χρησιμοποίησης server για τα συστήματα M/M/1, M/D/1 και D/M/1 και σταθερό ρυθμό εξυπηρέτησης $\mu = 1$ [19] . . . . .	7
4	Σύγκριση των μηχανισμών που χρησιμοποιούνται στο παραδοσιακό Διαδίκτυο έναντι του DTN [33]	13
5	Epidemic Routing Protocol στο DTN [33] . . . . .	14
6	Διάγραμμα κλάσης για την κλάση Node . . . . .	40
7	Διάγραμμα κλάσης για την κλάση Packet . . . . .	41
8	Γραφική απεικόνιση του Random Waypoint Mobility Model [77] . . . . .	41
9	Εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης εν συγκρίσει με τον αριθμό των time slots για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2 . . . . .	52
10	Εξάρτηση της μέσης ηλικίας των πακέτων εν συγκρίσει με τον αριθμό των time slots για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2 . . . . .	54
11	Εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης εν συγκρίσει με τον αριθμό των κόμβων για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2 . . . . .	55
12	Εξάρτηση της μέσης ηλικίας των πακέτων εν συγκρίσει με τον αριθμό των κόμβων για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2 . . . . .	56
13	Εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης εν συγκρίσει με την τιμή του Bound του AoI για τα πρωτόκολλα Modified-neigh, Modified-near-v1 και Modified-near-v2 . . . . .	57
14	Εξάρτηση της μέσης ηλικίας των πακέτων εν συγκρίσει με την τιμή του Bound του AoI για τα πρωτόκολλα Modified-neigh, Modified-near-v1 και Modified-near-v2 . . . . .	58
15	Χρόνος εκτέλεσης των προσομοιώσεων για διάφορες τιμές των παραμέτρων του συστήματος για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2 . . . . .	60

## Κατάλογος Πινάκων

1	Σύνοψη εκφράσεων AoI . . . . .	9
2	Σύνοψη των υφιστάμενων πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα DTN . . . . .	17
3	Πρώτα αποτελέσματα για Modified-neigh . . . . .	44
4	Πρώτα αποτελέσματα για Modified-near-v1 . . . . .	44
5	Πρώτα αποτελέσματα για Modified-near-v2 . . . . .	45
6	Πρώτα αποτελέσματα για FRESH-neigh . . . . .	45
7	Πρώτα αποτελέσματα για FRESH-near-v1 . . . . .	46
8	Πρώτα αποτελέσματα για FRESH-near-v2 . . . . .	46
9	Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για Modified-neigh . . . . .	48
10	Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για Modified-near-v1 . . . . .	48
11	Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για Modified-near-v2 . . . . .	50
12	Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για FRESH-neigh . . . . .	50
13	Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για FRESH-near-v1 . . . . .	51
14	Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για FRESH-near-v2 . . . . .	51

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Η οικονομική και κοινωνικοπολιτική ευημερία κατά το δεύτερο ήμισυ του 20<sup>ου</sup> αιώνα έθεσε το πλαίσιο για τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας. Ένας εκ των τομέων που γνώρισε μεγάλη πρόοδο αποτελεί αυτός των Δικτύων Υπολογιστών, όπως αποτυπώνεται στην πλέον απανταχού παρουσία τους με διάφορες μορφές, όπως τα Δίκτυα Επικοινωνιών [1, 2, 3], το Διαδίκτυο [4, 5, 6], τα Κοινωνικά Δίκτυα [7, 8], τα Έξυπνα Ηλεκτρικά Δίκτυα (smart grids) [9, 10], κλπ. Στις μέρες μας, η δομή της σουίτας πρωτοκόλλων TCP/IP [11, 12, 13] διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην ομαλή λειτουργία και εξέλιξη του Διαδικτύου. Το Διαδίκτυο (Internet) ως γνωστόν αποτελείται από χιλιάδες διασυνδεδεμένα μεταξύ τους (υπο)δίκτυα. Η δρομολόγηση [14, 15] μεταξύ των διαφόρων δικτύων επιτυγχάνεται μέσω των δρομολογητών (routers), οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την εφαρμογή των διαφόρων πρωτοκόλλων δρομολόγησης, προκειμένου να είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ δύο οποιονδήποτε τερματικών-host.

Από την άλλη πλευρά, πέρα από το παραδοσιακό Internet, υπάρχει μια ειδική κατηγορία δικτύων τα οποία συναντώνται κυρίως σε ποικίλα αφιλόξενα περιβάλλοντα και σενάρια που θέτουν ιδιαίτερες προκλήσεις, όπως περιβάλλοντα που προκύπτουν έπειτα από φυσικές καταστροφές (σεισμοί, κλπ.), πολεμικά περιβάλλοντα, υποβρύχιες επικοινωνίες, περιβάλλοντα που περιλαμβάνουν διαστημική επικοινωνία ή σενάρια κατά τα οποία απαιτείται επικοινωνία σε υποδίκτυα πολύ απομακρυσμένων περιοχών της Γης. Βασική πρόκληση στα παραπάνω περιβάλλοντα αποτελεί το γεγονός πως η multi-hop συνδεσιμότητα δεν είναι διαθέσιμη κάθε χρονική στιγμή, ενώ ταυτόχρονα η καθυστέρηση στις point-to-point ζεύξεις είναι πολύ μεγάλη. Επομένως, παρ' ότι σε αυτές τις περιπτώσεις η από άκρο σε άκρο (end-to-end) συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων είναι αδύνατον να επιτευχθεί, η ανάγκη ύπαρξης επικοινωνίας από έναν κόμβο-πηγή προς έναν κόμβο-προορισμό υφίσταται κανονικά. Επομένως, σε αυτά τα ειδικά περιβάλλοντα, δεν είναι δυνατή η εφαρμογή των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στο παραδοσιακό Διαδίκτυο, συνεπώς θα πρέπει να προσαρμοστούν κατάλληλα ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες και τις απαιτήσεις των δικτύων αυτών. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται Delay Tolerant Networks (DTNs), καθώς όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, χαρακτηρίζονται από μεγάλη ανοχή στην καθυστέρηση των μεταδιδόμενων πακέτων. Διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία με σκοπό την ομαλή λειτουργία της δρομολόγησης των μηνυμάτων στα Delay Tolerant Networks, ορισμένα από τα οποία θα παρατεθούν και αναλυθούν στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

## 1.2 Βασικά Αποτελέσματα-Διάρθρωση της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της σχέσης των DTNs με μια καινοτόμα μετρική του χρόνου, η οποία συναντάται στη θεωρία των ουρών αναμονής [16, 17, 18]. Η μετρική αυτή καλείται Ηλικία της Πληροφορίας (Age of Information-AoI) και αποτελεί ένδειξη της φρεσκάδας της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Το κατά πόσο η πληροφορία που μεταφέρεται μέσω ενός πακέτου ενημέρωσης είναι φρέσκια ή όχι δεν μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας συνηθισμένες μετρικές από τη θεωρία των ουρών αναμονής, όπως η ρυθμαπόδοση και η καθυστέρηση. Γι' αυτό το λόγο, εισήχθη πρόσφατα στη βιβλιογραφία η έννοια του AoI, με σκοπό την ποσοτικοποίηση αυτής

της φρεσκάδας της πληροφορίας. Πιο συγκεκριμένα, με βάση ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο δρομολόγησης που συναντάται στα DTNs (το FRESH, το οποίο θα αναλυθεί λεπτομερώς παρακάτω), προτείνεται μια τροποποίησή του, η οποία είναι προσανατολισμένη στη χρήση της μετρικής αυτής, με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας της δρομολόγησης των πακέτων στα DTNs κυρίως όσον αφορά το κομμάτι του χρόνου.

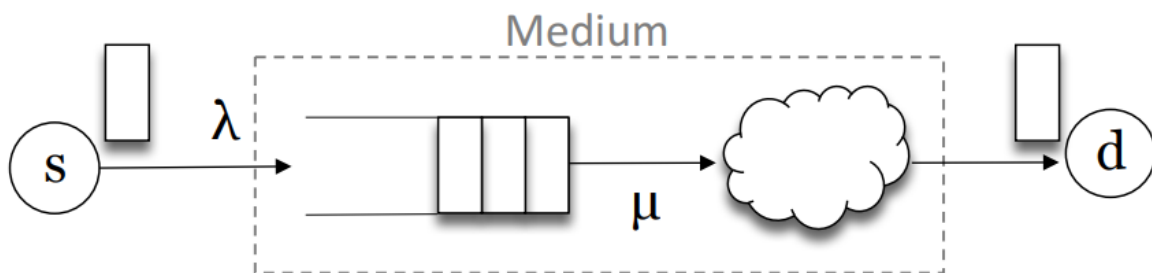
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν πως το τροποποιημένο πρωτόκολλο συμπεριφέρεται πολύ παρόμοια με το αυθεντικό πρωτόκολλο στο κομμάτι της ρυθμαπόδοσης, ενώ τα κέρδη που αποκομίζονται από την εφαρμογή του στο κομμάτι της Ηλικίας της Πληροφορίας είναι αδιαμφισβήτητα και το καθιστούν πλήρως επιτυχημένο.

Το υπόλοιπο της διπλωματικής εργασίας είναι οργανωμένο ως εξής: στο κεφάλαιο 2 παρέχονται τα κύρια αποτελέσματα που έχουν εισαχθεί στη βιβλιογραφία σχετικά με την Ηλικία της Πληροφορίας και τα Delay Tolerant Networks. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται το πρωτόκολλο δρομολόγησης FRESH, καθώς και το τροποποιημένο πρωτόκολλο το οποίο προτείνεται και εισάγεται στην παρούσα εργασία. Στο κεφάλαιο 4 περιλαμβάνεται η προσομοίωση, στην οποία συγκρίνονται μεταξύ τους οι διάφορες εκδόσεις τόσο του αυθεντικού όσο και του τροποποιημένου πρωτοκόλλου, ενώ εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα της δρομολόγησης των πακέτων. Τέλος, το κεφάλαιο 5 συνοψίζει την εργασία και παρέχει ορισμένες μελλοντικές κατευθύνσεις.

## 2 Σχετική Βιβλιογραφία

### 2.1 Ηλικία της Πληροφορίας

Η έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας (Age of Information- AoI) [19] εισήχθη στις αρχές της δεκαετίας του 2010 (και πιο συγκεκριμένα το 2011) με σκοπό να ποσοτικοποιήσει τη φρεσκάδα της γνώσης που υπάρχει σχετικά με μια διαδικασία που παρατηρείται εξ αποστάσεως. Η διαδικασία αυτή παρέχει στο χρήστη ενημερώσεις κατάστασης σχετικά με μία ή περισσότερες παραμέτρους ενδιαφέροντος του συστήματος μέσω της παραγωγής και μετάδοσης πακέτων από έναν κόμβο πηγής (παραδείγματος χάριν έναν αισθητήρα ο οποίος μετράει ένα συγκεκριμένο μέγεθος) προς έναν κόμβο προορισμού (συνήθως έναν κεντρικό αισθητήρα ή τη θέση στην οποία βρίσκεται ο χρήστης αυτή τη χρονική στιγμή.) Το AoI έχει αποδειχθεί ότι είναι μια εξαιρετικά νέα μετρική επικαιρότητας που διαφοροποιείται σαφώς από τις υπάρχουσες, όπως η ρυθμικόδοση (throughput) και η καθυστέρηση (delay). Πιο συγκεκριμένα, το AoI είναι ο χρόνος που έχει παρέλθει από τη δημιουργία του τελευταίου επιτυχώς ληφθέντος μηνύματος που περιέχει πληροφορίες ενημέρωσης σχετικά με το σύστημα πηγής.



Σχήμα 1: Το βασικό μοντέλο συστήματος [19]

#### 2.1.1 Περιγραφή Γενικού Μοντέλου

Έστω σύστημα που αποτελείται από δύο κόμβους, έναν κόμβο πηγής και έναν κόμβο προορισμού [19]. Μια στοχαστική διαδικασία [20]  $X(t)$  παρατηρείται από τον κόμβο πηγής, ο οποίος εξάγει δείγματα. Τα δείγματα φέρουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της στοχαστικής διαδικασίας στον κόμβο πηγής. Κάθε δείγμα πρέπει να μεταδοθεί μέσω ενός διαύλου επικοινωνίας στον κόμβο προορισμού, προκειμένου ο τελευταίος να ενημερωθεί για την κατάσταση της διαδικασίας. Στον πομπό του κόμβου πηγής, υπάρχει ένας buffer που αποθηκεύει τα δείγματα με τη μορφή πακέτων. Κάθε πακέτο περιέχει όχι μόνο την αξία της στοχαστικής διαδικασίας  $X(t_i)$  τη χρονική στιγμή  $t_i$  όπου έγινε η εξαγωγή του δείγματος αλλά και τη χρονοσφραγίδα (timestamp)  $t_i$ . Ο διάυλος επικοινωνίας των δύο κόμβων θεωρείται ότι δεν εμφανίζει σφάλματα (error-free).

Για το περιγραφόμενο μοντέλο, χρησιμοποιείται ένα απλό σύστημα ουράς αναμονής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Ο κόμβος πηγής υποδηλώνεται ως  $s$  και ο κόμβος προορισμού ως  $d$ , ενώ όλα τα πακέτα που δημιουργούνται πρέπει να ταξιδεύουν από το  $s$  στο  $d$  μέσω της ζεύξης επικοινωνίας που υπενθυμίζεται πως θεωρείται χωρίς σφάλματα. Έστω ότι η δημιουργία ενημέρωσης κατάστασης μοντελοποιείται ως μια στοχαστική διαδικασία μέσου ρυθμού  $\lambda$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 πάνω από την πηγή και τα πακέτα μεταδίδονται με μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης  $\mu$  στον

προορισμό.

Η έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας που θα αναλυθεί παρακάτω αναφέρεται στη φρεσκάδα της γνώσης που κατέχει ο προορισμός σχετικά με την κατάσταση του κόμβου πηγής. Αυτή η μέτρηση της φρεσκάδας ποσοτικοποιείται ως ο χρόνος που μεσολάβησε από τη δημιουργία της τελευταίας ενημέρωσης κατάστασης που ελήφθη από τον προορισμό.

**Ορισμός 1** (Age of Information - AoI): Έστω ένα σύστημα που αποτελείται από ένα ζεύγος επικοινωνίας πηγής-προορισμού. Έστω  $t'_k$  οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες λαμβάνονται οι ενημερώσεις κατάστασης από τον προορισμό. Τη χρονική στιγμή  $\xi$ , ο δείκτης της πιο πρόσφατης ενημέρωσης είναι:

$$N(\xi) = \max\{k | t'_k \leq \xi\}, \quad (1)$$

όπου η χρονοσφραγίδα της πιο πρόσφατης ενημέρωσης είναι:

$$u(\xi) = t_{N(\xi)}. \quad (2)$$

Η Ηλικία της πληροφορίας (Age of Information-AoI) της πηγής  $s$  στον προορισμό  $d$  ορίζεται ως η τυχαία διαδικασία:

$$\Delta(t) = t - u(t). \quad (3)$$

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, γίνεται η υπόθεση ότι η παρατήρηση του συστήματος ξεκινά τη χρονική στιγμή  $t = 0$ , όπου η ουρά είναι άδεια και η τιμή του AoI στον προορισμό είναι  $\Delta(0) = \Delta_0$ . Για λόγους συμβολισμού, ορίζεται ότι η ενημέρωση κατάστασης  $i$  δημιουργείται τη χρονική στιγμή  $t_i$  και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτή η ενημέρωση κατάστασης λαμβάνεται από τον προορισμό  $d$  τη χρονική στιγμή  $t'_i$ . Είναι προφανές πως μεταξύ των χρονικών στιγμών  $t'_{i-1}$  και  $t'_i$ , όπου δεν υπάρχουν ενημερώσεις στον προορισμό, η AoI αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο. Μόνο όταν λάβει χώρα μια ενημέρωση κατάστασης από τον προορισμό, η AoI ρυθμίζεται στην καθυστέρηση που αντιμετώπισε το πακέτο μέσω του διαύλου επικοινωνίας.

Ακολουθούν κάποιοι επιπλέον ορισμοί: το  $i$ -οστό interarrival time  $Y_i$  ορίζεται ως ο χρόνος που μεσολάβησε μεταξύ της δημιουργίας της ενημέρωσης  $i$  και της προηγούμενης ενημέρωσης, δηλαδή της ενημέρωσης  $i-1$ :

$$Y_i = t_i - t_{i-1}. \quad (4)$$

Επιπλέον, ο χρόνος συστήματος ενημέρωσης  $i$  (system time), που συμβολίζεται ως  $T_i$ , αντιστοιχεί στο άθροισμα του χρόνου αναμονής στην ουρά και του χρόνου εξυπηρέτησης της ενημέρωσης  $i$  και ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται από τη δημιουργία της ενημέρωσης κατάστασης  $i$  από την πηγή έως τη λήψη αυτής της ενημέρωσης από τον προορισμό:

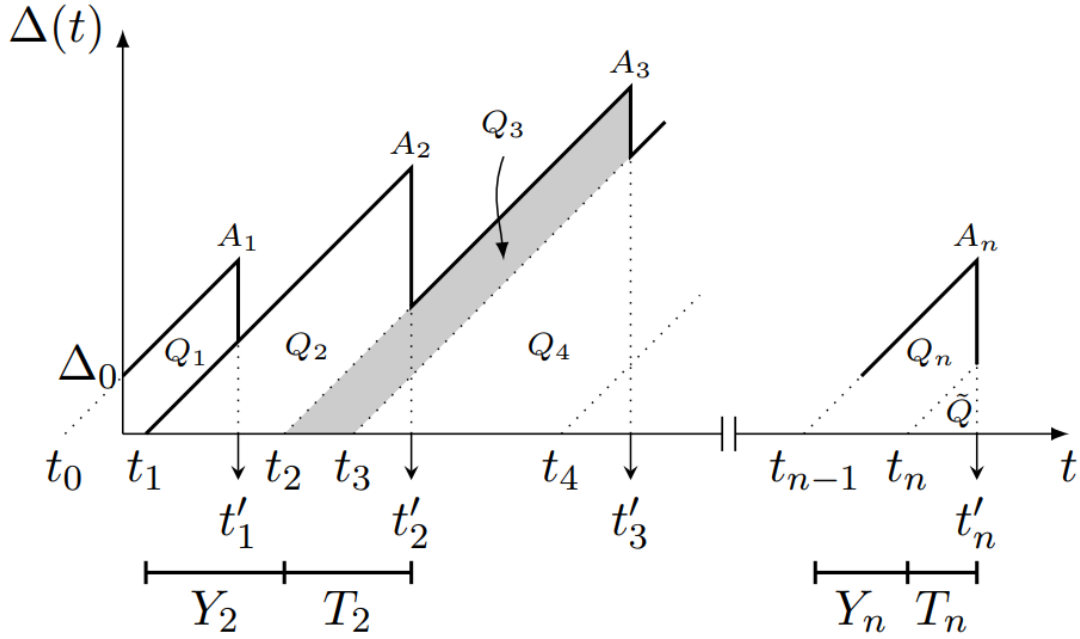
$$T_i = t'_i - t_i. \quad (5)$$

Επιπρόσθετα, υποθέτοντας ότι το διάστημα παρατήρησης είναι από  $t = 0$  έως  $t = T = t'_n$ , έστω  $N(T)$  ο αριθμός των αφίξεων έως τη χρονική στιγμή  $T$ , δηλαδή:

$$N(T) = \max\{n | t_n \leq T\}. \quad (6)$$

Συνεπάγεται ότι τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες πραγματοποιείται λήψη πακέτου από τον προορισμό  $d$  (τις στιγμές  $t'_i$  για  $i=\{1,2,\dots,N(T)\}$ ), το Age of Information ρυθμίζεται στην τιμή  $T_i = t'_i - t_i$ . Η φρεσκάδα των





Σχήμα 2: Γραφική απεικόνιση της Ηλικίας της Πληροφορίας [19]

πληροφοριών της κατάστασης της πηγής στον προορισμό αποτυπώνεται ακριβώς από αυτή τη μείωση, η οποία λαμβάνει χώρα σε κάθε λήψη μιας ενημέρωσης κατάστασης από τον προορισμό  $d$ . Από την άλλη πλευρά, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όλες τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές κατά τις οποίες δεν υφίσταται λήψη κατάστασης από τον κόμβο προορισμού, το ΑοΙ αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο. Ως αποτέλεσμα, στο Σχήμα 2 παρατηρείται αυτό το μοτίβο πριονωτή (sawtooth pattern).

Υποθέτοντας ότι η διαδικασία  $\Delta(t)$  έχει την ιδιότητα της εργοδικότητας, η μέση ηλικία μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας έναν χρονικό μέσο όρο. Θεωρώντας ένα χρονικό διάστημα παρατήρησης  $(0, T)$ , η μέση ηλικία ενός συστήματος ενημέρωσης κατάστασης υπολογίζεται ως:

$$\Delta_T = \frac{1}{T} * \int_0^T \Delta(t) dt. \quad (7)$$

Η ολοκλήρωση στην εξίσωση (7) μπορεί να ερμηνευθεί ως η περιοχή κάτω από την καμπύλη  $\Delta(t)$ . Παρατηρώντας το Σχήμα 2, είναι φανερό πως η περιοχή μπορεί να αναπαρασταθεί ως το άθροισμα των ασύνδετων γεωμετρικών σχημάτων με εμβαδά που προσδιορίζονται από  $Q_k$  για  $k = \{1, 2, \dots, N(T)\}$ . Στην περίπτωση που  $T > t'_{N(T)}$ , θα υπάρχει επίσης μια περιοχή που θα προστεθεί στο τέλος, η οποία συμβολίζεται ως  $\hat{Q}$ . Επομένως, η συνολική περιοχή αποσυντίθεται στην περιοχή του πολυγώνου  $Q_1$ , στα τραπεζοειδή  $Q_i$  for  $i = \{2, 3, \dots, N(T)\}$ , και στην τριγωνική περιοχή πλάτους  $T_n$   $\hat{Q}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Έτσι, η διάσπαση του  $\Delta_T$  συνεπάγεται:

$$\Delta(t) = \frac{1}{T} * (Q_1 + \hat{Q} + \sum_{i=2}^{N(T)} Q_i) = \frac{Q_1}{T} + \frac{N(T) - 1}{T} * \frac{1}{N(T) - 1} * \sum_{i=2}^{N(T)} Q_i. \quad (8)$$

Η μέση ηλικία υπολογίζεται, λαμβάνοντας το μήκος του διαστήματος παρατήρησης να τείνει το άπειρο, δηλαδή:

$$\Delta = \lim_{T \rightarrow \infty} \Delta(T). \quad (9)$$

Είναι προφανές ότι ο όρος  $\frac{Q_1 + \hat{Q}}{T}$  τείνει στο 0 καθώς το  $T$  μεγαλώνει και επιπλέον έστω

$$\lambda = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{N(T)}{T} \quad (10)$$

ο ρυθμός σταθερής κατάστασης δημιουργίας ενημερώσεων κατάστασης. Από τη γεωμετρία του Σχήματος 2, οι τραπεζοειδείς περιοχές  $Q_i$  μπορούν να εκφραστούν, χρησιμοποιώντας τα interarrival times  $Y_i$  και τα system times  $T_i$  ως:

$$Q_i = \frac{1}{2} * (T_i + Y_i)^2 - \frac{1}{2} * T_i^2 = Y_i * T_i + \frac{Y_i^2}{2}. \quad (11)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (8), (9), (10) και (11), λαμβάνεται ότι:

$$\Delta = \frac{E[Q]}{E[Y]} = \frac{E[Y * T] + E[Y^2]/2}{E[Y]}, \quad (12)$$

όπου έχει τεθεί ότι  $\lambda = \frac{1}{E[Y]}$  και  $E[.]$  είναι ο τελεστής μέσης τιμής.

Το σημαντικό αποτέλεσμα εδώ είναι ότι δεν έχουν γίνει υποθέσεις σχετικά με την κατανομή των τυχαίων μεταβλητών  $Y$  και  $T$ , ούτε έχει ληφθεί υπόψη κάποια συγκεκριμένη πολιτική υπηρεσίας. Ωστόσο, οι υπολογισμοί είναι γενικά δύσκολοι λόγω του γεγονότος ότι οι τυχαίες μεταβλητές  $Y$  (interarrival time) και  $T$  (system time) είναι εξαρτημένες και ως αποτέλεσμα, στις περισσότερες περιπτώσεις, η κοινή τους κατανομή δεν είναι γνωστή. Διαισθητικά, εύκολα παρατηρείται ότι το  $Y$  και το  $T$  συσχετίζονται αρνητικά (negative correlation). Αυτό ισχύει, γιατί εάν γίνει η επιλογή να μειωθούν οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων  $Y_i$ , αυτό θα οδηγήσει σε μεγαλύτερους χρόνους συστήματος, λόγω της αυξημένης επισκεψιμότητας. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση των χρόνων μεταξύ αφίξεων θα επιτρέψει στο σύστημα να αδειάσει πιο εύκολα και ως αποτέλεσμα, οι καθυστερήσεις και οι χρόνοι συστήματος γενικότερα θα είναι μικρότεροι.

### 2.1.2 Το M/M/1 Μοντέλο Συστήματος

Έστω ένα απλό σύστημα M/M/1 [21, 22] όπου τα πακέτα εξυπηρετούνται με πολιτική FCFS (First-Come-First-Served) [23]. Σε ένα τέτοιο σύστημα, υπάρχει μία πηγή, ένας server (εξυπηρετητής), οι ενημερώσεις κατάστασης δημιουργούνται σύμφωνα με μια διαδικασία Poisson [24] με μέσο ρυθμό αφίξεων  $\lambda$  και ως εκ τούτου, τα interarrival times  $Y$  είναι ανεξάρτητη και ομοιόμορφα κατανεμημένη (independent and identically distributed- i.i.d.) εκθετική [25] τυχαία μεταβλητή με  $E[Y] = \frac{1}{\lambda}$ . Επιπρόσθετα, οι χρόνοι εξυπηρέτησης είναι i.i.d. εκθετική τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή  $\frac{1}{\mu}$ .

Η μέση ηλικία πληροφορίας για ένα γενικό σύστημα δίνεται στην εξίσωση (12). Σε αυτήν την περίπτωση, δεδομένου ότι  $E[Y] = \frac{1}{\lambda}$ , χρειάζεται να υπολογιστούν οι όροι  $E[Y * T]$  και  $E[Y^2]$ . Με κάποιους μαθηματικούς υπολογισμούς [19], αποδεικνύεται εύκολα ότι σε αυτήν την περίπτωση, η έκφραση AoI για το σύστημα M/M/1 με πολιτική FCFS είναι:

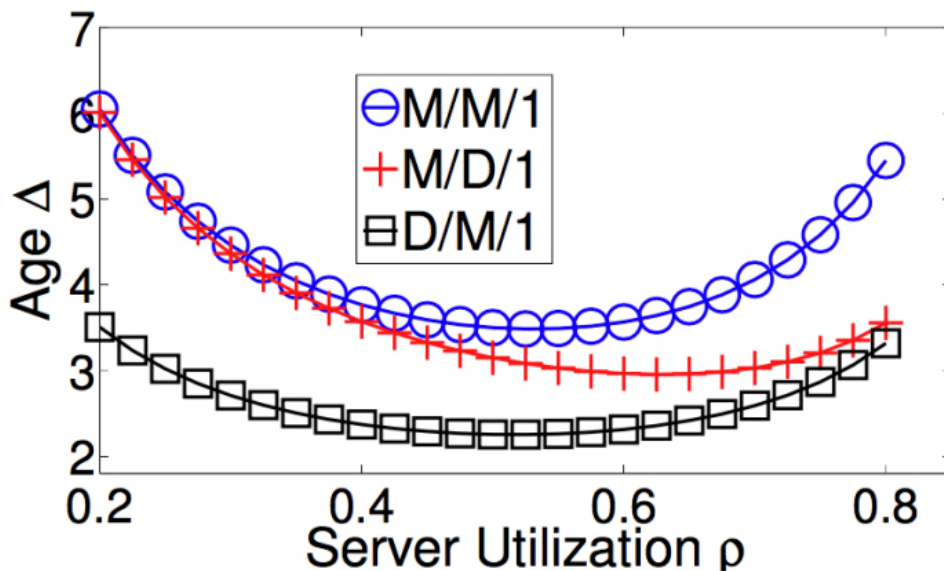
$$\Delta_{M/M/1} = \frac{1}{\mu} * \left(1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1 - \rho}\right), \quad (13)$$

όπου  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$  αναφέρεται στη χρησιμοποίηση του server.

Φυσικά, είναι επιθυμητό αυτή η ποσότητα να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, προκειμένου οι ενημερώσεις κατάστασης να είναι όσο το δυνατόν πιο φρέσκες. Υποθέτοντας σταθερό μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης  $\mu$ , η βέλτιστη χρησιμοποίηση του server  $\rho$  αντιστοιχεί σε έναν βέλτιστο ρυθμό αφίξεων  $\lambda$ . Με άλλα λόγια, υποτίθεται ότι υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενημερώσεων κατάστασης όσο συχνά είναι επιθυμητό, εξάγοντας δείγματα της τυχαίας διαδικασίας  $X(t)$ . Έτσι, εύκολα διαπιστώνεται ότι η βέλτιστη χρησιμοποίηση του server  $\rho$  είναι  $\rho^* \approx 0.53$ . Επομένως, συμπεραίνεται ότι η ελάχιστη ηλικία επιτυγχάνεται κρατώντας τον server σε αδράνεια  $\approx 47\%$  του συνολικού χρόνου. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να είναι κατά κάποιο τρόπο αμφιλεγόμενο, επειδή διαφέρει πολύ από μια πολιτική που στέλνει ενημερώσεις κατάστασης όσο το δυνατόν γρηγορότερα προκειμένου να μεγιστοποιήσει τη ρυθμαπόδοση (έτσι ώστε  $\rho \rightarrow 1$ ) ή από την άλλη μια πολιτική που θα ήθελε να ελαχιστοποιήσει την καθυστέρηση (έτσι ώστε  $\rho \rightarrow 0$ ). Ως αποτέλεσμα, είναι προφανές ότι το Age of Information είναι μια εντελώς διαφορετική μετρική των συστημάτων ουρών αναμονής, η οποία επιτυγχάνει να χαρακτηρίσει τη φρεσκάδα της πληροφορίας. Το τελευταίο δεν μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ορισμένες από τις παραδοσιακές μετρικές, όπως η ρυθμαπόδοση ή η καθυστέρηση.

### 2.1.3 Το M/D/1 Μοντέλο Συστήματος

Στο μοντέλο συστήματος M/D/1 [26], οι ενημερώσεις κατάστασης δημιουργούνται σύμφωνα με μια διαδικασία Poisson με μέσο ρυθμό  $\lambda$  όπως και πριν. Αλλά ο χρόνος εξυπηρέτησης πλέον είναι ντετερμινιστικός για όλα τα πακέτα και ίσος με  $D$ . Λόγω της πολυπλοκότητας της ανάλυσης, η ακριβής έκφραση AoI δεν παρέχεται στη βιβλιογραφία, αλλά έχει αποδειχθεί ότι η χρησιμοποίηση server που ελαχιστοποιεί τη μέση ηλικία βρέθηκε αριθμητικά να είναι  $\rho^* \approx 0.625$ .



Σχήμα 3: Μέση ηλικία έναντι χρησιμοποίησης server για τα συστήματα M/M/1, M/D/1 και D/M/1 και σταθερό ρυθμό εξυπηρέτησης  $\mu = 1$  [19]

### 2.1.4 Το D/M/1 Μοντέλο Συστήματος

Στο μοντέλο συστήματος D/M/1 [27], οι ενημερώσεις κατάστασης δημιουργούνται με ντετερμινιστική περίοδο  $D$  και οι χρόνοι εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένοι με τη μέση τιμή  $\frac{1}{\mu}$ . Το μέσο AoI για αυτό το είδος συστήματος είναι ίσο με:

$$\Delta_{D/M/1} = \frac{1}{\mu} * \left( \frac{1}{2\rho} + \frac{1}{1-\beta} \right), \quad (14)$$

όπου

$$0 \leq \beta \leq 1$$

είναι η λύση της εξίσωσης

$$\beta = L_X(\mu(1-\beta)),$$

στην οποία με  $L_X(\cdot)$  συμβολίζεται ο μετασχηματισμός Laplace [28] της κατανομής των interarrival times.

Εδώ, η βέλτιστη χρησιμοποίηση του server είναι  $\rho^* \approx 0.515$ .

Μια σύγκριση των εκφράσεων του AoI για τα 3 προαναφερθέντα συστήματα (M/M/1, M/D/1, D/M/1) φαίνεται στο Σχήμα 3, όπου κάποιος μπορεί να παρατηρήσει τη μεταβολή της Ηλικίας της Πληροφορίας σε σχέση με τη χρησιμοποίηση του server  $\rho$ .

Από τη γραφική παράσταση, συμπεραίνεται ότι η απόδοση των συστημάτων M/M/1 και M/D/1 είναι παρόμοια για μικρές τιμές του ρυθμού άφιξης  $\lambda$ . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για μικρές τιμές  $\lambda$ , ο χρόνος αναμονής είναι λιγότερο ευαίσθητος στο ρυθμό εξυπηρέτησης. Όμως, αντιθέτως, όσο μεγαλύτερη γίνεται η χρησιμοποίηση  $\rho$  του server, τόσο μεγαλύτερο είναι το χάσμα μεταξύ M/M/1 και M/D/1 όσον αφορά το μέσο AoI. Ακριβέστερα, καθώς αυξάνεται το  $\lambda$ , υπάρχουν περισσότερες ενημερώσεις κατάστασης στα συστήματα, άρα υπάρχουν περισσότερα πακέτα σε αναμονή για εξυπηρέτηση και ως αποτέλεσμα, ο ντετερμινιστικός server αποδίδει καλύτερα από τον server όπου οι χρόνοι εξυπηρέτησης κατανέμονται εκθετικά με μέσο όρο  $\frac{1}{\mu}$ . Τέλος, όσον αφορά το σύστημα D/M/1, είναι προφανές ότι επιτυγχάνει την καλύτερη απόδοση όσον αφορά το μέσο AoI για όλες τις τιμές χρησιμοποίησης server  $\rho$  (επιτυγχάνει σχεδόν το μισό της ηλικίας από την ηλικία του συστήματος M/M/1 για παράδειγμα).

Παρακάτω, δίνεται ο Πίνακας 1, ο οποίος συνοψίζει τα κύρια αποτελέσματα για την έκφραση AoI για διάφορα συστήματα ουρών αναμονής:

Πίνακας 1: Σύνοψη εκφράσεων AoI

Τύπος συστήματος	Έκφραση AoI	Υποθέσεις/Παρατηρήσεις
M/M/1 FIFO	$\Delta_{M/M/1} = \frac{1}{\mu} * (1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1-\rho}) [19, 29]$	-
M/D/1 FIFO	Μη ακριβής έκφραση λόγω πολυπλοκότητας	Βέλτιστη λύση για $\rho = 0.625$ [19, 29]
D/M/1 FIFO	$\Delta_{D/M/1} = \frac{1}{\mu} * (\frac{1}{2\rho} + \frac{1}{1-\beta}) [19, 29]$	$0 \leq \beta \leq 1$ είναι η λύση της εξίσωσης $\beta = L_X(\mu(1-\beta)),$ όπου $L_X(\cdot)$ είναι ο μετασχηματισμός Laplace της κατανομής των interarrival times.
Just in Time Lower Bound	$\Delta_{just-in-timeLB} = \frac{3}{2\mu} [19]$	Γίνεται παραγωγή του επόμενου πακέτου μόλις το πακέτο που εξυπηρετείται αυτή τη στιγμή ολοκληρώσει την εξυπηρέτησή του (μηδενική αναμονή, οπότε το πακέτο είναι όσο το δυνατόν πιο φρέσκο, επομένως lower bound για το AoI).
M/M/1 FIFO με πολλές πηγές	$\Delta_{i,M/M/1} = \frac{1}{\mu} * (\frac{\rho_i^2 * (1-\rho * \rho_{-i})}{(1-\rho) * (1-\rho_{-i})^3} + \frac{1}{1-\rho_{-i}} + \frac{1}{\rho_i}) [19]$	και $\rho_{-i} = \rho - \rho_i$
M/M/1 LIFO με πολλές πηγές (without preemption)	Ο αναλυτικός υπολογισμός είναι δύσκολος (μια υποπερίπτωση θα αναφερθεί παρακάτω) [19]	Without preemption: το νέο πακέτο αντικαθιστά όλα τα πακέτα που περιμένουν στην ουρά αλλά όχι αυτό που εξυπηρετείται αυτήν τη στιγμή.

M/M/1 LIFO με πολλές πηγές (with preemption)	$\Delta_{i,M/M/1,LCFS} = \frac{\lambda}{\lambda_i} * \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}\right)[19]$	With preemption: το νέο πακέτο αντικαθιστά όλα τα πακέτα που περιμένουν στην ουρά και αυτό που εξυπηρετείται αυτήν τη στιγμή.
M/M/∞ (upper bound)	$\Delta_{UB,M/M/\infty} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}[19]$	Όλα τα πακέτα είναι informative: αυτό σημαίνει ότι όλα τα πακέτα φέρουν τις πιο πρόσφατες πληροφορίες σε σύγκριση με τα πακέτα που φτάνουν στον προορισμό πριν από αυτά.
M/M/∞ (lower bound)	$\Delta_{LB,M/M/\infty} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda * \mu}{(\lambda + \mu)^3}[19]$	Ο χρόνος εξυπηρέτησης ενός πακέτου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από το interarrival time του επόμενου παραγόμενου πακέτου.
M/M/2 FIFO (upper bound)	$\Delta_{UB,M/M/2} = \frac{1}{\mu} * \left(1 + \frac{1}{2\rho} + \frac{2 * \mu * \rho^3}{(1 + \rho) * (1 - \rho)}\right)[19]$	Όλα τα πακέτα είναι informative.
M/M/1/1	$\Delta_{M/M/1/1} = \frac{1}{\lambda} + \frac{2}{\mu} - \frac{1}{\lambda + \mu}[19, 30]$	Ένα πακέτο που φτάνει ενώ ένα άλλο πακέτο εξυπηρετείται, απορρίπτεται και τα πακέτα που βρίσκουν τον server σε αδράνεια, λαμβάνουν άμεσα εξυπηρέτηση (δεν υπάρχει αναμονή).
M/M/1/2	$\Delta_{M/M/1/2} = \frac{1}{\lambda} + \frac{3}{\mu} - \frac{2(\lambda + \mu)}{\lambda^2 + \lambda * \mu + \mu^2}[19, 30]$	Ένα μόνο πακέτο μπορεί να διατηρηθεί στην ουρά αναμονής για μετάδοση εάν εξυπηρετείται άλλο πακέτο την ίδια στιγμή.
M/M/1/2*	$\Delta_{M/M/1/2*} = \frac{1}{\lambda} + \frac{2}{\mu} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2} + \frac{1}{\lambda + \mu} - \frac{2(\lambda + \mu)}{\lambda^2 + \lambda * \mu + \mu^2}[19, 30]$	Ένα πακέτο που φτάνει ενώ εξυπηρετείται ένα άλλο πακέτο μπορεί να διατηρηθεί στην ουρά αναμονής για μετάδοση. Ωστόσο, τα πακέτα που περιμένουν για μετάδοση αντικαθίστανται από πακέτα που δημιουργήθηκαν πιο πρόσφατα.

## 2.2 Δίκτυα Ανεκτά στην Καθυστέρηση

### 2.2.1 Γενικά Στοιχεία

Ένα Δίκτυο Ανεκτό στην Καθυστέρηση (Delay Tolerant Network-DTN) είναι ένα δίκτυο ικανό να διαχειρίζεται μεγάλες καθυστερήσεις και απώλεια δεδομένων αποτελεσματικά σε διάφορα αμφισβητούμενα σενάρια και περιβάλλοντα [33, 31, 32]. Τέτοια περιβάλλοντα είναι η επικοινωνία δικτύου έκτακτης ανάγκης μετά από μια καταστροφή, η επικοινωνία διαπλανητικών δικτύων, το δίκτυο επικοινωνίας ενός πεδίου μάχης, το περιβάλλον μετά από σεισμό, ακραία επίγεια περιβάλλοντα, ή απλά σχεδιασμένα δίκτυα στο διάστημα, κλπ. Ο όρος disruption-tolerant network χρησιμοποιείται επίσης περιστασιακά αντί του DTN. Το κύριο χαρακτηριστικό τέτοιων δικτύων είναι ότι μπορεί να μην έχουν μόνιμη συνδεσιμότητα μεταξύ οποιονδήποτε δύο κόμβων.

Αυτό το είδος δικτύων διαφέρει σημαντικά από τα παραδοσιακά δίκτυα TCP/IP που υπάρχουν στο Διαδίκτυο σήμερα, επειδή η σταθερή λειτουργία του πρωτοκόλλου TCP/IP βασίζεται σε τρία συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σύνδεσης [33]:

- i) Υπάρχει μια αξιόπιστη σύνδεση από άκρο σε άκρο (end-to-end) μεταξύ του κόμβου πηγής και του κόμβου προορισμού.
- ii) Ο μέγιστος χρόνος επιστροφής RTT (Round Trip Time) μεταξύ οποιωνδήποτε κόμβων δεν είναι μεγάλος.
- iii) Η πιθανότητα απώλειας μηνύματος κατά τη μετάδοση είναι πολύ μικρή.

Αντίθετα, μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του DTN είναι τα εξής [32, 33]:

1) **Αποσύνδεση και ποικιλία στα μοτίβα κινητικότητας.** Στο DTN, είναι αδύνατο να υπάρχει μια σύνδεση από άκρο σε άκρο καθώς και ένα ντετερμινιστικό μοτίβο κινητικότητας των κόμβων. Η κινητικότητα των κόμβων συνεπάγεται ότι οποιοδήποτε δύο κόμβοι στα δίκτυα μπορεί να μην συναντηθούν μεταξύ τους για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, παράγοντες όπως οι επιθέσεις σε κόμβους κατά τη διάρκεια στρατιωτικών επιχειρήσεων και οι φυσικές συνθήκες σε δίκτυα έκτακτης ανάγκης σεισμού θα μπορούσαν να προκαλέσουν ενεργή ή παθητική αποσύνδεση μεταξύ των κόμβων.

2) **Μεγάλη καθυστέρηση στις ουρές αναμονής.** Λόγω του γεγονότος ότι η αποσύνδεση-διακοπή είναι πολύ συχνή στο DTN, οι κόμβοι πρέπει να αποθηκεύουν προσωρινά τα μηνύματα και ο χρόνος ουράς μπορεί να ποικίλλει από δευτερόλεπτα έως και ολόκληρες ημέρες. Για παράδειγμα, στις διαστρικές επικοινωνίες η καθυστέρηση είναι συνήθως αρκετά λεπτά ή και μεγαλύτερη, ενώ σε ένα υποβρύχιο ακουστικό δίκτυο modem, ο χρόνος καθυστέρησης μετάδοσης είναι σχετικά μεγάλος. Αντίθετα, στα τυπικά δίκτυα του Διαδικτύου ο χρόνος αναμονής σπάνια υπερβαίνει το ένα δευτερόλεπτο.

3) **Περιορισμένοι πόροι.** Οι κόμβοι του DTN έχουν συνήθως περιορισμένη μνήμη, περιορισμένη ικανότητα επεξεργασίας και περιορισμένη ισχύ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται ειδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης στο DTN, τα οποία διαφέρουν σημαντικά από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στο

παραδοσιακό Διαδίκτυο.

4) **Υψηλό ποσοστό σφαλμάτων μετάδοσης δεδομένων.** Το γεγονός ότι το περιβάλλον στο DTN αλλάζει τόσο δυναμικά καθώς και η άγνωστη κινητικότητα των κόμβων DTN έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη πιθανότητα απώλειας πακέτων από ό,τι στα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνίας.

Από τα παραπάνω, είναι καταφανής η ζημία η οποία θα προκαλούνταν αν η παραδοσιακή σουίτα πρωτοκόλλων TCP/IP εφαρμοστεί απευθείας στα Delay Tolerant Networks. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου πως στα DTNs η καθυστέρηση είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη καθυστέρηση στο παραδοσιακό Διαδίκτυο, πολλά πακέτα αναμένεται να λήξουν άμεσα λόγω υπέρβασης του expiration date, χωρίς να περιέχουν κάποια λάθος πληροφορία, επομένως γίνονται drop από το δίκτυο, το οποίο υφίσταται απώλεια χρήσιμης πληροφορίας. Από την άλλη πλευρά, εξαιτίας του περιορισμού των διαθέσιμων πόρων του συστήματος (όπως αποθηκευτικός χώρος buffer), πολλά πακέτα πρόκειται να γίνουν drop χωρίς να έχουν γίνει expire, με συνέπεια και πάλι να χάνεται χρήσιμη πληροφορία από το δίκτυο και να μειώνονται δραματικά δείκτες ποιότητας, όπως η ρυθμαπόδοση του συστήματος.

## 2.2.2 Αρχιτεκτονική DTN

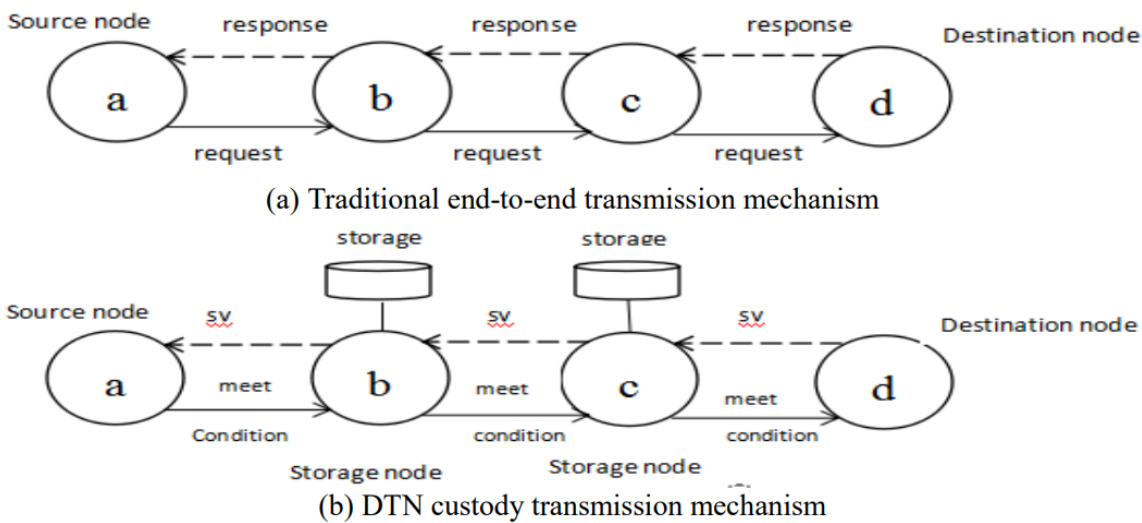
Όπως είναι γνωστό, το Διαδίκτυο είναι μια δομή δικτύου από διασυνδεδεμένα ετερογενή υποδίκτυα. Το DTN είναι επίσης ένα δίκτυο που διασυνδέει τοπικά υποδίκτυα. Η μόνη διαφορά είναι ότι στο DTN, υπάρχει ένα πρόσθετο επίπεδο μεταξύ του επιπέδου μεταφοράς και του επιπέδου εφαρμογής της σουίτας TCP/IP του παραδοσιακού Διαδικτύου, που ονομάζεται επίπεδο Buddle (Buddle layer) [33]. Αυτό το επίπεδο υλοποιεί έναν μηχανισμό μεταφοράς φύλαξης DTN μέσω ενός αποθηκευτικού χώρου αποθήκευσης μηνυμάτων, προκειμένου να μειωθεί ο αντίκτυπος της απουσίας σύνδεσης όσον αφορά τα μηνύματα. Πιο συγκεκριμένα, η κρυφή μνήμη (cache) κάθε κόμβου περιέχει ένα διάνυσμα σύνοψης (Summary Vector-SV) το οποίο καταγράφει τις πληροφορίες κατάστασης του δικού του κόμβου. Όταν συμβαίνει μια συνάντηση δύο κόμβων, το SV ανταλλάσσεται προκειμένου ο κόμβος να γνωρίζει τις πληροφορίες κατάστασης του άλλου κόμβου. Επιπλέον, το μήνυμα αποθηκεύεται επίσης. Ένα διάγραμμα αυτής της αλληλεπίδρασης φαίνεται στο Σχήμα 4.

## 2.2.3 Δρομολόγηση στο DTN

Η δρομολόγηση στο DTN αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση λόγω των συχνών και μεγάλων περιόδων μη συνδεσιμότητας. Έχουν προταθεί αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης στη βιβλιογραφία. Σε αυτή την εργασία, διαχωρίστηκαν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης DTN με βάση τη γνώση που έχουν χρησιμοποιήσει για την πρόβλεψη του μελλοντικού κόμβου αναμετάδοσης. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης DTN ταξινομούνται σε τέσσερις τύπους: encounter based, time based, infrastructure based and hybrid & others [32]. Η επεξήγηση αυτών των 4 τύπων είναι η εξής:

- **Encounter based routing:** Αυτή η κατηγορία αντιπροσωπεύει τα πρωτόκολλα που βασίζονται στον τρόπο με τον οποίο το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί το ιστορικό της συνάντησης μεταξύ των κόμβων για να προωθήσει τα μηνύματα. Όταν δύο κόμβοι βρίσκονται εντός της εμβέλειας μεταξύ τους, θεωρείται ότι έχουν συναντηθεί και το ιστορικό τέτοιων συναντήσεων διατηρείται στον κόμβο.





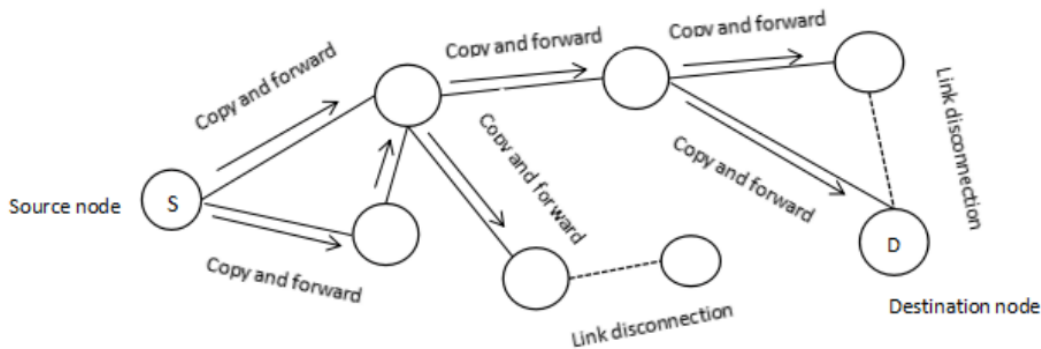
Σχήμα 4: Σύγκριση των μηχανισμών που χρησιμοποιούνται στο παραδοσιακό Διαδίκτυο έναντι του DTN [33]

- **Time based routing:** Αυτή η κατηγορία καθορίζει την πρόβλεψη επιλογής αναμετάδοσης με βάση οποιαδήποτε μετρική που σχετίζεται με το χρόνο, όπως το χρονικό διάστημα, η διάρκεια επαφής, ο χρόνος μεταξύ συναντήσεων ή ο χρόνος επαφής, κλπ.
- **Infrastructure Based Routing:** Αυτή η κατηγορία αντιπροσωπεύει τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα οποία χρησιμοποιούν πληροφορίες υποδομής για αποφάσεις δρομολόγησης. Αυτά τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν πληροφορίες θέσης κόμβων, διαδρομές που ακολουθούν, πληροφορίες χάρτη, κατεύθυνση κίνησης κόμβων κλπ. για καλύτερη επιλογή απόφασης για τον επόμενο κόμβο προώθησης.
- **Hybrid and Others Routing:** Τα πρωτόκολλα εκτός από εκείνα των παραπάνω κατηγοριών ή που χρησιμοποιούν πληροφορίες περισσότερων της μιας από τις παραπάνω κατηγορίες ανήκουν στην κατηγορία hybrid and others.

**Encounter based routing** Το encounter based routing εμπεριέχει όλα τα πρωτόκολλα στα οποία ο κάθε κόμβος χρησιμοποιεί κάποιου είδους ιστορικό συναντήσεων με όλους τους υπόλοιπους κόμβους για να προωθήσει τα πακέτα του. Όταν δύο κόμβοι έρχονται εντός της εμβέλειας ο ένας του άλλου, θεωρείται ότι έχουν συναντηθεί (encounter) και η πληροφορία αυτή αποθηκεύεται κατάλληλα. Αυτή η κατηγορία μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω ως:

a) **Flooding Based Routing:** ορίζει τα πρωτόκολλα δρομολόγησης όταν υπάρχει μηδενική γνώση για το ιστορικό συναντήσεων. Αυτό σημαίνει ότι αυτά τα πρωτόκολλα δε χρησιμοποιούν καμία στρατηγική για την επιλογή του κόμβου αναμετάδοσης. Η απλούστερη προσέγγιση που χρησιμοποιείται από αυτή την κατηγορία είναι η πλημμύρα του μηνύματος στον κόμβο με τον οποίο έρχεται σε επαφή, χωρίς καμία πρόβλεψη. Η προσέγγιση αυτή συνοψίζεται στο Epidemic Routing Protocol [36, 34, 35, 37, 32], το οποίο περιγράφεται παρακάτω:

**Epidemic Routing Protocol** Το Epidemic Routing Protocol είναι το απλούστερο multi-copy πρωτόκολλο στο DTN. Υιοθετεί έναν μηχανισμό δρομολόγησης πλημμυρών πολλαπλής αναπαραγωγής (multi-replication). Δύο κόμβοι αντιγράφουν και προωθούν το μήνυμα αμέσως μόλις συναντηθούν. Εάν ο τρέχων κόμβος δεν έχει προσβάσιμο μονοπάτι, τότε το μήνυμα αποθηκεύεται στην κρυφή μνήμη (buffer) και αποθηκεύεται εκεί για (αρκετά) μεγάλο χρονικό διάστημα. Το Epidemic Routing είναι μια αφελής (naïve) τεχνική δρομολόγησης μέσω της οποίας μπορεί να επιτευχθεί υψηλή πιθανότητα παράδοσης, αλλά με το κόστος της τεράστιας κατανάλωσης πόρων όπως το εύρος ζώνης, ο χώρος προσωρινής αποθήκευσης, η ισχύς κλπ. Με επαρκείς πόρους, το Epidemic Routing Protocol μπορεί να διαδώσει το αντίγραφο του μηνύματος όσο το δυνατόν γρηγορότερα για να επιτύχει μέγιστο ρυθμό παράδοσης και ελάχιστη καθυστέρηση μετάδοσης. Ωστόσο, στην πράξη, οι πόροι κάθε κόμβου είναι περιορισμένοι. Καθώς ο αριθμός των μηνυμάτων αυξάνεται, ο ανταγωνισμός για πόρους προκαλεί δραστηκή πτώση της απόδοσης του Epidemic Routing. Μια αναπαράσταση του αλγορίθμου παρέχεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Epidemic Routing Protocol στο DTN [33]

b) **Encounter Prediction Based:** αυτή η κατηγορία ορίζει την πρόβλεψη επιλογής κόμβου αναμετάδοσης με βάση την ιστορία της συνάντησης. Έτσι, αυτά τα πρωτόκολλα αξιοποιούν τη συμπεριφορά της συνάντησης στους κόμβους για να καθορίσουν τους καλύτερους κόμβους για περαιτέρω προώθηση του μηνύματος. Το πιο χαρακτηριστικό πρωτόκολλο που υπάγεται στην κατηγορία αυτή είναι το PROPHET [40, 39, 38, 41, 32], το οποίο συνοψίζεται παρακάτω:

**PROPHET** Το πρωτόκολλο PROPHET είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα Encounter Prediction Based πρωτόκολλα στο DTN. Πιο συγκεκριμένα, διατηρεί διάλυσμα πρόβλεψης μεταβατικής παράδοσης για τους κόμβους που συναντώνται και στη συνέχεια χρησιμοποιεί αυτή τη γνώση για την επιλογή του κόμβου αναμετάδοσης μεταξύ των κόμβων. Για κάθε κόμβο A, μια πιθανολογική μετρική προβλεψιμότητα παράδοσης  $p(A, B)$  υπολογίζεται, η οποία υποδηλώνει την πιθανότητα ο κόμβος A να παραδώσει επιτυχώς το μήνυμα σε κάθε γνωστό προορισμό B. Μαθηματικά, η μετρική αυτή αποτυπώνεται ως εξής:

$$p(A, B) = \begin{cases} p_{(A,B)old} + (1 - p_{(A,B)old}) * p_0, & \text{εάν ο A και ο B συναντηθούν} \\ p_{(A,B)old} * \gamma^k, & \text{ειδάλλως,} \end{cases}$$

όπου  $p_0 \in (0, 1)$  είναι μια σταθερά αρχικοποίησης και  $\gamma \in (0, 1)$  είναι μια σταθερά "γήρανσης",  $k$  είναι ο αριθμός των χρονικών μονάδων που έχουν παρέλθει από την τελευταία φορά που διαμορφώθηκε ο πίνακας. Όπως, μπορεί να παρατηρηθεί στη δεδομένη εξίσωση, η προβλεψιμότητα παράδοσης αυξάνεται με τη συχνή επαφή και γερνάει με την πάροδο του χρόνου εάν δε γίνονται επαφές-συναντήσεις. Πιο συγκεκριμένα, ένα μήνυμα με τελικό προορισμό στον κόμβο  $D$  πρόκειται να προωθηθεί στον  $A$  ή το  $B$ . Αυτό αποφασίζεται με βάση την προβλεψιμότητα παράδοσης: αν  $p(A,D) > p(B,D)$ , ο επόμενος παραλήπτης του μηνύματος είναι ο  $A$ , ειδάλλως είναι ο  $B$ .

**Time based routing** Αυτή η κατηγορία ορίζει την πρόβλεψη επιλογής κόμβου αναμετάδοσης με βάση οποιαδήποτε χρονική μετρική, όπως διάρκεια επαφής, inter-meeting time ή inter-contact time, κλπ. Ένα πολύ γνωστό πρωτόκολλο δρομολόγησης που υπάγεται σε αυτήν την κατηγορία είναι το Contact Duration Based Routing (CDBR) [32, 43, 42, 44], το οποίο συνοψίζεται παρακάτω:

**CDBR** Στο πρωτόκολλο αυτό, η διάρκεια του χρόνου επαφής μεταξύ του κόμβου  $A$  και του κόμβου  $B$  ορίζεται ως πιθανή διάρκεια επαφής για μια χρονική περίοδο  $T$  ως:

$$C(A, B) = \frac{1}{n-1} * \sum_{B=1, B \neq A}^n \frac{D(A, B)}{T},$$

όπου  $C(A, B)$  καθορίζει τη μέση πιθανότητα ένας αυθαίρετα επιλεγμένος κόμβος  $A$  στο δίκτυο να συναντήσει τον κόμβο  $B$  σε χρόνο  $T$ . Ο όρος  $D(A, B)$  καταγράφει τη αθροιστική διάρκεια επαφής των κόμβων  $A$  και  $B$  μέχρι τη στιγμή  $T$ .

**Infrastructure Based Routing** Αυτή η κατηγορία αντιπροσωπεύει τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα οποία χρησιμοποιούν πληροφορίες υποδομής για αποφάσεις δρομολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, τα πρωτόκολλα αυτά χρησιμοποιούν πληροφορίες, όπως η θέση των κόμβων, ολόκληρες διαδρομές που ακολουθούν, την κατεύθυνση κίνησης των κόμβων, κλπ., για καλύτερη λήψη απόφασης για την επιλογή του κόμβου αναμετάδοσης. Και αυτή η κατηγορία μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω σε Distance Based και Route or Map Based [32].

#### a) Distance Based

Τα πρωτόκολλα αυτά χρησιμοποιούν συντεταγμένες θέσης κόμβων για να υπολογίσουν την απόσταση μεταξύ των κόμβων και να αναλύσουν την κατεύθυνση της κίνησης. Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο MOVE [45, 32] (MOVement of VEHicle) αξιοποιεί την κίνηση των κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, το MOVE θεωρεί έναν κόμβο που κινείται προς τον κόμβο προορισμού ως κόμβο αναμετάδοσης.

#### b) Route or Map Based

Αυτοί οι τύποι πρωτοκόλλων χρησιμοποιούν πληροφορίες διαδρομής ή χάρτη όπου κινούνται οι κόμβοι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πρωτόκολλο World Model Based Routing (WMBR) [46, 32]. Σε αυτό, γίνεται εκμετάλλευση των παγκόσμιων μοντέλων, με σκοπό την επιλογή του κόμβου αναμετάδοσης και την εύρεση της θέσης του κόμβου προορισμού. Πιο συγκεκριμένα, το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί το γεγονός ότι οι κινητές συσκευές που μεταφέρονται από τους ανθρώπους τείνουν να ακολουθούν το επαναλαμβανόμενο μοτίβο κίνησης. Το WMBR χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για την δημιουργία των προφίλ χρήστη, τα οποία βοηθούν περαιτέρω στην επιλογή των κόμβων αναμετάδοσης.

**Hybrid and Others Routing** Σε αυτήν την κατηγορία υπάγονται όσα πρωτόκολλα δε χρησιμοποιούν καμία από τις πληροφορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω ή όσα χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό από τα στοιχεία αυτά. Για παράδειγμα, ένα πρωτόκολλο που σίγουρα δεν μπορεί να υπαχθεί σε καμία από τις 3 παραπάνω κατηγορίες είναι το πρωτόκολλο Simbet [32, 47], το οποίο βασίζεται σε ιδιότητες, όπως η ομοιότητα και η ενδιαμεσικότητα (betweenness) μεταξύ των κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας κόμβος A αλληλεπιδρά με έναν άλλο κόμβο B, ο A υπολογίζει τη σχετική ομοιότητα του  $SimUtil_A(D)$  και την betweenness utility  $BetUtil_A$  με τον κόμβο B για παράδοση του μηνύματος στον κόμβο προορισμού D. Μαθηματικά, αυτά εκφράζονται ως εξής:

$$SimUtil_A(D) = \frac{Sim_A(D)}{Sim_A(D) + Sim_B(D)},$$

όπου ο όρος  $Sim_X(Y)$  υποδηλώνει την ομοιότητα μεταξύ των κόμβων X και Y. Με άλλα λόγια, ισούται με τον αριθμό των κόμβων που είναι γείτονες τόσο με τον X όσο και με τον Y, το οποίο εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$Sim_X(Y) = |N_X \cap N_Y|,$$

όπου  $N_X$  είναι το σύνολο των κόμβων που είναι σε επαφή με τον κόμβο X αυτή τη χρονική στιγμή.

Ομοίως, η Betweenness utility  $BetUtil_A$  υπολογίζεται ως:

$$BetUtil_A = \frac{Bet_A}{Bet_A + Bet_B},$$

όπου  $Bet_X$  είναι η ενδιαμεσική κεντρικότητα (betweenness centrality) του κόμβου X. Η μετρική αυτή υποδηλώνει πόσο σημαντικός είναι ένας κόμβος στο ζήτημα της συνδεσιμότητας μεταξύ όλων των κόμβων του γράφου.

Τελικά, συνδυάζοντας τις 2 μετρικές αυτές, η SimBet utility ενός κόμβου A για έναν κόμβο-προορισμό D ισούται με:

$$SimBetUtil_A(D) = a * SimUtil_A(D) + (1 - a) * BetUtil_A.$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση, η παράμετρος a καθορίζει το ποια από τις 2 μετρικές έχει την μεγαλύτερη σημασία για την τελική επιλογή της SimBet utility.

Παρακάτω, ο Πίνακας 2 συνοψίζει τα βασικά σημεία των κύριων πρωτοκόλλων δρομολόγησης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

Πίνακας 2: Σύνοψη των υφιστάμενων πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα DTN

Πρωτόκολλο Δρομολόγησης	Τύπος	Περιγραφή	Παράμετροι	Παρατηρήσεις/Σχόλια
Epidemic Routing Protocol [31, 33, 32]	Encounter Based Routing (Flooding Based Routing)	Δημιουργεί πολλαπλά αντίγραφα του μηνύματος και μεταφέρει μηνύματα όταν ένας κόμβος έρχεται σε επαφή με άλλους κόμβους.	Το μέγεθος του buffer κάθε κόμβου	Παραδίδει όλα τα μεταδιδόμενα μηνύματα με απεριόριστο μέγεθος buffer, καταναλώνει τεράστιο όγκο πόρων όπως η ισχύς, η χωρητικότητα του buffer και το εύρος ζώνης.
Prioritized Epidemic Routing [31, 48]	Encounter Based Routing (Flooding Based Routing)	Όπως και στο Epidemic Routing αλλά επιβάλλει συναρτήσεις προτεραιότητας (priority functions) στη μετάδοση και διαγραφή δεδομένων. Συνεπώς, τα δεδομένα μπορούν να ταξινομηθούν με σειρά προτεραιότητας που ονομάζεται bundle προς μετάδοση.	-	Η προτεραιότητα μπορεί να αποφασιστεί με βάση το τρέχον κόστος για τον προορισμό ή την πηγή, το χρόνο λήξης και το χρόνο παραγωγής. Υπερέχει του Epidemic Routing Protocol όσον αφορά την πυκνότητα και την αποθήκευση των κόμβων.
Tree based Flooding [31, 49]	Encounter Based Routing (Flooding Based Routing)	Όπως και στο Epidemic Routing, αλλά το μήνυμα αναπαράγεται σε μια δομή δέντρου, ενώ ο αριθμός των αντιγράφων ελέγχεται, υποδεικνύοντας τον αριθμό των αντιγράφων που θα παραχθούν κατά την αντιγραφή στον κόμβο αναμετάδοσης.	-	Μια στρατηγική για τα αντίγραφα θα μπορούσε να είναι η δημιουργία απροσδιόριστου αριθμού αντιγράφων αλλά ο περιορισμός του αριθμού των βημάτων (hops) που θα μπορούσαν να διανυθούν, περιορίζοντας έτσι το βάθος των δέντρων αλλά όχι το πλάτος. Μια διαφορετική προσέγγιση θα μπορούσε να είναι ο περιορισμός του αριθμού των αντιγράφων.

Direct Delivery (DD) or Direct Contact (DC) [31, 32, 33]	Encounter Based Routing (Flooding Based Routing)	Μεταφέρει το μήνυμα μόνο όταν έρχεται σε επαφή με τον κόμβο προορισμού.	-	Πολύ μικρή πιθανότητα επιτυχούς μεταφοράς.
Two-Hop-Relay [49, 31, 50]	Encounter Based Routing (Flooding Based Routing)	Αναπαράγει κάθε μήνυμα στους πρώτους N κόμβους που συναντάει και μετά από αυτό, κάθε μήνυμα μεταφέρεται από αυτούς τους N κόμβους μέσω Direct Contact (DC) στον κόμβο προορισμού.	Επιλογή του N	Στο δεύτερο στάδιο, συμπεριφέρεται ως Direct Contact. Φυσικά μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχίας από το DC.
Probabilistic Routing [51, 31]	Encounter Based Routing (Flooding Based Routing)	Το μήνυμα παραδίδεται σε έναν άλλο κόμβο μόνο εάν η πιθανότητα επαφής του με κάποιον άλλο κόμβο είναι πολύ πάνω από κάποιο ορισμένο όριο πιθανότητας (threshold). Το μήνυμα προωθείται κατά μήκος των μονοπατιών υψηλότερης πιθανότητας.	Επιλογή του threshold	Λειτουργεί με την πιθανότητα επαφής ενός κόμβου με έναν άλλο κόμβο.

Spray and Wait [31, 32, 33, 52]	Encounter Based Routing (Flooding Based Routing)	Στο στάδιο του Spray, ο κόμβος πηγής "ψεκάζει" αντίγραφα του μηνύματος σε έναν προκαθορισμένο αριθμό διακριτών κόμβων αναμετάδοσης και, στη συνέχεια, στο στάδιο Wait, αυτοί οι αναμεταδότες εκτελούν Direct Delivery στον προορισμό (εάν το μήνυμα δεν έχει ήδη μεταδοθεί στη φάση Spray).	Επιλογή του αριθμού των διακριτών κόμβων αναμετάδοσης	Είναι μια συνδυασμένη προσέγγιση των Epidemic και Direct Contact πρωτοκόλλων.
First Contact (FC) [53, 32]	Encounter Based Routing (Encounter Prediction Based)	Επιλέγει τυχαία την επόμενη μετάβαση από όλους τους υπάρχοντες γείτονες, ωστόσο εάν δεν υπάρχει τέτοια επαφή, τότε ο κόμβος πηγής περιμένει μέχρι να γίνει διαθέσιμος ο γείτονας.	-	Αυτός είναι ένας αλγόριθμος που βασίζεται σε πρόβλεψη ενός hop και όλοι οι γείτονες υποτίθεται ότι είναι εξίσου ικανοί να προωθήσουν το μήνυμα στον προορισμό.

<p>PROPHET [40, 39, 38, 41, 32]</p>	<p>Encounter Based Routing (Encounter Prediction Based)</p>	<p>Για κάθε κόμβο A, μια πιθανολογική μετρική προβλεψιμότητας παράδοσης <math>p(A, B)</math> υπολογίζεται, η οποία υποδηλώνει την πιθανότητα ο κόμβος A να παραδώσει επιτυχώς το μήνυμα σε κάθε γνωστό προορισμό B.</p> <p><math>p(A,B)^1</math></p> <p>Όπως, μπορεί να παρατηρηθεί στη δεδομένη εξίσωση, η προβλεψιμότητα παράδοσης αυξάνεται με τη συχνή επαφή και "γερνάει" με την πάροδο του χρόνου, εάν δεν πραγματοποιηθούν επαφές.</p>	<p><math>p_0 \in (0,1)</math> είναι μια σταθερά αρχικοποίησης και <math>\gamma \in (0,1)</math> είναι μια σταθερά "γήρανσης", <math>k</math> είναι ο αριθμός των χρονικών μονάδων που έχουν παρέλθει από την τελευταία φορά που διαμορφώθηκε ο πίνακας.</p>	<p>Διατηρεί ένα διάνυσμα πρόβλεψης μεταβατικής παράδοσης για τους κόμβους που συναντώνται και στη συνέχεια χρησιμοποιεί αυτή τη γνώση για την επιλογή αναμετάδοσης μεταξύ των κόμβων.</p>
<p>MaxProp [54, 31, 32]</p>	<p>Encounter Based Routing (Encounter Prediction Based)</p>	<p>Κάθε κόμβος διατηρεί ένα διάνυσμα συνολικού αριθμού κόμβων στο δίκτυο. Κατά τη συνάντηση ενός κόμβου με έναν άλλο, αυτά τα διανύσματα ανταλλάσσονται μεταξύ τους, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της συντομότερης διαδρομής προς τον κόμβο προορισμού.</p>	<p>-</p>	<p>Υπολογίζει τη μέγιστη πιθανότητα παράδοσης με βάση τη συχνότητα επαφής και τα αποθηκευμένα μηνύματα.</p>

1

$$p(A, B) = \begin{cases} p_{(A,B)old} + (1 - p_{(A,B)old}) * p_0, & \text{εάν ο A και ο B συναντηθούν} \\ p_{(A,B)old} * \gamma^k, & \text{ειδάλλως} \end{cases}$$



Delegation forwarding (DF) [32, 55]	Encounter Based Routing (Encounter Prediction Based)	Καθορίζει μια τιμή κατωφλίου, η οποία είναι ίση με τη utility metric του κόμβου προορισμού. Αυτό το πρωτόκολλο υιοθετεί μια απλοϊκή προσέγγιση μεταφοράς των μηνυμάτων στον κόμβο που έχει υψηλότερη utility value σε σύγκριση με συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου (threshold) αντί να επιλέγει τον κόμβο αναμετάδοσης συγκρίνοντας τα utility metrics όλων των κόμβων	-	-
Encounter Based Routing (EBR) [32, 56]	Encounter Based Routing (Encounter Prediction Based)	Κάθε κόμβος στο EBR διατηρεί ένα Encounter Value (EV) και το τρέχον Window Counter (WC). Εδώ, το Encounter Value είναι ο ρυθμός προηγούμενης συνάντησης και το Window Counter είναι ο αριθμός των συναντήσεων στο τρέχον παράθυρο χρόνου. Παρατηρείται ότι εάν ένας κόμβος συναντάται πιο συχνά στον προορισμό, τότε έχει περισσότερες πιθανότητες να παραδώσει ένα μήνυμα.	-	Μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση του πρωτοκόλλου Spray and Wait και βασίζεται στην προηγούμενη εμπειρία συνάντησης κόμβων.

Fresher encounter search (FRESH) [32, 57]	Encounter Based Routing (Encounter Prediction Based)	Το μήνυμα μεταφέρεται από τον αποστολέα στον κόμβο που έχει την πιο πρόσφατη συνάντηση με τον κόμβο προορισμού.	-	Βασίζεται στις πιο πρόσφατες συναντήσεις.
Contact Duration Based Routing (CDBR) [32, 43, 42, 44]	Time Based Routing	Η διάρκεια του χρόνου επαφής μεταξύ του κόμβου A και του κόμβου B ορίζεται ως πιθανή διάρκεια επαφής για μια χρονική περίοδο T ως: $C(A,B)^2$ όπου C(A, B) καθορίζει τη μέση πιθανότητα ένας αυθαίρετα επιλεγμένος κόμβος A στο δίκτυο να συναντήσει τον κόμβο B σε χρόνο T. Το D(A, B) καταγράφει τη αθροιστική διάρκεια επαφής των κόμβων A και B μέχρι τη στιγμή T.	-	-

$$C(A, B) = \frac{1}{n-1} * \sum_{B=1, B \neq A}^n \frac{D(A, B)}{T}$$

SEDUM [58, 32]	Time Based Routing	<p>To Duration Utility <math>DU(A, B)</math> μεταξύ των κόμβων A και B μετρά την ικανότητα μετάδοσης μεταξύ τους και δίνεται ως:</p> $DU(A,B)^3$ <p>όπου <math>t_k(A, B)</math> είναι η διάρκεια επαφής της κ-οστής συνάντησης και η συχνότητα επαφής <math>f</math> του κόμβου A με έναν κόμβο B είναι ο αριθμός των φορών που συναντήθηκαν σε μια χρονική περίοδο T.</p>	-	<p>Αντί να χρησιμοποιεί μόνο τη συχνότητα επαφής για το Duration Utility στην πιθανολογική δρομολόγηση, λαμβάνει επίσης υπόψη τη συσσωρευτική (αθροιστική) διάρκεια επαφής εντός χρονικής περιόδου.</p>
Seek-and-Focus Protocol [59, 32]	Time Based Routing	<p>Αυτό το πρωτόκολλο αναζητά αρχικά έναν κόμβο αναμετάδοσης με βάση τη χρησιμότητα παράδοσης (delivery utility) και στη συνέχεια μετακινείται στη φάση Focus, αναζητώντας εάν ένας καλύτερος κόμβος αναμετάδοσης με πιο πρόσφατο χρόνο συνάντησης με τον κόμβο προορισμού βρεθεί στην περιοχή.</p>	-	-

$$DU(A, B) = \frac{\sum_{k=1}^{f*T} t_k(A, B)}{T}$$

Space and Time routing protocol [60, 32]	Time Based Routing	Η επόμενη επιλογή hop βασίζεται στις πληροφορίες των σημερινών και μελλοντικών γειτόνων. Επιπλέον, σε αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιείται γράφημα χρονισμού χώρου που απεικονίζει την κινητικότητα των κόμβων.	-	-
Predict and Spread (PreS) [32, 61]	Time Based Routing	Χρησιμοποιεί time homogeneous αλυσίδες Markov για να μοντελοποιήσει την κινητικότητα κάθε κόμβου.	-	-
Resource allocation routing for DTN paradigm (RAPID) [62, 32]	Time Based Routing	Μοντελοποιεί το πρόβλημα δρομολόγησης ως πρόβλημα κατανομής πόρων και προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την καθυστέρηση παράδοσης του μηνύματος. Για τη βέλτιστη χρήση των πόρων, μικρότερος αριθμός αντιγράφων ενός μηνύματος προωθείται στο δίκτυο.	-	-

Delay Tolerant Link State Routing (DTLSR) [63, 32, 31]	Time Based Routing	Επεκτείνει την έννοια της δρομολόγησης κατάστασης σύνδεσης σε δυναμική ρύθμιση DTN. Χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Dijkstra για να υπολογίσει τη συντομότερη διαδρομή, χρησιμοποιώντας τη μετρική αναμενόμενης καθυστέρησης (ME-ED).	-	-
Link Metric Routing [31, 49]	Time Based Routing	Λειτουργεί δημιουργώντας ένα γράφημα τοπολογίας, εκχωρώντας βάρη σε κάθε σύνδεσμο και, τέλος, εκτελώντας έναν αλγόριθμο συντομότερης διαδρομής. Το μήνυμα προωθείται κατά μήκος της διαδρομής με ελάχιστο συνολικό βάρος.	-	Η πρόκληση εδώ είναι να εκχωρηθούν εκείνα τα βάρη που παρέχουν το υψηλότερο εύρος ζώνης και το υψηλότερο ποσοστό παράδοσης, ενώ ελαχιστοποιούν τον λανθάνοντα χρόνο παράδοσης και την κατανάλωση πόρων, όπως ο χώρος του buffer ή η ισχύς.
MOvement of VEhicle (MOVE) Protocol [32, 45]	Infrastructure Based Routing (Distance Based)	Χρησιμοποιεί την κινητικότητα των κόμβων. Το MOVE θεωρεί έναν κόμβο που κινείται προς τον κόμβο προορισμού ως πιθανό κόμβο αναμετάδοσης.	-	Καθώς η κίνηση των οχημάτων είναι προβλέψιμη σε ένα δίκτυο οχημάτων, το πρωτόκολλο MOVE μπορεί να είναι μια καλή επιλογή.
Distance Aware Epidemic Routing (DAER) [32, 64]	Infrastructure Based Routing (Distance Based)	Χρησιμοποιεί την απόσταση από τον προορισμό για να αξιολογήσει τη utility metric.	-	Περιορίζοντας τον αριθμό των αντιγράφων στο δίκτυο, αυτό το πρωτόκολλο προκαλεί μικρότερη επιβάρυνση.

<p>Location based routing [32, 65]</p>	<p>Infrastructure Based Routing (Distance Based)</p>	<p>Λειτουργεί αναθέτοντας συνεταγμένες στους κόμβους του δικτύου. Μια συνάρτηση απόστασης (distance function) καθορίζει το κόστος προσέγγισης οποιουδήποτε κόμβου στο δίκτυο. Αυτή η στρατηγική δεν απαιτεί πίνακες δρομολόγησης και έχει επίσης μικρότερο κόστος ελέγχου αφού μόνο οι συνεταγμένες της πηγής, του προορισμού και της επόμενης μετάβασης απαιτούνται.</p>	<p>-</p>	<p>Η εγγύτητα σε απόσταση δεν παρέχει εγγύηση για οποιαδήποτε εγκατάσταση σύνδεσης και σε ένα ταχέως μεταβαλλόμενο περιβάλλον οι συνεταγμένες πρέπει να ενημερώνονται γρήγορα.</p>
--	--	---	----------	--

<p>Gradient Routing [32, 49]</p>	<p>Infrastructure Based Routing (Route or Map Based Based)</p>	<p>Αναθέτει ένα βάρος σε κάθε κόμβο που καθορίζει την καταλληλότητα αυτού του κόμβου να παραδώσει το μήνυμα στον προορισμό. Η μέτρηση μπορεί να βασίζεται σε πολλές παραμέτρους, όπως ο χρόνος μεταξύ των επαφών, η κινητικότητα, η πιθανότητα παράδοσης ή η υπολειπόμενη ισχύς κλπ. Σε επαφή με έναν κόμβο που έχει καλύτερη τιμή μετρικής, το μήνυμα παραδίδεται σε αυτόν τον κόμβο. Ως εκ τούτου, ακολουθείται μια κατεύθυνση βελτίωσης της utility function.</p>	<p>-</p>	<p>Αυτό το σχήμα απαιτεί περισσότερες γνώσεις δικτύου από το location based routing, επειδή πρέπει να διατηρείται μια μέτρηση πληροφοριών σχετικά με τους προορισμούς σε κάθε κόμβο και για τον υπολογισμό, του επαρκούς πληροφορίας πρέπει να διαδοθούν μέσω του δικτύου σε όλους τους κόμβους.</p>
<p>Source Routing [31, 65]</p>	<p>Infrastructure Based Routing (Route or Map Based Based)</p>	<p>Μόνο η πηγή πρέπει να γνωρίζει ολόκληρη την τοπολογία του δικτύου. Η πηγή καθορίζει τη διαδρομή που θα ακολουθήσει το πακέτο.</p>	<p>-</p>	<p>Η πηγή πρέπει να είναι αρκετά έξυπνη για να αποφασίσει για την εγγύτητα της στον προορισμό σε hops για να έχει καλύτερη απόδοση.</p>
<p>Per Hop Routing [31, 66]</p>	<p>Infrastructure Based Routing (Route or Map Based Based)</p>	<p>Το ενδιάμεσο hop ή κόμβος αποφασίζει για το επόμενο hop ή κόμβο στον οποίο θα προωθηθεί το datagram σύμφωνα με την τοπολογία δικτύου που έχει συγκεντρώσει.</p>	<p>-</p>	<p>-</p>

Per Contact Routing [31, 66]	Infrastructure Based Routing (Route or Map Based)	Διατηρείται ένας ενημερωμένος πίνακας δρομολόγησης. Η ενημέρωση γίνεται σε κάθε επαφή. Επομένως, κάθε φορά που προωθείται ένα datagram, αυτό γίνεται με βάση τις πιο πρόσφατες πληροφορίες τοπολογίας δικτύου.	-	Οι ενημερώσεις μπορεί να δημιουργήσουν loops στο δίκτυο.
World Model Based Routing (WMBR) [46, 32]	Infrastructure Based Routing (Route or Map Based)	Χρησιμοποιεί το γεγονός ότι οι κινητές συσκευές που μεταφέρονται από τα ανθρώπινα όντα τείνουν να ακολουθούν το επαναλαμβανόμενο μοτίβο κίνησης. Το WMBR χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για να δημιουργήσει τα προφίλ χρήστη, τα οποία βοηθούν περαιτέρω στην επιλογή των κόμβων αναμετάδοσης.	-	Εχμεταλλεύεται το πλεονέκτημα των world models για την επιλογή του κόμβου αναμετάδοσης και την εύρεση της θέσης του κόμβου προορισμού.
Message ferrying (MF) [67, 32]	Infrastructure Based Routing (Route or Map Based)	Αυτός ο τύπος δρομολόγησης παρακολουθεί την τροχιά των κόμβων για βελτίωση της απόδοσης. Χρησιμοποιεί έναν ειδικό κόμβο που έχει κάποιο βαθμό χωρητικότητας αποθήκευσης.	-	-



<p>Μια καινοτόμα προσέγγιση που βασίζεται στη φήμη [32, 68]</p>	<p>Hybrid and Others Routing</p>	<p>Σε αυτό το σχήμα, οι "ανυπάκουοι" κόμβοι αναγνωρίζονται και δεν εμπλέκονται περαιτέρω στη δρομολόγηση DTN. Υπάρχουν δύο εκδόσεις του πρωτοκόλλου: (i) Epidemic forwarding και (ii) Delegation forwarding. Στην Epidemic forwarding, τα μηνύματα μεταφέρονται σε κόμβους που συναντώνται κυρίως και στην Delegation forwarding τα μηνύματα μεταφέρονται σύμφωνα με τις δυνατότητες προώθησης του κόμβου.</p>	<p>-</p>	<p>-</p>
---	----------------------------------	--	----------	----------

<p>Neighbourhood contact history routing (NECTAR) [69, 32]</p>	<p>Hybrid and Others Routing</p>	<p>Καθορίζεται από τον αριθμό hop των κόμβων που συναντώνται κατά ζεύγη και τη διάρκεια της συνάντησής τους. Χρησιμοποιώντας αυτές τις μετρήσεις, το NECTAR υπολογίζει τον δείκτη γειτονιάς. Χρησιμοποιεί επίσης threshold για να ορίσει τη διάρκεια ζωής του μηνύματος. Τα μηνύματα κάτω από την τιμή κατωφλίου μεταφέρονται με epidemic routing, ειδάλως ο δείκτης γειτονιάς χρησιμοποιείται για την αναπαραγωγή μηνυμάτων με ελεγχόμενο τρόπο.</p>	<p>Επιλογή του threshold</p>	<p>-</p>
--	----------------------------------	---	------------------------------	----------

A data diffusion approach [70, 32]	Hybrid and Others Routing	Χρησιμοποιεί το φαινόμενο της "ομοφιλίας" που είναι πανταχού παρόν στα κοινωνικά δίκτυα. Τα σχήματα διάχυσης δεδομένων προσπαθούν να μεταφέρουν δεδομένα σε κάθε κόμβο του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούν την πιθανότητα επαφής μεταξύ των κόμβων. Βασικά, το πρωτόκολλο εφαρμόζει φιλία για την επιλογή του κατάλληλου κόμβου αναμετάδοσης και ομοφιλία για την επιλογή κατάλληλου στοιχείου δεδομένων στο buffer.	-	-
Erasure Coding [71, 32]	Hybrid and Others Routing	Το Erasure Coding κωδικοποιεί τα αρχικά μηνύματα σε αριθμό μπλοκ.	-	-
Network Coding scheme [71, 32]	Hybrid and Others Routing	Το Network Coding Scheme χρησιμοποιεί την προσέγγιση της θεωρίας πληροφορίας. Συνδυάζει μερικά πακέτα για να δημιουργήσει ένα νέο πακέτο για να το στείλει ως νέο υπερ-πακέτο.	-	-

<p>Minimizing Relay node and Hop count (MRH) [32, 72]</p>	<p>Hybrid and Others Routing</p>	<p>Αναζητά τη βέλτιστη διαδρομή με βάση την απαίτηση επισκεψιμότητας και τον αριθμό hops. Μια άλλη μορφή MRH που χρησιμοποιεί τη συντομότερη καθυστέρηση στον προορισμό είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμετάδοσης και του χρόνου παράδοσης.</p>	<p>-</p>	<p>-</p>
<p>Network Central Location (NCL) [73, 74, 32]</p>	<p>Hybrid and Others Routing</p>	<p>Επιλέγει κάποιον κόμβο που είναι εύκολα προσβάσιμος από άλλους κόμβους του δικτύου για την αποθήκευση δεδομένων. Για την επιλογή κόμβων NCL, χρησιμοποιείται μετρική πιθανολογικής επιλογής.</p>	<p>-</p>	<p>-</p>

<p>Context information predication for routing in OppNets (CiPRO) [75, 32]</p>	<p>Hybrid and Others Routing</p>	<p>Χρησιμοποιεί κατακερματισμό για τον έλεγχο των μηνυμάτων. Όταν συναντώνται δύο κόμβοι, ο αποστολέας στέλνει ένα μήνυμα ελέγχου σε όλους τους άμεσους γείτονες που έχουν πληροφορίες σχετικά με το όνομα, τη διεύθυνση, τον χώρο εργασίας, την εθνικότητα, τα χόμπι κλπ. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για την εύρεση της πιθανότητας εμφάνισης κόμβων προς τον προορισμό.</p>	<p>-</p>	<p>-</p>
--	----------------------------------	--	----------	----------

<p>Prioritized epidemic (PREP) [76, 32]</p>	<p>Hybrid and Others Routing</p>	<p>Είναι μια παραλλαγή του epidemic routing. Το πρόβλημα του epidemic είναι ότι όταν αυξάνεται το φορτίο στο δίκτυο, η επιδημία αρχίζει να απορρίπτει σημαντικά μηνύματα που επηρεάζουν την αναλογία παράδοσης καθώς δεν εφαρμόζει κανένα σχέδιο για την ιεράρχηση των μηνυμάτων. Από την άλλη πλευρά, το PREP καθορίζει το γενικό κόστος για έναν προορισμό και τον χρόνο λήξης του μηνύματος, που βοηθούν στην απόφαση για το ποιο μήνυμα θα απορριφθεί.</p>	<p>-</p>	<p>Επιλύει το μειονέκτημα του epidemic protocol, δίνοντας προτεραιότητα στα μηνύματα.</p>
---	----------------------------------	--	----------	---

## 3 Το Πρωτόκολλο FRESH και Προτεινόμενες Παραλλαγές

### 3.1 Περιγραφή Πρωτοκόλλου FRESH

Το πρωτόκολλο FRESH [57] είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται ευρέως στα DTNs. Πιο συγκεκριμένα, έχει τις ρίζες του στη γενικότερη κατηγορία των Mobile Ad-hoc Networks (MANET), ενώ εξαιτίας του γεγονότος πως βασίζεται πρωτίστως στα encounter times, συγκαταλέγεται στα Encounter Based Πρωτόκολλα δρομολόγησης στο DTN. Η λειτουργία του είναι σχετικά απλή και περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω:

Κάθε κόμβος του δικτύου DTN διατηρεί ένα αρχείο (διάγραμμα), το οποίο περιέχει τα πιο πρόσφατα encounter times του κόμβου αυτού με όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Σε κάθε βήμα, αντί να ψάχνει μόνο για τον κόμβο-προορισμό, ο κόμβος-πηγή ψάχνει σε κοντινούς του κόμβους (η έννοια του κοντινού θα εξηγηθεί καλύτερα παρακάτω) εκείνον τον κόμβο που είχε επαφή με τον κόμβο-προορισμό πιο πρόσφατα από την αντίστοιχη επαφή του κόμβου-πηγής με τον κόμβο-προορισμό. Εν συνεχεία, το βήμα αυτό επαναλαμβάνεται έως ότου ο προορισμός παραλάβει επιτυχώς το μήνυμα. Στην [57], οι Dubois-Ferriere, Grossglauser και Vetterli έχουν αποδείξει πως η συνολική διαδρομή που θα ακολουθήσει το κάθε πακέτο δεν περιέχει κύκλο (loop-free), καθώς σε κάθε βήμα του αλγορίθμου το encounter age μειώνεται μονοτονικά έως ότου βρεθεί ο κόμβος-προορισμός σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων, με μοναδική προϋπόθεση βέβαια ο κόμβος-πηγή και ο κόμβος-προορισμός να ανήκουν σε ένα συνδεδεμένο υποσύνολο του γράφου (connected subset of nodes). Επιπλέον, είναι φανερό πως ο αλγόριθμος δεν απαιτεί κάποια γενική γνώση του δικτύου, επομένως μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί ως ένα κατανεμημένο σύστημα, διότι σε κάθε βήμα, ο εκάστοτε κόμβος ενδιαφέρεται μόνο για το δικό του τοπικό encounter table.

Μία συνάντηση (encounter) μεταξύ 2 κόμβων συμβαίνει όταν οι κόμβοι αυτοί είναι one-hop γείτονες. Δεδομένου πως η one-hop γειτνίαση εξαρτάται από το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (link layer), η ακριβής συνθήκη προκειμένου να λάβει χώρα ένα encounter ποικίλει, καθώς εξαρτάται από την εκάστοτε ασύρματη τοπολογία που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, το εύρος συνδεσιμότητας του 802.11b μπορεί να υπερβεί τα 250 μέτρα, ενώ από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία Bluetooth έχει εύρος μόνο μερικών μέτρων το πολύ. Το encounter age μεταξύ 2 κόμβων ισούται με το χρόνο που έχει περάσει από την πιο πρόσφατη συνάντηση των κόμβων αυτών. Ο τρόπος καθορισμού των γειτόνων σε κάθε χρονική στιγμή σε επίπεδο υλοποίησης ποικίλει και πάλι ανάλογα με την επιλογή του επιπέδου ζεύξης δεδομένων (παραδείγματος χάριν αποστολή κανονικών ή Hello<sup>4</sup> πακέτων μεταξύ των γειτόνων).

<sup>4</sup>Ένα ενδιαφέρον κομμάτι του πρωτοκόλλου δρομολόγησης FRESH είναι ο προσδιορισμός του όρου "κοντινού

---

<sup>4</sup>Ένα πακέτο Hello είναι ένα ειδικό πακέτο δεδομένων (μήνυμα) που αποστέλλεται περιοδικά από έναν δρομολογητή για να δημιουργήσει και να επιβεβαιώσει σχέσεις γειτνίασης δικτύου με άλλους δρομολογητές. Τα πακέτα Hello χρησιμοποιούνται κυρίως κατά την εφαρμογή του πρωτοκόλλου δρομολόγησης OSPF (Open Shortest Path First) αλλά και γενικότερα σε περιπτώσεις όπου υπάρχει η ανάγκη επιβεβαίωσης σχέσεων γειτνίασης μεταξύ κόμβων ενός δικτύου.

κόμβου” σε κάθε βήμα του αλγορίθμου. Ο όρος αυτός δεν υποδεικνύει απαραίτητα πως ασχολούμαστε μόνο με γειτονικούς κόμβους. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος υλοποιεί το εξής: όταν ένας κόμβος-πηγή ψάχνει για κάποιον κοντινό του κόμβο ο οποίος θα πρέπει να έχει encounter time με τον κόμβο-προορισμό μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο encounter time του κόμβου-πηγής με τον κόμβο-προορισμό, σχηματίζει έναν δακτύλιο συγκεκριμένης ακτίνας με κέντρο τον κόμβο-πηγή και όσοι κόμβοι βρεθούν μέσα στο δακτύλιο αυτό, εξετάζονται από τον αλγόριθμο. Αν η ακτίνα του δακτυλίου είναι αρκετά μικρή με αποτέλεσμα ο κόμβος-πηγή να μην έχει κανέναν κοντινό κόμβο ή αν φυσικά στη γενικότερη περίπτωση κανένας κοντινός κόμβος δεν ικανοποιήσει την ιδιότητα του αλγορίθμου (να έχει encounter time με τον προορισμό μικρότερο από το αντίστοιχο της πηγής με τον προορισμό), τότε η αναζήτηση συνεχίζεται, μεγαλώνοντας κατάλληλα την ακτίνα του δακτυλίου, έως ότου βρεθεί ο κόμβος που ικανοποιεί την παραπάνω ιδιότητα. Ο τρόπος με τον οποίο μεγαλώνει η ακτίνα του δακτυλίου, καθώς και η επιλογή της αρχικής ακτίνας του δακτυλίου ποικίλουν ανάλογα την περίσταση και τα χαρακτηριστικά του δικτύου DTN. Επίσης, θα πρέπει να τονιστεί πως η επιλογή του κατάλληλου κοντινού κόμβου είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση και επηρεάζεται μόνο από την απόσταση του κόμβου πηγής από τον υποψήφιο κοντινό κόμβο.

Ψευδοκώδικας του παραπάνω αλγορίθμου δίνεται παρακάτω:

---

**Algorithm 1** Ψευδοκώδικας του πρωτοκόλλου FRESH [57]

---

**Procedure FRESH (D) :**

**if** thisnode.ID = D **then**

    replyToSource()

**else**

$T \leftarrow prevEncounterAge(D)$

$A \leftarrow findNextAnchor(D, T)$

**if** A != D **then**

        notifyNextAnchor(A, D)

**end if**

**end if**

---

όπου D είναι ο κόμβος-προορισμός, η κλήση της ψευδοεντολής prevEncounterAge(D) επιστρέφει το encounter time του κόμβου στον οποίο κλήθηκε με τον κόμβο με ID ίσο με D, δηλαδή πόσος χρόνος πέρασε από την τελευταία χρονική στιγμή κατά την οποία ο κόμβος με ID ίσο με D ήταν άμεσος γείτονας του κόμβου στον οποίο γίνεται η κλήση της συνάρτησης FRESH(D). Έπειτα, η ψευδοεντολή findNextAnchor(D, T) επιστρέφει τον κόμβο με ID ίσο με A ο οποίος έχει συναντηθεί πιο πρόσφατα με τον προορισμό D σε σχέση με την τιμή T, η οποία είναι το encounter time της πηγής με τον προορισμό. Η αναζήτηση αυτή θα γίνει με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Τέλος, η κλήση notifyNextAnchor(A, D) θα προκαλέσει την κλήση της συνάρτησης FRESH(D) στον κόμβο με ID ίσο με A. Στην ψευδοεντολή notifyNextAnchor(A, D) δεν απαιτείται η παράμετρος T, καθώς ο κόμβος με ID ίσο με A χρειάζεται μόνο το δικό του encounter time με τον προορισμό D.

Από την παραπάνω περιγραφή του πρωτοκόλλου δρομολόγησης FRESH, θα μπορούσαν να προκύψουν ορισμένες



παραλλαγές του ανάλογα με την επιλογή των λεγόμενων "κοντινών κόμβων" σε πρακτικό επίπεδο:

#### **FRESH-near-v1**

Μια σχεδιαστική υλοποίηση θα μπορούσε να είναι ο κόμβος-πηγή να επιλέξει να παραδώσει το πακέτο του στον "βέλτιστο" κοντινό του γείτονα, δηλαδή αυτόν που θα βρίσκεται εντός του δακτυλίου συγκεκριμένης ακτίνας που θα έχει σχηματιστεί γύρω από την πηγή και θα έχει το μικρότερο encounter time με τον προορισμό από όλους τους κοντινούς κόμβους της πηγής (και φυσικά μικρότερο από το encounter time της πηγής με τον προορισμό).

#### **FRESH-near-v2**

Μια εναλλακτική περίπτωση θα μπορούσε να είναι να υλοποιήσει την ίδια ακριβώς διαδικασία όπως πριν όσον αφορά το σχηματισμό του δακτυλίου αλλά να παραδώσει το πακέτο στον πρώτο κοντινό του κόμβο ο οποίος θα ικανοποιήσει την παραπάνω ιδιότητα και όχι απαραίτητα στον βέλτιστο κοντινό του κόμβο.

#### **FRESH-neigh**

Επιπλέον, μια διαφορετική παραλλαγή θα μπορούσε να είναι η εξής: η επιλογή του next hop κόμβου να γίνεται με βάση τους τωρινούς γείτονες της πηγής (με βάση τα encounter times σε επίπεδο ζεύξης δεδομένων) και όχι με βάση τη διαδικασία σχηματισμού των κυκλικών δακτυλίων όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

Όπως είναι φυσικό, αναμένονται τα διαπιστωθούν tradeoffs μεταξύ των παραπάνω σχεδιαστικών υλοποιήσεων, όπως θα φανεί και στην ενότητα της Προσομοίωσης, όπου θα συγκριθούν μεταξύ τους οι παραπάνω παραλλαγές, καθώς και η τροποποιημένη έκδοση του πρωτοκόλλου FRESH, στο οποίο θα εισαχθεί η έννοια του Age of Information, όπως αναλύεται παρακάτω.

### **3.2 Περιγραφή Τροποποιημένου Πρωτοκόλλου**

Στην παρούσα εργασία, προτείνεται μια παραλλαγή του πρωτοκόλλου FRESH όπως αυτό εξηγήθηκε λεπτομερώς παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, είναι φανερό πως κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου δρομολόγησης αυτού, δε λαμβάνεται καθόλου υπόψιν η λεγόμενη "ηλικία" του πακέτου, δηλαδή το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή της παραγωγής του μέχρι την εκάστοτε χρονική στιγμή που μελετάμε. Ανάλογα με την επιλογή των διαφόρων παραμέτρων του συστήματος (ακτίνα γειτνίασης, αριθμός κόμβων του δικτύου DTN, αρχική ακτίνα σχηματισμού δακτυλίου κατά την παράδοση πακέτων, κλπ.), τα διάφορα πακέτα του συστήματος είναι πιθανόν να κυκλοφορούν αενάως στο δίκτυο, αφενός σπαταλώντας τους διαθέσιμους πόρους, αφετέρου αυξάνοντας προοδευτικά την ηλικία τους. Παρ' όλα αυτά, στον πραγματικό κόσμο των δικτύων DTNs, είναι λογικό τα πακέτα που παράγονται να έχουν κάποιο συγκεκριμένο διαθέσιμο Time-To-Live (TTL), το οποίο λειτουργεί εμμέσως ως expiration date. Επομένως, αν ένα πακέτο υπερβεί την τιμή του expiration date χωρίς να έχει καταλήξει στον προορισμό, τότε θεωρείται άχρηστο και θα πρέπει να απομακρυνθεί από το δίκτυο (drop).

Η ιδέα αυτή υλοποιείται στη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία, όπου στο πρωτόκολλο FRESH ενσωματώνεται η ιδέα της Ηλικίας της Πληροφορίας (Age of Information), με σκοπό την επιβολή ενός συγκεκριμένου ανώτατου Upper Bound για την ηλικία κάθε πακέτου. Έτσι, στο τροποποιημένο πρωτόκολλο που προτείνεται, ο αλγόριθμος δρομολόγησης των πακέτων είναι ακριβώς ο ίδιος όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Η μόνη διαφορά είναι πως στο τέλος κάθε time slot, η ηλικία κάθε πακέτου που κυκλοφορεί ακόμα στο δίκτυο αυξάνεται κατά 1 και αν η ηλικία κάποιου πακέτου υπερβεί την τιμή ενός συγκεκριμένου threshold για το AoI, το πακέτο γίνεται drop από το δίκτυο. Προφανώς, με την εφαρμογή του τροποποιημένου πρωτοκόλλου FRESH, δεν αναμένεται

η αύξηση του throughput, δηλαδή του λόγου των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων προς το συνολικό πλήθος των παραγόμενων πακέτων στο δίκτυο, καθώς το τροποποιημένο πρωτόκολλο που προτείνεται ουσιαστικά δε διαφοροποιείται ως προς το αυθεντικό FRESH ως προς την κύρια λειτουργία του (διαφοροποίηση του throughput θα μπορούσε να παρατηρηθεί σε πιο σύνθετες περιπτώσεις, όπως παραδείγματος χάριν αν έχουμε συγκεκριμένο χώρο buffer για κάθε κόμβο. Εδώ για λόγους απλούστευσης έχει γίνει η υπόθεση πως κάθε κόμβος έχει άπειρο buffer). Η αναμενόμενη διαφοροποίηση είναι ως προς την ηλικία των πακέτων και αποτυπώνεται σε μετρικές, όπως η μέση ηλικία των πακέτων, η μέγιστη παρατηρούμενη ηλικία, κλπ. Στο τέλος, αναμένεται να διαπιστωθεί tradeoff ανάμεσα στη ρυθμαπόδοση και τη μέση ηλικία των πακέτων, όπου θα πρέπει να παρατηρηθεί αν το κέρδος υπερτερεί έναντι της ζημίας σε κάθε περίπτωση που εξετάζεται.

## 4 Πειραματική Αξιολόγηση-Προσομοίωση

### 4.1 Γενικά Στοιχεία

Για την προσομοίωση, έχει χρησιμοποιηθεί η γλώσσα προγραμματισμού Python σε περιβάλλον Google Colab. Όλα τα πειράματα έχουν εκτελεστεί σε PC με επεξεργαστή Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50GHz, 6 GB διαθέσιμη RAM και λειτουργικό σύστημα Windows 10. Η μοντελοποίηση του συστήματος περιλαμβάνει τα εξής:

a) **Κλάση Node:** η κλάση Node έχει τα εξής πεδία:

i) id: το id του κόμβου

ii) x: η συντεταγμένη x του κόμβου αυτή τη στιγμή

iii) y: η συντεταγμένη y του κόμβου αυτή τη στιγμή

iv) x\_next: η συντεταγμένη x του επόμενου waypoint στο οποίο θα φτάσει κάποια στιγμή ο κόμβος

v) y\_next: η συντεταγμένη y του επόμενου waypoint στο οποίο θα φτάσει κάποια στιγμή ο κόμβος

vi) steps: συμπεριφέρεται ως ένα "τυχαίο ζάρι" και δείχνει σε πόσα χρονικά slots θα μετακινηθεί ο κόμβος από τη θέση  $(x_i, y_i)$  (waypoint  $w_i$ ) στη θέση  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  (waypoint  $w_{i+1}$ )

vii) velocity\_x: με βάση την τιμή της μεταβλητής steps, καθορίζεται έμμεσα και η ταχύτητα του κόμβου στον άξονα x ως  $\frac{x_{next}-x}{steps}$  (όπου x η συντεταγμένη x του waypoint  $w_i$ )

viii) velocity\_y: με βάση την τιμή της μεταβλητής steps, καθορίζεται έμμεσα και η ταχύτητα του κόμβου στον άξονα y ως  $\frac{y_{next}-y}{steps}$  (όπου y η συντεταγμένη y του waypoint  $w_i$ )

ix) pause\_remaining: μεταβλητή που δείχνει πόσα time slots απομένουν στα οποία ο κόμβος θα παραμείνει ακίνητος στο waypoint που έχει καταλήξει

x) pause\_flag: σημαία (boolean) που δείχνει αν ο κόμβος εέχει σταματήσει να κινείται ή όχι αυτή τη στιγμή

xi) vector: το encounter vector του κόμβου (λίστα), το οποίο ενημερώνεται ανάλογα σε κάθε χρονικό slot. Στον κώδικα, η λίστα αυτή αντιπροσωπεύει τη χρονική στιγμή της πιο πρόσφατης συνάντησης με τον εκάστοτε κόμβο.

xii) neighbors: set που περιέχει τους κόμβους που είναι γείτονες του κόμβου σε αυτό το time slot

Επιπλέον, η κλάση περιέχει 2 μεθόδους, τη μέθοδο find\_dist η οποία επιστρέφει την Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του κόμβου και κάποιου άλλου κόμβου του γράφου και τη μέθοδο find\_neigh, η οποία εφαρμόζεται στην αρχή κάθε time slot και βρίσκει για κάθε κόμβο τους γείτονές του (εξετάζει αν η απόστασή τους είναι μικρότερη από μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου-threshold). Επιπλέον, αν ο κόμβος βρει έναν γείτονα, ενημερώνει κατάλληλα και το encounter vector του, το οποίο περιέχει σε κάθε θέση i τη χρονική στιγμή κατά την οποία ο εκάστοτε κόμβος είχε αναπτύξει την τελευταία σχέση γειτνίασης με τον κόμβο με id i.

b) **Κλάση Packet:** η κλάση Packet περιέχει τα εξής πεδία:

i) id: το id του πακέτου

ii) source: ο κόμβος-πηγή του πακέτου

iii) destination: ο κόμβος-προορισμός του πακέτου

iv) custod: το custodian του πακέτου (δηλαδή ποιος έχει το πακέτο αυτή τη χρονική στιγμή)

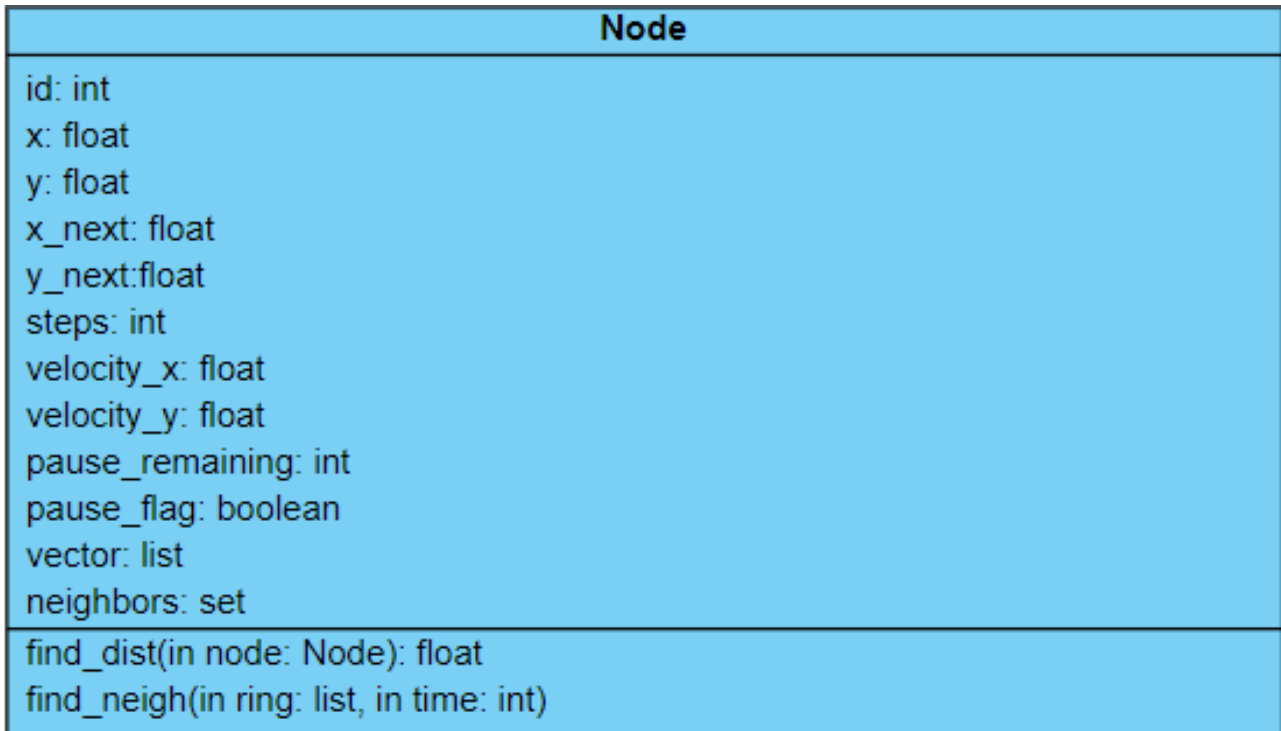
v) delivered: σημαία (boolean) που δείχνει αν το πακέτο περιφέρεται ακόμα στο δίκτυο ή αν έχει παραδοθεί στον

προορισμό (ή έχει γίνει dropped)

vi) flag: σημαία (boolean) που δείχνει αν έχουμε εξετάσει το πακέτο σε αυτόν τον γύρο (έχει κυρίως χρησιμότητα στον κώδικα και όχι κάποια φυσική σημασία).

vii) AoI: το Age of Information, δηλαδή η ηλικία του κάθε πακέτου, η οποία αρχικοποιείται στο 0 με τη γέννηση του πακέτου και αυξάνει κατά 1 στο τέλος κάθε χρονικής στιγμής.

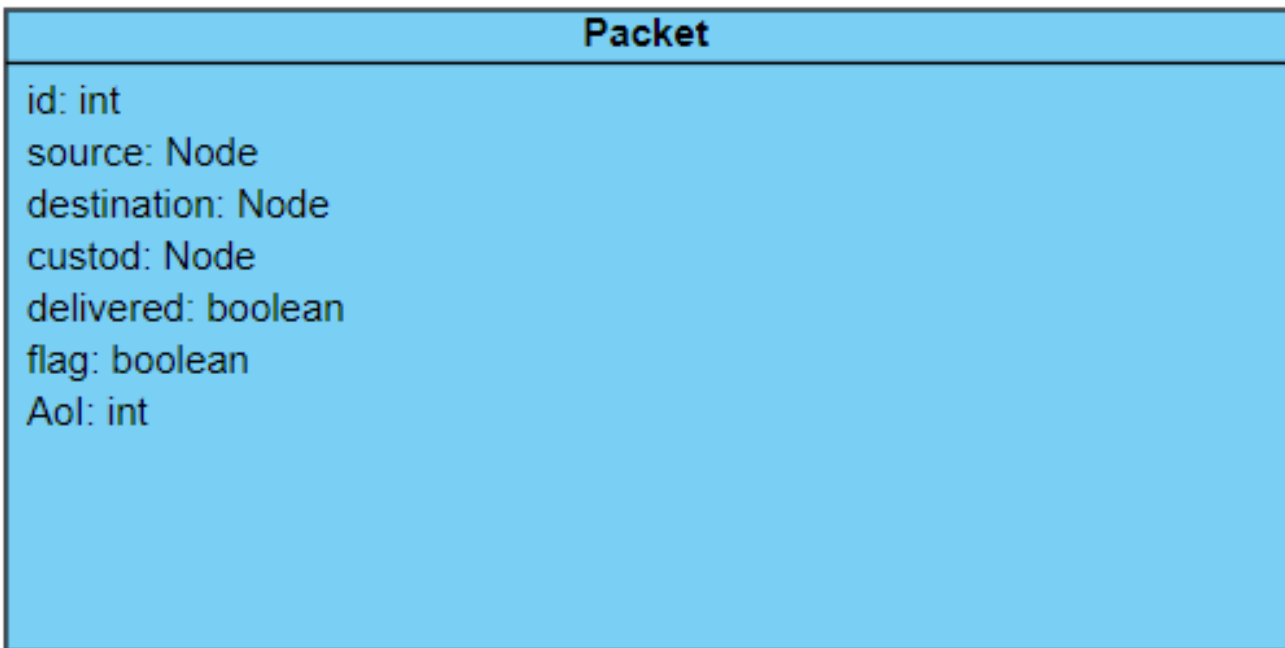
Τα διαγράμματα κλάσεων σε UML για τις 2 αυτές κλάσεις παρουσιάζονται παρακάτω:



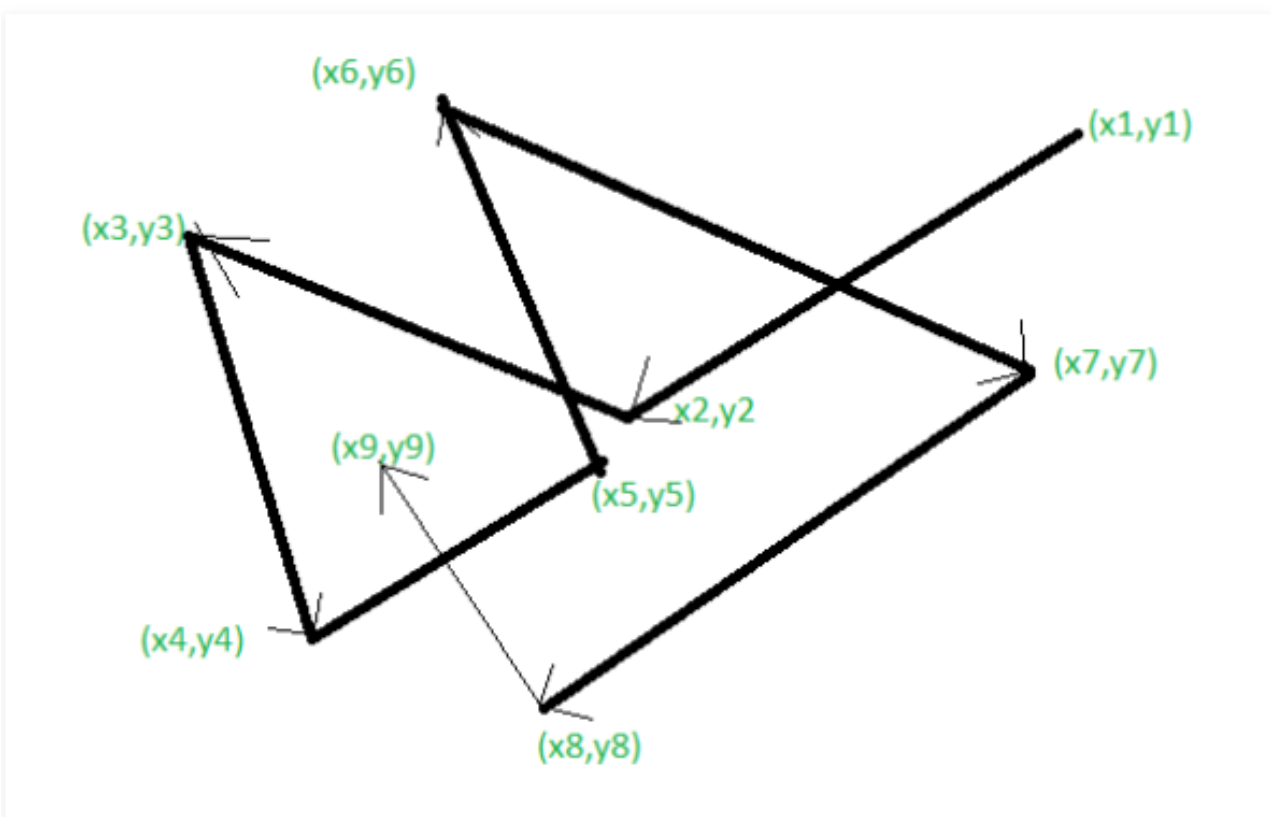
Σχήμα 6: Διάγραμμα κλάσης για την κλάση Node

Με σκοπό την ευκολότερη αναπαραγωγή και επαλήθευση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, ολόκληρος ο κώδικας της προσομοίωσης είναι διαθέσιμος στο Διαδίκτυο στο Github repository [78].

Όσον αφορά την κινητικότητα των κόμβων, έχει υλοποιηθεί το μοντέλο Random Waypoint Mobility ως εξής: αρχικά, κάθε κόμβος επιλέγει τυχαία μια θέση (συντεταγμένες  $x, y$ ) σε ένα τετραγωνικό grid  $L \times L$ . Αυτό θεωρείται ως το πρώτο του waypoint  $w_1$ . Εν συνεχεία, επιλέγει και πάλι τυχαία το επόμενο waypoint του  $w_2$  και αμέσως αρχίζει να κινείται προς αυτό. Η επιλογή αυτή καθορίζει πρακτικά τη γωνία της κίνησής του (είναι η ευθεία γραμμή που ενώνει τα σημεία  $w_1$  και  $w_2$  στο grid). Το πόσο γρήγορα θα φτάσει σε αυτό εξαρτάται από τη μεταβλητή steps, η οποία επιλέγεται ως ένας τυχαίος και ομοιόμορφα κατανομημένος ακέραιος αριθμός μεταξύ του 1 και του 10. Με άλλα λόγια, αν η μεταβλητή steps λάβει την τιμή 5, θα απαιτηθούν 5 time slots προκειμένου να μεταβεί ο κόμβος από τη θέση  $w_i$  στη θέση  $w_{i+1}$ , όπου σε κάθε time slot ο κόμβος θα μετακινείται κατά το  $\frac{1}{5}$  της συνολικής διαδρομής που έχει να διανύσει (με άλλα λόγια, η μεταβλητή steps έχει το χαρακτήρα "αντίστροφης ταχύτητας"). Όταν ο κόμβος φτάσει στο waypoint που έχει επιλέξει, σταματάει να κινείται και



Σχήμα 7: Διάγραμμα κλάσης για την κλάση Packet



Σχήμα 8: Γραφική απεικόνιση του Random Waypoint Mobility Model [77]

μένει αδρανής για 5 time slots, ενώ παράλληλα επιλέγει και πάλι τυχαία το επόμενο του waypoint, καθώς και το πόσο αργά ή γρήγορα θα φτάσει σε αυτό (μέσω της μεταβλητής steps). Μια οπτική αναπαράσταση του μοντέλου απεικονίζεται στο Σχήμα 8.

Στην παρούσα εργασία, προσομοιώνονται 3 διαφορετικές εκδόσεις του πρωτοκόλλου FRESH και για κάθε μία από αυτές συγκρίνονται μεταξύ τους η αυθεντική και η τροποποιημένη έκδοση του πρωτοκόλλου με την ενσωμάτωση της έννοιας του AoI, όπως εξηγήθηκε στην Ενότητα 3.2. Τα κοινά στοιχεία και των συνολικά 6 προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

Αρχικά, σε κάθε time slot παράγονται 1-3 νέα πακέτα με ίση πιθανότητα και με τυχαίους κόμβους ως πηγή και προορισμό αυτών. Εν συνεχεία, όλοι οι κόμβοι κινούνται σύμφωνα με το μοντέλο Random Waypoint Mobility, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Αμέσως μετά, για κάθε κόμβο βρίσκονται οι τωρινοί του γείτονες (εξετάζεται αν απέχει περισσότερο ή λιγότερο από μια προκαθορισμένη τιμή ακτίνας γειτνίασης, για τη μέτρηση της απόστασης χρησιμοποιείται η Ευκλείδεια απόσταση) και ενημερώνονται κατάλληλα τα encounter vectors. Για όλες τις προσομοιώσεις, έχει γίνει η κοινή υπόθεση πως σε κάθε time slot κάθε κόμβος μπορεί να αποστείλει το πολύ ένα από τα πακέτα που έχει αυτή τη χρονική στιγμή αποθηκευμένα στο buffer του. Πιο συγκεκριμένα, για τις 3 εκδόσεις που αφορούν το αυθεντικό FRESH, για κάθε κόμβο επιλέγεται τυχαία ένα από τα πακέτα τα οποία κατέχει αυτή τη χρονική στιγμή, ενώ για τις 3 τροποποιημένες εκδόσεις του FRESH, για κάθε κόμβο επιλέγεται να μεταφερθεί στο δίκτυο το πακέτο του που έχει τη μεγαλύτερη τιμή AoI αυτή τη χρονική στιγμή, με σκοπό να γίνει κι εδώ χρήση της ιδιότητας της ηλικίας της πληροφορίας (όσο πιο μεγάλη η ηλικία ενός πακέτου, τόσο πιο κρίσιμο είναι να διακινήθει στο δίκτυο και να παραδοθεί όσο το δυνατόν πιο άμεσα στον προορισμό). Εν συνεχεία, κάθε κόμβος σε κάθε μία από τις εκδόσεις του αλγορίθμου επιλέγει ανάλογα με ξεχωριστά κριτήρια το τι θα κάνει με το πακέτο που επέλεξε στο προηγούμενο βήμα. Με άλλα λόγια, εφαρμόζει μια συγκεκριμένη συλλογιστική προκειμένου να βρει τον next hop του πακέτου που θα μεταδώσει αυτή τη χρονική στιγμή. Στο τέλος παραδίδει το πακέτο αυτό στον κόμβο που βρήκε από την παραπάνω διαδικασία και αφού αυτό υλοποιηθεί από όλους τους κόμβους του δικτύου, όλα τα πακέτα που δεν έχουν γίνει ακόμα delivered ή dropped αυξάνουν την ηλικία τους κατά 1. Στις 3 εκδόσεις του τροποποιημένου πρωτοκόλλου, αν η ηλικία ενός πακέτου υπερβεί την τιμή κατωφλίου, το εκάστοτε πακέτο γίνεται drop.

Οι 3 παραλλαγές του πρωτοκόλλου FRESH, οι οποίες προσομοιώνονται τόσο στην αυθεντική τους έκδοση όσο και στην τροποποιημένη έκδοση με την εισαγωγή της μεταβλητής του AoI είναι οι κάτωθι:

i) **Επιλογή κόμβου αναμετάδοσης με βάση τους γείτονες:** σε αυτή την παραλλαγή, ο κόμβος επιλέγει τον κόμβο αναμετάδοσης του πακέτου που έχει επιλέξει με βάση τους τωρινούς του γείτονες στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, αν ο προορισμός του πακέτου ανήκει στο σύνολο των γειτόνων του αυτή τη χρονική στιγμή, τότε αυτή είναι η καλύτερη περίπτωση, καθώς παραδίδει το πακέτο άμεσα στον προορισμό του. Ειδάλλως, αν ο προορισμός δεν ανήκει στο σύνολο των γειτόνων του αυτή τη χρονική στιγμή, κοιτάει τα encounter vectors των γειτόνων του και παραδίδει το πακέτο στο γείτονα που είχε την πιο πρόσφατη επαφή με τον προορισμό. Σε περίπτωση που δεν έχει καθόλου γείτονες, διατηρεί το πακέτο αποθηκευμένο στο buffer του. Η παραλλαγή αυτή εις το εξής θα συμβολίζεται ως **FRESH-neigh** ή **Modified-neigh** ανάλογα με το αν

χρησιμοποιείται το αυθεντικό πρωτόκολλο FRESH ή το τροποποιημένο με την εισαγωγή της έννοιας της ηλικίας των πακέτων.

ii) **Επιλογή κόμβου αναμετάδοσης με βάση τον "καλύτερο κοντινό κόμβο"**: σε αυτή την παραλλαγή, όταν ο εκάστοτε κόμβος επιλέξει το πακέτο που θα προωθήσει στο δίκτυο, σχηματίζει έναν κυκλικό δακτύλιο συγκεκριμένης ακτίνας με κέντρο τον εαυτό του. Έπειτα, ψάχνει ποιοι κόμβοι βρίσκονται μέσα στο δακτύλιο που μόλις σχημάτισε (τους κόμβους αυτούς θα τους αποκαλούμε εις το εξής "κοντινούς κόμβους") και εν συνεχεία, ψάχνει αν υπάρχει κάποιος κοντινός του κόμβος ο οποίος να έχει πιο πρόσφατο encounter σε σχέση με το δικό του encounter με τον προορισμό του πακέτου. Αν δε βρεθεί κοντινός κόμβος που να ικανοποιήσει την ιδιότητα αυτή, σχηματίζει νέο μεγαλύτερο δακτύλιο και επαναλαμβάνει όλα τα παραπάνω έως ότου βρεθεί τουλάχιστον ένας κοντινός κόμβος ο οποίος να ικανοποιήσει την ιδιότητα αυτή. Στην παρούσα υλοποίηση, έχει επιλεγεί αρχική ακτίνα δακτυλίου ίση με 10 και αν δε βρεθεί κόμβος ο οποίος να ικανοποιήσει την προαναφερθείσα ιδιότητα, η ακτίνα διπλασιάζεται σε κάθε βήμα. Η παραλλαγή αυτή εις το εξής θα συμβολίζεται ως **FRESH-near-v1** ή **Modified-near-v1** ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται το αυθεντικό πρωτόκολλο FRESH ή το τροποποιημένο με την εισαγωγή της έννοιας της ηλικίας των πακέτων.

iii) **Επιλογή κόμβου αναμετάδοσης με βάση τον "πρώτο κοντινό κόμβο"**: αυτή η παραλλαγή είναι ακριβώς ίδια με την παραπάνω παραλλαγή με μόνη διαφορά πως εδώ ο κόμβος-πηγή αρκεί να βρει μόνο έναν κοντινό του κόμβο ο οποίος να έχει encounter time με τον προορισμό πιο πρόσφατο σε σχέση με το αντίστοιχο δικό του με τον προορισμό. Αντιθέτως, στην παραπάνω παραλλαγή όταν βρεθεί ένας κοντινός κόμβος ο οποίος να ικανοποιεί την ιδιότητα αυτή, θα αναζητηθούν όλοι οι κοντινοί κόμβοι της πηγής (με τη συγκεκριμένη ακτίνα δακτυλίου) και μεταξύ αυτών θα επιλεγεί ο "βέλτιστος", δηλαδή ο κοντινός κόμβος που θα έχει το πιο πρόσφατο encounter time με τον προορισμό εν συγκρίσει με όλους τους υπόλοιπους κοντινούς. Η παραλλαγή αυτή εις το εξής θα συμβολίζεται ως **FRESH-near-v2** ή **Modified-near-v2** ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται το αυθεντικό πρωτόκολλο FRESH ή το τροποποιημένο με την εισαγωγή της έννοιας της ηλικίας των πακέτων.

## 4.2 Διαστασιολόγηση της Προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται κάποια πρώτα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις, τα οποία έχουν σκοπό να διαστασιολογήσουν το πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα, ξεκινώντας από πολύ μικρά δίκτυα και αυξάνοντας το μέγεθός τους προοδευτικά, μεταβάλλονται διάφορες παράμετροι του προβλήματος, όπως ο αριθμός των κόμβων DTN, η ακτίνα γειτνίασης (σε επίπεδο ζεύξης δεδομένων), το μέγεθος του τετραγωνικού grid, ο αριθμός των time slot της προσομοίωσης και το Upper Bound για το AoI για τις 3 εκδόσεις του τροποποιημένου πρωτοκόλλου. Για όλες τις περιπτώσεις, οι μετρικές που εξετάζονται κυρίως είναι το throughput, η μέση ηλικία των πακέτων και η μέγιστη ηλικία που παρατηρείται, ενώ διατηρείται επίσης και ο συνολικός αριθμός παραγόμενων πακέτων, ο συνολικός αριθμός επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων, ο αριθμός των πακέτων που γίνονται drop (εξαιτίας υπέρβασης του bound του AoI στις 3 εκδόσεις του τροποποιημένου πρωτοκόλλου), ο αριθμός των πακέτων που παραμένουν στο δίκτυο και τέλος ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης της εκάστοτε προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 3,4,5,6,7 και 8:

Πίνακας 3: Πρώτα αποτελέσματα για Modified-neigh

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γειτ-νίαςης	Bound of AoI	Παραγόμενα Πακέτα	Drop	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
50	100x100	500	20	30	1012	132	860	20	2.55	0.849	12.5	30
50	100x100	1000	15	70	2021	380	1563	78	7.89	0.773	40.45	70
100	100x100	1000	15	70	1964	131	1780	53	17.24	0.906	23.76	70
100	1000x1000	1000	149	70	2001	148	1795	58	17.52	0.897	26.15	70
100	1000x1000	2000	149	140	4030	13	3965	52	58.63	0.983	27.12	140
100	1000x1000	5000	149	200	10032	6	9961	65	356.28	0.992	29.87	200

Πίνακας 4: Πρώτα αποτελέσματα για Modified-near-v1

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γειτ-νίαςης	Bound of AoI	Παραγόμενα Πακέτα	Drop	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
50	100x100	500	20	30	998	686	257	55	3.564	0.257	25.07	30
50	100x100	1000	15	70	1997	105	1838	54	10.398	0.92	28.87	70
100	100x100	1000	15	70	1963	793	1083	87	25.2	0.551	47.83	70
100	1000x1000	1000	149	70	2004	848	1048	108	32.78	0.522	51.08	70
100	1000x1000	2000	149	140	4029	1548	2252	229	97.76	0.558	102.08	140
100	1000x1000	5000	149	200	10014	4145	5558	311	457.35	0.555	150.45	200



Πίνακας 5: Πρώτα αποτελέσματα για Modified-near-v2

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γειτ-νίασης	Bound of AoI	Παραγόμενα Πακέτα	Drop	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
50	100x100	500	20	30	998	681	267	50	3.32	0.267	25.51	30
50	100x100	1000	15	70	1993	349	1573	71	9.36	0.789	42.07	70
100	100x100	1000	15	70	1992	975	895	122	23.12	0.449	54.26	70
100	1000x1000	1000	149	70	1987	1069	798	120	30.06	0.4	54.29	70
100	1000x1000	2000	149	140	3947	2052	1680	215	84.69	0.42	111.77	140
100	1000x1000	5000	149	200	10041	5514	4203	324	407.18	0.418	163.45	200

Πίνακας 6: Πρώτα αποτελέσματα για FRESH-neigh

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γειτ-νίασης	Παραγόμενα Πακέτα	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
50	100x100	500	20	1009	975	34	2.395	0.966	14.91	87
50	100x100	1000	15	1974	1888	86	7.328	0.956	47.48	438
100	100x100	1000	15	1983	1923	60	17.02	0.969	26.49	215
100	1000x1000	1000	149	2039	1993	46	17.3	0.977	26.4	226
100	1000x1000	2000	149	4049	3996	53	57.29	0.986	27.59	248
100	1000x1000	5000	149	9921	9870	51	324.78	0.994	27.739	315

Πίνακας 7: Πρώτα αποτελέσματα για FRESH-near-v1

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γειτ-νίασης	Παραγόμενα Πακέτα	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
50	100x100	500	20	1010	397	613	3.85	0.39	139.08	500
50	100x100	1000	15	2037	1959	78	9.52	0.961	25.9	347
100	100x100	1000	15	1971	1253	718	25.77	0.635	197.07	969
100	1000x1000	1000	149	1981	1128	853	37.92	0.569	234.57	999
100	1000x1000	2000	149	3983	2178	1805	100.29	0.546	421.88	1997
100	1000x1000	5000	149	10141	5281	4860	484.86	0.52	1152.04	4986

Πίνακας 8: Πρώτα αποτελέσματα για FRESH-near-v2

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γειτ-νίασης	Παραγόμενα Πακέτα	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
50	100x100	500	20	997	299	698	3.482	0.299	158.49	498
50	100x100	1000	15	1970	1496	474	9.445	0.759	115.86	885
100	100x100	1000	15	2009	898	1111	23.67	0.446	295.49	999
100	1000x1000	1000	149	2016	726	1290	34.09	0.36	314.75	991
100	1000x1000	2000	149	3358	1563	2395	89.82	0.394	618.34	2000
100	1000x1000	5000	149	10080	3706	6374	426.18	0.367	1571.19	5000

### 4.3 Προσομοιώσεις Μεγαλύτερης Κλίμακας

Εν συνεχεία, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις μεγαλύτερης χρονικής πολυπλοκότητας, στις οποίες εξετάζεται η συμπεριφορά των 6 εκδόσεων που μελετώνται στην εργασία με τη μεταβολή παραμέτρων, όπως ο αριθμός κόμβων του συστήματος, το πλήθος των time slots, καθώς και η τιμή του Bound για το AoI (για τις 3 εκδόσεις του τροποποιημένου πρωτοκόλλου). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται παρακάτω στους Πίνακες 9,10,11,12,13 και 14:

Πίνακας 9: Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για Modified-  
neigh

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γει- νίαςης	Bound of AoI	Παραγόμενα Πακέτα	Drop	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
100	1000x1000	5000	149	200	10032	6	9961	65	356.28	0.992	29.87	200
250	1000x1000	5000	149	200	10007	3	9955	49	943.18	0.994	22.98	200
500	1000x1000	5000	149	200	10019	7	9965	47	2333.63	0.994	23.69	200
100	1000x1000	10000	149	200	19955	5	19891	59	1374.09	0.996	29.87	200
100	1000x1000	15000	149	200	30130	16	30056	58	3033.45	0.997	30.14	200
100	1000x1000	5000	149	150	10023	37	9920	66	348.76	0.989	29.42	150
100	1000x1000	5000	149	100	9992	266	9667	59	344.61	0.967	29.07	100
100	1000x1000	5000	149	50	9891	1499	8343	49	3451.41	0.843	23.13	50

Πίνακας 10: Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για  
Modified-near-v1

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γει- νίαςης	Bound of AoI	Παραγόμενα Πακέτα	Drop	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
100	1000x1000	5000	149	200	10014	4145	5558	311	457.35	0.555	150.45	200
250	1000x1000	5000	149	200	9976	7785	1817	374	1316.71	0.182	180.11	200
500	1000x1000	5000	149	200	9973	8857	731	385	3305.67	0.073	189.11	200
100	1000x1000	10000	149	200	19841	8223	11310	308	1513.17	0.57	152.03	200
100	1000x1000	15000	149	200	29867	12617	16948	302	3285.21	0.567	153.8	200
100	1000x1000	5000	149	150	10033	4225	5568	240	397.27	0.554	112.54	150
100	1000x1000	5000	149	100	10081	4388	5525	168	401.49	0.548	74.95	100

100	1000x1000	5000	149	50	9975	5247	4641	87	379.72	0.465	38.48	50
-----	-----------	------	-----	----	------	------	------	----	--------	-------	-------	----

Πίνακας 11: Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για Modified-near-v2

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γειτ-νίασης	Bound of AoI	Παραγόμενα Πακέτα	Drop	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
100	1000x1000	5000	149	200	10041	5514	4203	324	407.18	0.418	163.45	200
250	1000x1000	5000	149	200	9955	8074	1515	366	1458.19	0.152	183.85	200
500	1000x1000	5000	149	200	10001	8974	634	393	3079.35	0.063	190.69	200
100	1000x1000	10000	149	200	19830	11151	8325	354	1793.91	0.419	166.15	200
100	1000x1000	15000	149	200	30024	17028	12671	325	3090.86	0.422	166.93	200
100	1000x1000	5000	149	150	10004	5522	4251	231	397.36	0.425	124.1	150
100	1000x1000	5000	149	100	10012	5478	4365	169	393.27	0.435	82.42	100
100	1000x1000	5000	149	50	9981	5931	3968	82	397.98	0.397	41.22	50

Πίνακας 12: Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για FRESH-neigh

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γειτ-νίασης	Παραγόμενα Πακέτα	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
100	1000x1000	5000	149	9921	9870	51	324.78	0.994	27.739	315
250	1000x1000	5000	149	10058	10015	43	1131.49	0.995	22.54	228
500	1000x1000	5000	149	10110	10062	48	2156.49	0.995	23.63	296
100	1000x1000	10000	149	20104	20052	52	1276.08	0.997	28.16	302
100	1000x1000	15000	149	29957	29911	46	2792.84	0.998	28.15	297

Πίνακας 13: Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για FRESH-  
near-v1

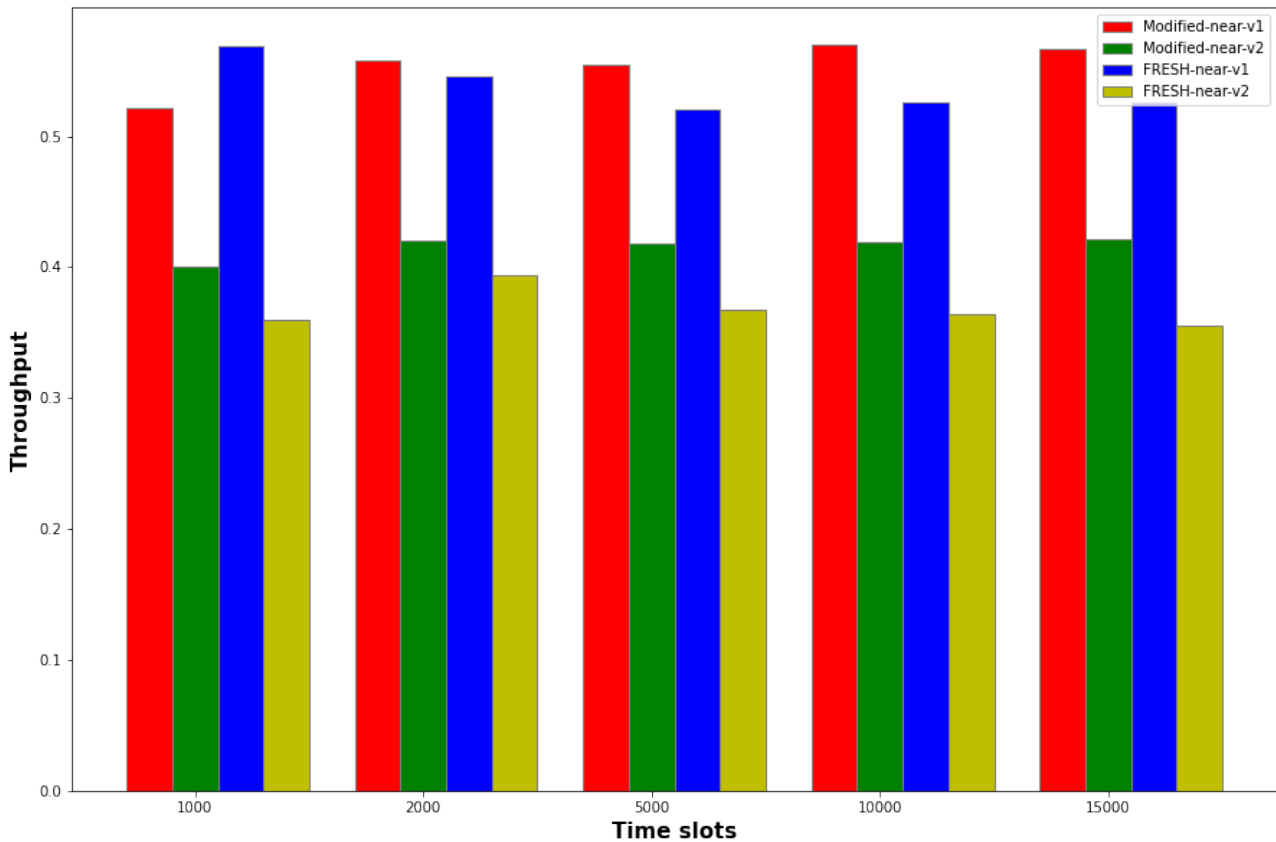
Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γει- ρίασης	Παράγόμενα Πακέτα	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
100	1000x1000	5000	149	10141	5281	4860	484.86	0.52	1152.04	4986
250	1000x1000	5000	149	10040	1790	8250	1289.87	0.178	2001.59	5000
500	1000x1000	5000	149	9981	835	9146	3361.1	0.08	2289.78	5000
100	1000x1000	10000	149	20121	10592	9529	1640.18	0.526	2336.56	9995
100	1000x1000	15000	149	29851	15719	14132	3362.13	0.526	3514.33	14995

Πίνακας 14: Προσομοίωση μεγαλύτερης κλίμακας για FRESH-  
near-v2

Αριθμός κόμβων	Grid	Time slots	Ακτίνα γει- ρίασης	Παράγόμενα Πακέτα	Success	Remaining	Execution time (s)	Throughput	Mean AoI	Max AoI
100	1000x1000	5000	149	10080	3706	6374	426.18	0.367	1571.19	5000
250	1000x1000	5000	149	10078	1247	8831	1074.49	0.123	1294.85	5000
500	1000x1000	5000	149	9970	600	9370	3415.69	0.06	2360.14	5000
100	1000x1000	10000	149	20001	7296	12705	1538.44	0.364	3111.45	9998
100	1000x1000	15000	149	29949	10645	19304	3275.26	0.355	4807.08	15000

## 4.4 Γραφικές Παραστάσεις-Συμπεράσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων για τις 3 εκδόσεις του τροποποιημένου πρωτοκόλλου που προτείνεται στην εργασία και τις 3 εκδόσεις του αυθεντικού πρωτοκόλλου FRESH που μελετήθηκαν. Οι δύο μετρικές που θα εξεταστούν είναι η ρυθμαπόδοση (throughput) και η μέση ηλικία των πακέτων του δικτύου, ενώ θα μελετηθεί και ο χρόνος εκτέλεσης (execution time) των προσομοιώσεων. Αρχικά, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση του αριθμού των time slots στις προσομοιώσεις, κατασκευάζονται τα 2 ακόλουθα διαγράμματα, όπου αποτυπώνεται η εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης και της μέσης ηλικίας των πακέτων από τη μεταβολή του αριθμού των time slots για τις 4 εκδόσεις του FRESH όπου ο κάθε κόμβος παραδίδει το πακέτο του σε κάποιον "κοντινό" του:



Σχήμα 9: Εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης εν συγκρίσει με τον αριθμό των time slots για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2

Σημειώνεται πως ο λόγος της τιμής του Bound για το AoI για τις 2 τροποποιημένες εκδόσεις του πρωτοκόλλου FRESH προς τον αριθμό των time slots που έχει επιλεγεί σε κάθε περίπτωση ισούται με 7% για τις 2 πρώτες τιμές time slots, 4% για την τιμή των 5000 time slots, 2% για την τιμή των 10000 time slots και 1.33% για την τιμή των 15000 time slots. Από την παραπάνω γραφική παράσταση μπορεί να εξαχθεί ο αριθμός των time slots πάνω από τον οποίο έχει εκλείψει τελείως το λεγόμενο "μεταβατικό φαινόμενο", με αποτέλεσμα το throughput να τείνει ασυμπτωτικά σε μια σταθερή τιμή. Και για τα 4 πρωτόκολλα, φαίνεται πως για αριθμό time slots μεγαλύτερο από 5000, η ρυθμαπόδοση δε μεταβάλλεται σημαντικά, επομένως είναι ασφαλές να συμπεράνουμε πως η τιμή 5000

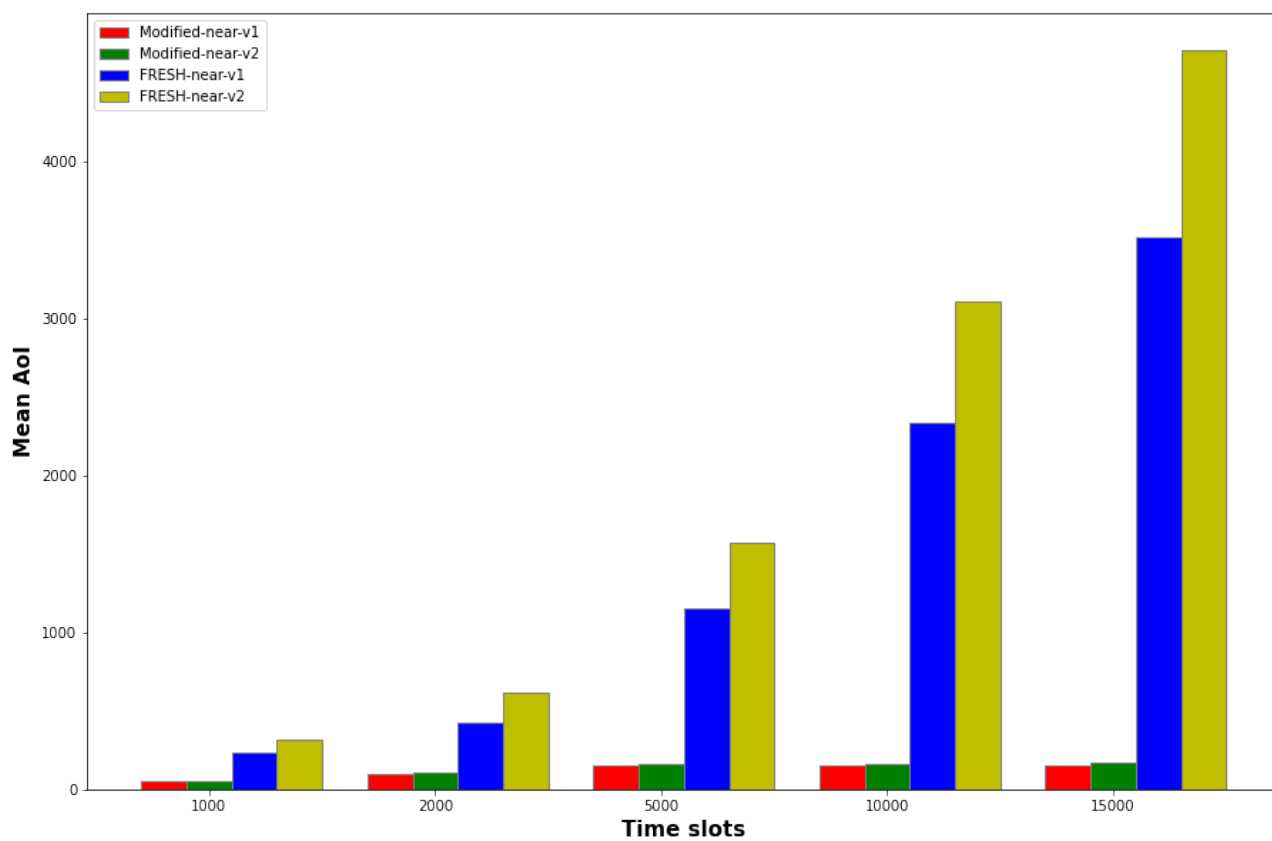


time slots είναι επαρκής για εξάλειψη των μεταβατικών φαινομένων. Επιπλέον, όπως είναι λογικό, για όλες τις τιμές time slots την καλύτερη ρυθμαπόδοση παρουσιάζουν τα πρωτόκολλα Modified-near-v1 και FRESH-near-v1, καθώς σε αυτά εξ' ορισμού οι κόμβοι αναζητούν τον βέλτιστο "κοντινό" τους κόμβο και όχι απλώς τον πρώτο καλύτερο που θα συναντήσουν, επομένως οι πιθανότητες επιτυχούς μετάδοσης των πακέτων είναι αυξημένες στα 2 πρωτόκολλα αυτά. Μάλιστα, παρατηρείται πως στις 4/5 περιπτώσεις, το πρωτόκολλο Modified-near-v1 υπερέχει του FRESH-near-v1 έστω και για λίγο, αποτέλεσμα το οποίο σίγουρα χρίζει δικαιολόγησης, καθώς οι τροποποιημένες εκδόσεις του πρωτοκόλλου FRESH προτάθηκαν στην παρούσα εργασία προκειμένου να υπάρξει βελτίωση στον τομέα της ηλικίας των πακέτων και όχι (απαραίτητα) στη ρυθμαπόδοση. Βέβαια, το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται λόγω της στοχαστικότητας που επικρατεί κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, αποτέλεσμα το οποίο επιβεβαιώνεται μέσω διεξαγωγής πολλών ίδιων προσομοιώσεων και averaging των αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση δε θα πρέπει να λησμονηθεί και η εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης από το φράγμα του AoI στις 2 εκδόσεις του τροποποιημένου πρωτοκόλλου που προτείνεται στην εργασία. Πιο σαφές συμπέρασμα σχετικά με την εξάρτηση αυτή θα εξαχθεί παρακάτω με την παράθεση σχετικής γραφικής παράστασης. Αντίστοιχη υπεροχή πάντως παρατηρείται και στο πρωτόκολλο Modified-near-v2 έναντι του FRESH-near-v2 στον τομέα της ρυθμαπόδοσης.

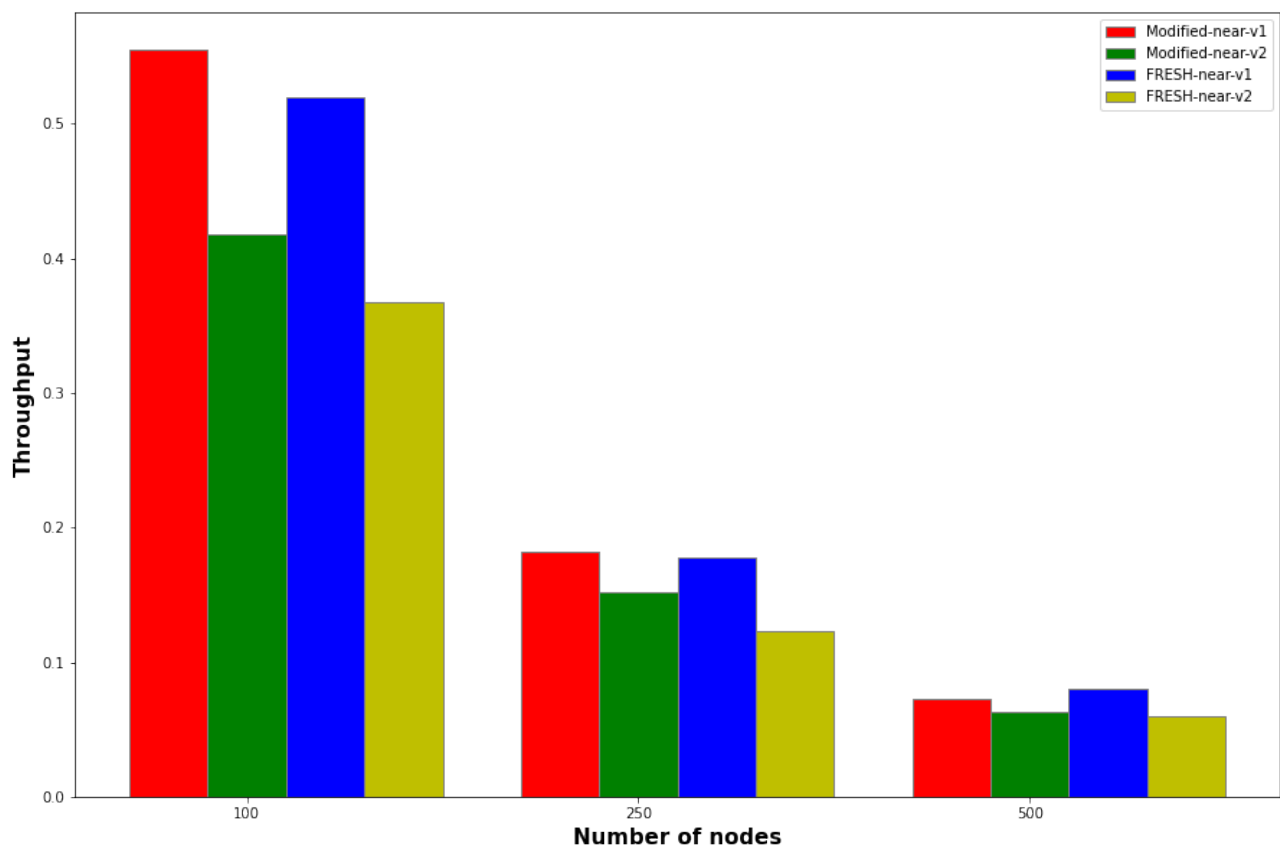
Ομοίως, κατασκευάζεται η γραφική παράσταση του Σχήματος 10, η οποία αποτυπώνει την εξάρτηση της μέσης ηλικίας των πακέτων με τη μεταβολή του αριθμού των time slots για τα 4 πρωτόκολλα.

Από το διάγραμμα, είναι καταφανής η συντριπτική υπεροχή των 2 τροποποιημένων εκδόσεων του πρωτοκόλλου FRESH έναντι των αυθεντικών εκδόσεων. Πιο συγκεκριμένα, ιδιαίτερα για τις μεγάλες τιμές του αριθμού των time slots, η μέση ηλικία των πακέτων στα 2 πρωτόκολλα FRESH-near είναι σχεδόν 30-πλάσια από την αντίστοιχη ηλικία των πακέτων στα 2 πρωτόκολλα Modified-near. Επομένως, η επιλογή του τροποποιημένου πρωτοκόλλου έναντι του αυθεντικού κρίνεται τρομερά αποτελεσματική, καθώς όπως παρατηρήθηκε και παραπάνω, η διαφορά στη ρυθμαπόδοση είναι σχεδόν ασήμαντη, ενώ από την άλλη πλευρά το όφελος στην ηλικία των πακέτων είναι τεράστιο και σίγουρα δεν μπορεί με τίποτα να αγνοηθεί.

Ένα επόμενο συμπέρασμα το οποίο πρέπει να εξαχθεί είναι η επίδραση της ρυθμαπόδοσης από το πόσο πυκνό είναι το δίκτυο DTN, δηλαδή από τον αριθμό των κόμβων του. Η επίδραση αυτή αποτυπώνεται στο Σχήμα 11. Από τη γραφική παράσταση αυτή, παρατηρείται πως για όλα τα πρωτόκολλα το throughput μειώνεται σχεδόν εκθετικά με την αύξηση της πυκνότητας του δικτύου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς με την αύξηση του αριθμού των κόμβων, αυξάνονται και οι διαθέσιμοι "κοντινοί" κόμβοι, με αποτέλεσμα να είναι δυσκολότερο να μεταδοθεί ένα πακέτο προς τον προορισμό του. Η παρατήρηση αυτή συνδέεται άμεσα με ένα πολύ γνωστό και γενικό αποτέλεσμα των P. Gupta και P. R. Kumar [79] πως η ρυθμαπόδοση είναι  $\Theta(\frac{W}{\sqrt{n}})$  bits ανά δευτερόλεπτο για κάθε κόμβο για έναν προορισμό που δεν είναι πολύ μακρινός, με την υπόθεση πως οι κόμβοι είναι βέλτιστα τοποθετημένοι σε ένα δίσκο μοναδιαίας επιφάνειας, τα μοτίβα κυκλοφορίας εκχωρούνται βέλτιστα και το εύρος κάθε μετάδοσης επιλέγεται βέλτιστα. Επιπλέον, παρατηρείται πως και πάλι την καλύτερη απόδοση έχουν τα 2 πρωτόκολλα τα οποία επιλέγουν ως κόμβο αναμετάδοσης τον καλύτερο "κοντινό" τους κόμβο, ενώ και πάλι φαίνεται μια μικρή υπεροχή των τροποποιημένων πρωτοκόλλων έναντι των αυθεντικών ακόμη και στο κομμάτι του throughput.

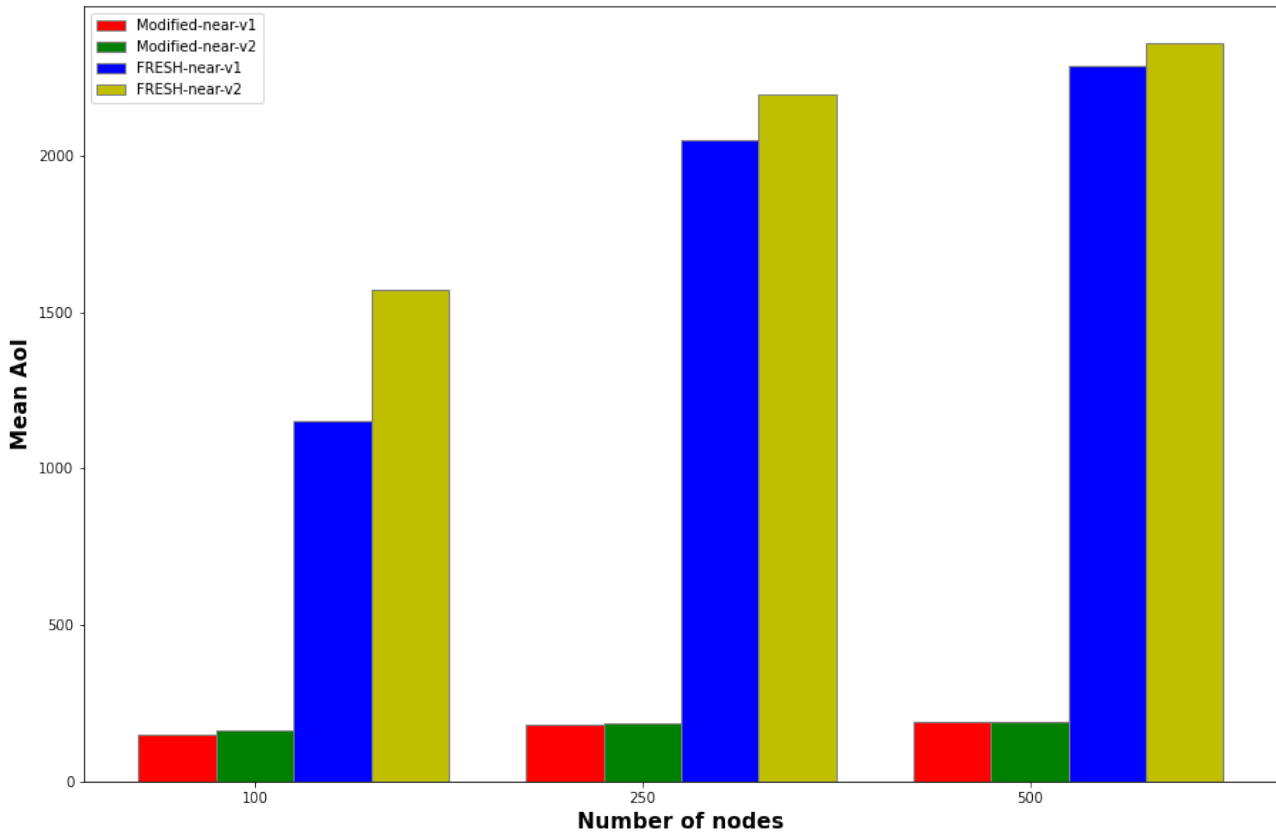


Σχήμα 10: Εξάρτηση της μέσης ηλικίας των πακέτων εν συγκρίσει με τον αριθμό των time slots για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2



Σχήμα 11: Εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης εν συγκρίσει με τον αριθμό των κόμβων για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2

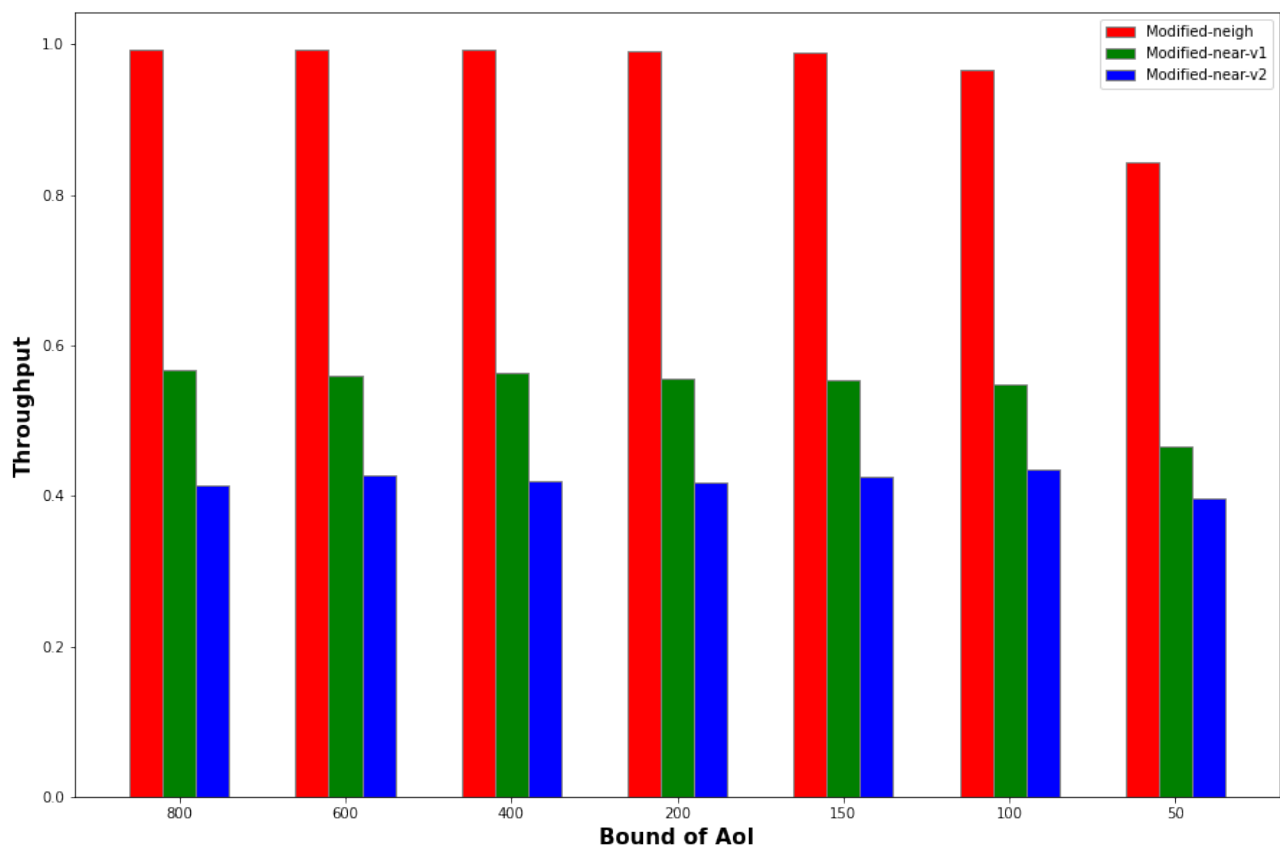
Στο Σχήμα 12, παρουσιάζεται ομοίως η συμπεριφορά της μέσης ηλικίας των πακέτων εν συγκρίσει με την πυκνότητα του δικτύου.



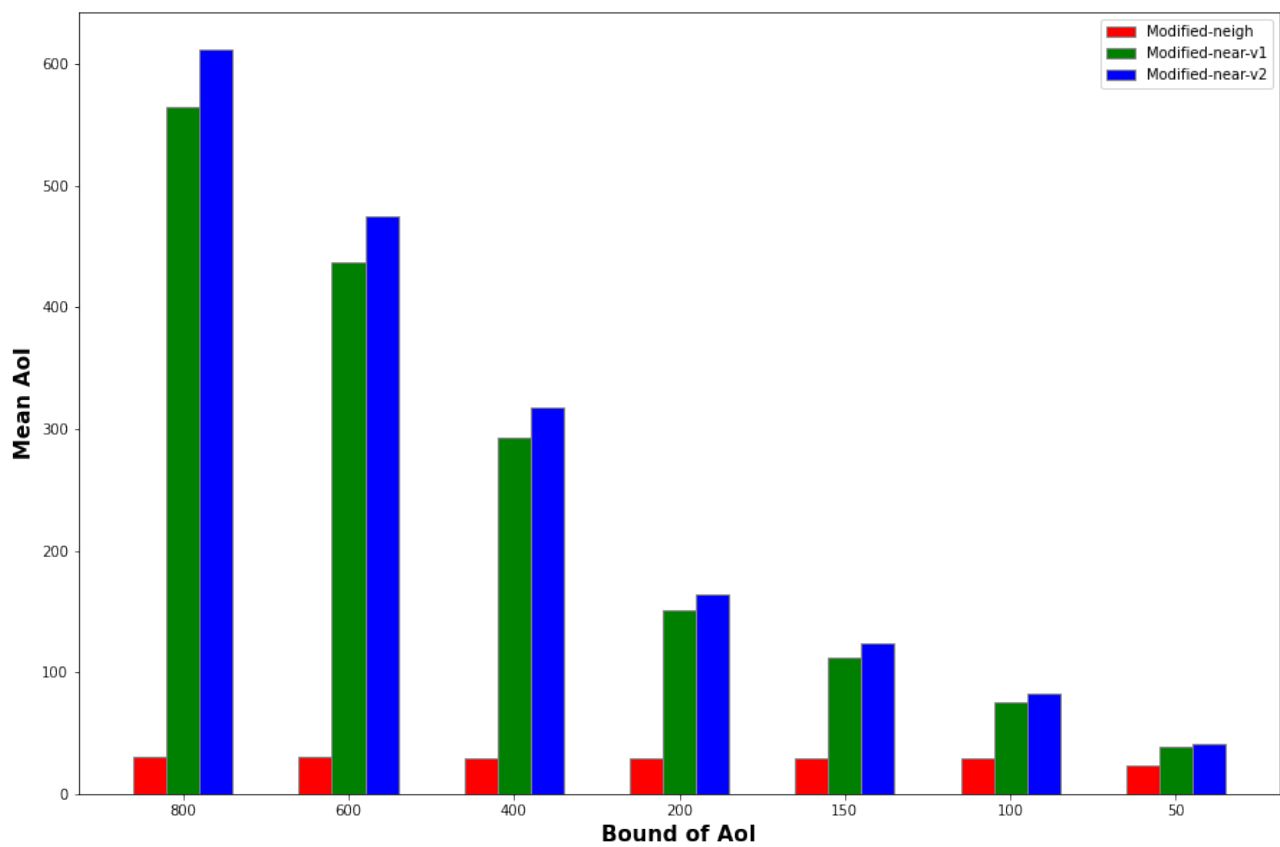
Σχήμα 12: Εξάρτηση της μέσης ηλικίας των πακέτων εν συγκρίσει με τον αριθμό των κόμβων για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2

Και πάλι είναι καταφανής η συντριπτική υπεροχή των 2 τροποποιημένων πρωτοκόλλων έναντι των 2 αυθεντικών στο κομμάτι της μέσης ηλικίας των πακέτων, ενώ συνολικά όσον αφορά το κομμάτι της πυκνότητας του δικτύου, συμπεραίνεται πως η χρήση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου FRESH αφενός δεν επηρεάζει σημαντικά το κομμάτι της ρυθμαπόδοσης, αφετέρου προσφέρει σημαντικό κέρδος στο Age of Information των πακέτων, τα οποία εδώ είναι πολύ πιο φρέσκα από τα αντίστοιχα πακέτα στο αυθεντικό πρωτόκολλο FRESH.

Παράλληλα, μια ενδιαφέρουσα διαπίστωση που πρέπει να γίνει είναι το κατά πόσο οι 2 μετρικές που εξετάζονται (ρυθμαπόδοση και μέση ηλικία των πακέτων) επηρεάζονται από το φράγμα του AoI στο τροποποιημένο πρωτόκολλο. Με άλλα λόγια, διαισθητικά θα λέγαμε πως αν η τιμή της τιμής κατωφλίου (threshold) για το AoI μειωθεί αρκετά, αφενός μεν τα πακέτα θα έχουν μια πιο μικρή ηλικία, αφετέρου δε αυτό θα οδηγήσει σε περισσότερα drops, επομένως ενδεχομένως σε μείωση της ρυθμαπόδοσης. Στα παρακάτω διαγράμματα, αποτυπώνεται η επίδραση του Bound του AoI στο throughput και στη μέση ηλικία των πακέτων για τις 3 τροποποιημένες εκδόσεις του πρωτοκόλλου FRESH. Σημειώνεται πως σε όλες τις περιπτώσεις, ο αριθμός των time slots ισούται με 5000:



Σχήμα 13: Εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης εν συγκρίσει με την τιμή του Bound του AoI για τα πρωτόκολλα Modified-neigh, Modified-near-v1 και Modified-near-v2



Σχήμα 14: Εξάρτηση της μέσης ηλικίας των πακέτων εν συγκρίσει με την τιμή του Bound του AoI για τα πρωτόκολλα Modified-neigh, Modified-near-v1 και Modified-near-v2

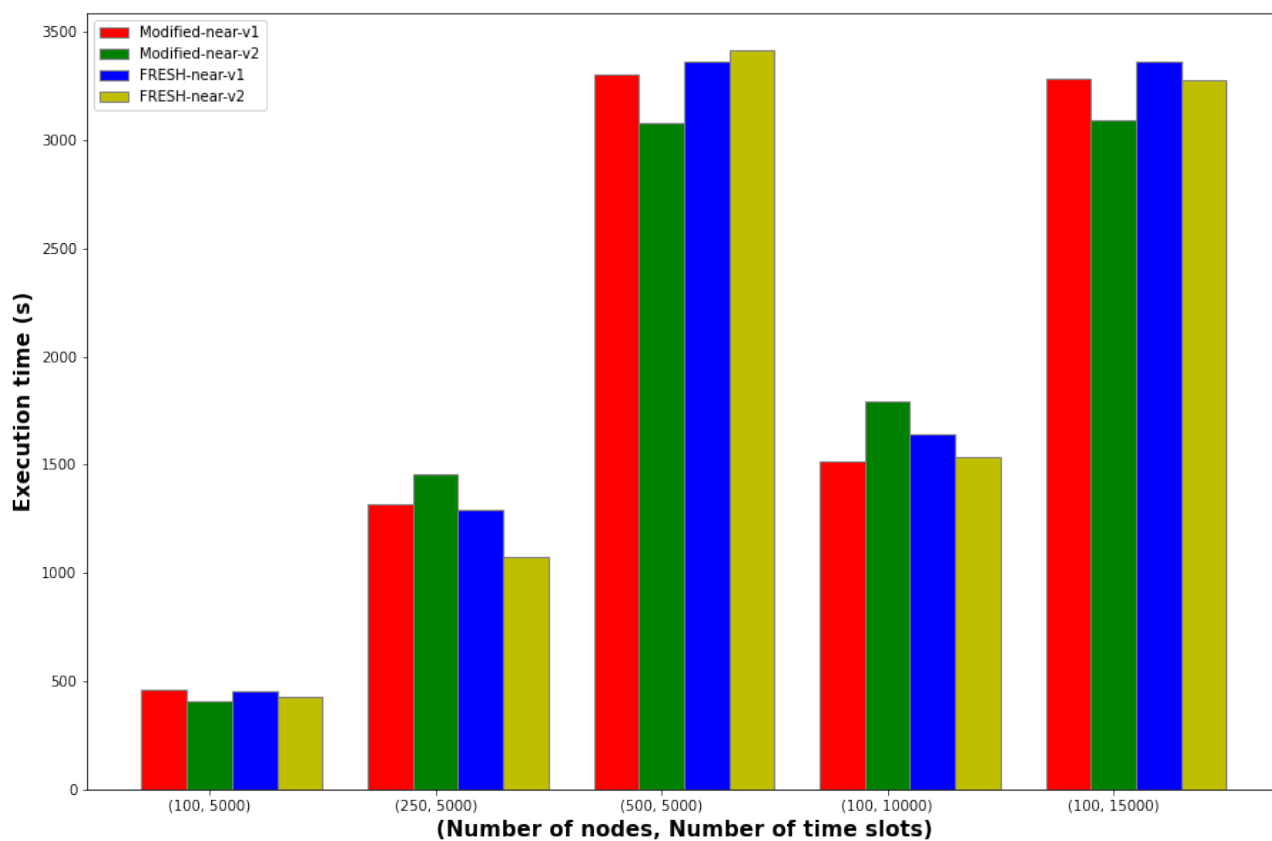
Όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση του φράγματος του AoI οδηγεί σε ελάττωση της ρυθμαπόδοσης και της μέσης ηλικίας των πακέτων σε όλες τις περιπτώσεις. Παρατηρείται πως η ελάττωση της μέσης ηλικίας είναι πιο απότομη για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1 και Modified-near-v2 σε σχέση με το πρωτόκολλο Modified-neigh. Παράλληλα, φαίνεται πως στο κομμάτι της ρυθμαπόδοσης, για όλα τα πρωτόκολλα η ελάττωση του φράγματος του AoI έως την τιμή 100 δεν επιφέρει σοβαρές μειώσεις στο throughput, ενώ υπάρχει αισθητή μείωση όταν το Bound τεθεί ίσο με 50. Ενδεχομένως, η τιμή 100 να αποτελεί ένα σημείο ισορροπίας (για αριθμό time slots ίσο με 5000). Επομένως, συμπεραίνεται εύκολα πως η μείωση του άνω φράγματος του AoI έως και την τιμή 100 (για αριθμό time slots ίσο με 5000) δε μεταβάλλει σημαντικά το throughput, συνεπώς θεωρείται επικερδής επιλογή, καθώς επιτυγχάνει πολύ απότομη μείωση στη μέση ηλικία των πακέτων. Το ότι η ρυθμαπόδοση είναι σχεδόν αμετάβλητη του Bound του AoI έως την τιμή 100 δικαιολογείται από το γεγονός πως για μεγάλες τιμές φράγματος (800,600), έχουμε λιγότερα drops packets αλλά πολύ περισσότερα remaining packets στο σύστημα, ενώ για μικρότερες τιμές φράγματος (200,100), έχουμε περισσότερα drops αλλά πολύ λιγότερα remaining packets, με αποτέλεσμα η τελική ρυθμαπόδοση του συστήματος να παραμένει σχεδόν αμετάβλητη, καθώς ο αριθμός των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων παραμένουν σχεδόν σταθερός.

Τέλος, αναμφισβήτητα σημαντική μετρική σε κάθε είδους προσομοίωση αποτελεί και η χρονική επίδοση (execution time). Πιο συγκεκριμένα, στην γραφική παράσταση του Σχήματος 15 μελετάται ο χρόνος που απαιτήθηκε για να ολοκληρωθούν οι προσομοιώσεις για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2 για διάφορες τιμές των παραμέτρων του συστήματος (επιλέχθηκαν εκούσια μεγάλες τιμές αυτών προκειμένου να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα).

Όπως είναι λογικό, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η έκδοση near-v2 απαιτεί λιγότερο χρόνο εκτέλεσης εν συγκρίσει με την έκδοση near-v1 στο εκάστοτε πρωτόκολλο, καθώς εκεί κάθε κόμβος αναζητά μόνο έναν καλύτερο "κοντινό" του κι όχι τον καλύτερο "κοντινό" του. Επιπλέον, παρατηρείται πως η αύξηση του αριθμού των time slots επιφέρει αρκετά πιο ομαλή αύξηση στο χρόνο εκτέλεσης από την αντίστοιχη αύξηση που επιφέρει ο διπλασιασμός του αριθμού των κόμβων του δικτύου, η οποία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σχεδόν εκθετική.

## Γενικά Σχόλια-Παρατηρήσεις

- Όσον αφορά τα πειράματα μεγαλύτερης κλίμακας (μεγάλος αριθμός κόμβων, μεγάλος αριθμός time slots), παρατηρείται πως τα 2 τροποποιημένα πρωτόκολλα Modified-near περιορίζουν καθοριστικά τόσο τη μέση ηλικία των πακέτων όσο και τη μέγιστη ηλικία που παρατηρείται στο σύστημα (η οποία ισούται φυσικά με την τιμή threshold που έχει τεθεί στην εκάστοτε προσομοίωση, μετά την οποία τα πακέτα γίνονται drop). Από την άλλη πλευρά, τα 2 πρωτόκολλα FRESH-near δεν ασχολούνται με την ηλικία των πακέτων, με αποτέλεσμα σχεδόν σε όλα τα πειράματα να προκύπτουν και πακέτα που πρακτικά κυκλοφορούν αενάως στο δίκτυο (παραδείγματος χάριν για αριθμό time slots 5000, η μέγιστη ηλικία που παρατηρείται στο σύστημα ισούται με 5000, δηλαδή κάποιο από τα πρώτα πακέτα του συστήματος δεν έχει παραδοθεί ακόμα στο τέλος της προσομοίωσης. Αντίστοιχα, για αριθμό time slots ίσο με 15000 παρατηρούνται Max AoI 14995 ή και 15000!). Γίνεται αντιληπτό λοιπόν πως σε αυτές τις περιπτώσεις, η παραμονή των πακέτων στο δίκτυο δεν προσφέρει απολύτως τίποτα, καθώς αυτά κυκλοφορούν αενάως από κόμβο σε κόμβο ή μένουν



Σχήμα 15: Χρόνος εκτέλεσης των προσομοιώσεων για διάφορες τιμές των παραμέτρων του συστήματος για τα πρωτόκολλα Modified-near-v1, Modified-near-v2, FRESH-near-v1 και FRESH-near-v2



αποθηκευμένα στους buffers των κόμβων του DTN, με την πιθανότητα επιτυχούς παράδοσής τους να είναι σημαντικά μειωμένη. Η κατάσταση γίνεται χειρότερη, αφού όχι μόνο τα πακέτα αυτά δεν προσφέρουν απολύτως τίποτα αλλά σπαταλούν και τους διαθέσιμους κόμβους του δικτύου. Με άλλα λόγια, σε μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση όπου οι κόμβοι θα είχαν buffers πεπερασμένης χωρητικότητας, τα πακέτα αυτά θα κάλυπταν άσκοπα θέση στους buffers, γεγονός το οποίο πιθανότητα θα είχε σημαντικό αντίκτυπο και στην ίδια τη ρυθμιαπόδοση του συστήματος.

- Μια εύλογη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι στα 3 τροποποιημένα πρωτόκολλα, ο αριθμός των remaining packets στο τέλος των προσομοιώσεων είναι σχετικά μικρός, καθώς τα πακέτα περιορίζονται στο κομμάτι της ηλικίας τους, με αποτέλεσμα να γίνονται drop. Από την άλλη πλευρά, στα 3 αυθεντικά πρωτόκολλα FRESH, ο αριθμός των remaining packets είναι πολύ μεγάλος (ιδιαίτερα στα FRESH-near), γεγονός το οποίο δικαιολογείται από το ότι όπως αναφέρθηκε και πριν, ακόμα και πακέτα που παράχθηκαν τις πρώτες χρονικές στιγμές της προσομοίωσης ενδέχεται να κυκλοφορούν στο δίκτυο.
- Στις προσομοιώσεις φαίνεται πως η αύξηση του μεγέθους του τετραγωνικού Grid από 100x100 σε 1000x1000 δεν επέφερε κάποια πολύ σημαντική μεταβολή στις μετρικές που εξετάζονται (ρυθμιαπόδοση, μέση ηλικία των πακέτων). Παρ' όλα αυτά, αυτό δεν είναι αλήθεια, καθώς στις προσομοιώσεις έχει αυξηθεί αναλόγως και η τιμή της ακτίνας γειτνίασης (και για το 100x100 και για το 1000x1000 έχει επιλεχθεί κατάλληλη ακτίνα γειτνίασης, με σκοπό ο αναμενόμενος αριθμός γειτόνων κάθε κόμβου να ισούται περίπου με το 7% του αριθμού των κόμβων του δικτύου).
- Όσον αφορά το execution time, προφανώς οι υλοποιήσεις των αλγορίθμων δεν είναι βέλτιστες και επιδέχονται βελτιώσεων, προκειμένου να μειωθεί η χρονική πολυπλοκότητά τους και ενδεχομένως να εκτελεστούν προσομοιώσεις σε ακόμα μεγαλύτερα δίκτυα και με αριθμό time slots ακόμα μεγαλύτερο.

## 5 Επίλογος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και των συμπερασμάτων από την εφαρμογή του προτεινόμενου πρωτοκόλλου δρομολόγησης στα DTNs. Τέλος, προτείνονται κάποιες ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις της ερευνητικής εργασίας.

### 5.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, μελετήθηκαν και αναπτύχθηκαν πρωτόκολλα τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν στα Delay Tolerant Networks, εμπεριέχοντας την έννοια της Ηλικίας της Πληροφορίας. Αρχικά, περιγράφηκε αναλυτικά το πρωτόκολλο FRESH, το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα στα DTNs, ιδίως λόγω της απλότητάς του σε θέματα υλοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκαν τρεις παραλλαγές του πρωτοκόλλου, ανάλογα με τον τρόπο όπου ο εκάστοτε κόμβος επιλέγει να βρει τον επόμενο κόμβο αναμετάδοσης για ένα συγκεκριμένο πακέτο του. Έπειτα, εξηγήθηκε πως η αυθεντική έκδοση του πρωτοκόλλου αυτού δε βοηθά στη διατήρηση μιας σχετικά μικρής ηλικίας των μεταδιδόμενων πακέτων στο δίκτυο DTN, με αποτέλεσμα η φρεσκάδα των πακέτων να εκλείπει όλο και περισσότερο με την πάροδο του χρόνου. Εν συνεχεία, αναλύθηκε το τροποποιημένο πρωτόκολλο FRESH το οποίο προτείνεται στην εργασία αυτή, με την προσθήκη της έννοιας του Age of Information. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου τα πακέτα να μη μεταφέρονται αενάως στο δίκτυο DTN (σπαταλώντας κατ' αυτόν τον τρόπο και τους διαθέσιμους πόρους του), μόλις υπερβούν κάποια συγκεκριμένη τιμή-κατωφλίου στον τομέα της ηλικίας τους, γίνονται αυτόματα drop από το δίκτυο. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν καταδεικνύουν την τεράστια ωφέλεια που αποκομίζει κανείς εφαρμόζοντας το τροποποιημένο πρωτόκολλο που προτείνεται στην εργασία όσον αφορά τη μετρική της μέσης ηλικίας των πακέτων. Ταυτόχρονα, αποδείχθηκε πειραματικά πως η επιβολή του φράγματος στην ηλικία των πακέτων δεν επηρέασε σημαντικά το κομμάτι της ρυθμαπόδοσης του συστήματος. Μάλιστα φάνηκε πως η τιμή του φράγματος του AoI μπορεί να τεθεί αρκετά χαμηλά, χωρίς αξιόλογη μεταβολή του throughput και με ταυτόχρονη επίτευξη τεράστιας αύξησης στη φρεσκάδα των μεταδιδόμενων πακέτων.

### 5.2 Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία διαθέτει ενδιαφέρουσες επεκτάσεις οι οποίες θα μπορούσαν να μελετηθούν μελλοντικά. Μερικές προτεινόμενες εξ αυτών παρατίθενται παρακάτω:

- Πιο ρεαλιστική πειραματική προσομοίωση των εκδόσεων του πρωτοκόλλου FRESH. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία έγινε η σιωπηλή υπόθεση πως ο αποθηκευτικός χώρος των κόμβων του DTN (buffer) έχει άπειρη χωρητικότητα, στοιχείο το οποίο σίγουρα δε συνάδει με την πραγματικότητα. Όπως είναι λογικό, οι κόμβοι στα πραγματικά συστήματα DTN διαθέτουν περιορισμένους πόρους σε μνήμη και σε αποθηκευτικό χώρο. Επομένως, ενδέχεται μια μελλοντική προσομοίωση όπου οι κόμβοι θα διαθέτουν πεπερασμένο χώρο buffer να αναδείξει ακόμα περισσότερο τα οφέλη από τη χρήση του προτεινόμενου τροποποιημένου πρωτοκόλλου FRESH ακόμη όχι μόνο στον τομέα της ηλικίας και της φρεσκάδας των πακέτων αλλά και στο τομέα της ρυθμαπόδοσης του συστήματος.

- Διεξαγωγή προσομοιώσεων του προτεινόμενου πρωτοκόλλου και σε πραγματικά Delay Tolerant Networks. Στην παρούσα εργασία, για την πειραματική αξιολόγηση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου FRESH κατασκευάστηκαν συνθετικά δίκτυα, στα οποία για την κινητικότητα των κόμβων εφαρμόστηκε το πολύ διαδεδομένο μοντέλο κινητικότητας Random Waypoint Model. Θα ήταν πολύ ενδιαφέρουσα η διεξαγωγή προσομοιώσεων πάνω σε πραγματικά Δίκτυα Ανεκτά σε Καθυστέρηση από την πραγματική ζωή, προκειμένου να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου πρωτοκόλλου, καθώς και να αναδειχθούν σε μεγαλύτερο βαθμό τα οφέλη από τη χρήση του.
- Εισαγωγή της έννοιας της Ηλικίας της Πληροφορίας και σε άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης στο DTN. Στη σχετική βιβλιογραφία αναφέρθηκε μια πληθώρα πρωτοκόλλων δρομολόγησης που έχουν προταθεί και αποσκοπούν στην όσο το δυνατόν πιο ομαλή λειτουργία αυτού του είδους των υποδικτύων. Ενδεχομένως η έννοια του AoI να μπορέσει να ταιριάζει και να συνυπάρξει ομαλά με πολλά από τα πρωτόκολλα αυτά, ιδίως αυτά τα οποία ανήκουν στις κατηγορίες Encounter-based Protocols και Time-based Protocols. Κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι εφικτή η βελτίωση των μετρικών ποιότητας των DTNs με ό,τι αυτό συνεπάγεται για τη μελλοντική εξέλιξη της ίδιας της ποιότητας ζωής στον κόσμο.

## Αναφορές

- [1] Shaw, M. E. (1964). Communication networks. *Advances in Experimental Social Psychology*, 1, 111–147. [https://doi.org/10.1016/S0065-2601\(08\)60050-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2601(08)60050-7).
- [2] Shimbel, A. Structural parameters of communication networks. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 15, 501–507 (1953). <https://doi.org/10.1007/BF02476438>
- [3] D. C. Kilper et al., "Power Trends in Communication Networks," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, no. 2, pp. 275-284, March-April 2011, doi: 10.1109/JSTQE.2010.2074187.
- [4] Barry M. Leiner, Vinton G. Cerf, David D. Clark, Robert E. Kahn, Leonard Kleinrock, Daniel C. Lynch, Jon Postel, Larry G. Roberts, and Stephen Wolff. 2009. A brief history of the internet. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 39, 5 (October 2009), 22–31. <https://doi.org/10.1145/1629607.1629613>
- [5] Curran, J., Fenton, N., & Freedman, D. (2012). *Misunderstanding the Internet* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203146484>
- [6] Donna L. Hoffman, Thomas P. Novak, and Alladi Venkatesh. 2004. Has the Internet become indispensable? *Commun. ACM* 47, 7 (July 2004), 37–42. <https://doi.org/10.1145/1005817.1005818>
- [7] Robert P. Gilles & Cathleen Johnson, 2000. "original papers : Spatial social networks," *Review of Economic Design*, Springer;Society for Economic Design, vol. 5(3), pages 273-299.
- [8] Young, H.P., 1999. "Diffusion in Social Networks," *Papers 2*, Brookings Institution - Working Papers.
- [9] X. Yu, C. Cecati, T. Dillon and M. G. Simões, "The New Frontier of Smart Grids," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 49-63, Sept. 2011, doi: 10.1109/MIE.2011.942176.
- [10] Yu, Y.; Yang, J.; Chen, B. The Smart Grids in China—A Review. *Energies* 2012, 5, 1321-1338. <https://doi.org/10.3390/en5051321>
- [11] S. M. Bellovin. 1989. Security problems in the TCP/IP protocol suite. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 19, 2 (April 1, 1989), 32–48. <https://doi.org/10.1145/378444.378449>
- [12] S. M. Bellovin, "A look back at "security problems in the TCP/IP protocol suite," 20th Annual Computer Security Applications Conference, 2004, pp. 229-249, doi: 10.1109/CSAC.2004.3.
- [13] Dunkels, A., Alonso, J., & Voigt, T. (2003). *Making TCP/IP Viable for Wireless Sensor Networks* (1st ed.). Retrieved from Swedish Institute of Computer Science website: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-22055>
- [14] O. Younis and S. Fahmy, "Constraint-based routing in the internet: Basic principles and recent research," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 5, no. 1, pp. 2-13, Third Quarter 2003, doi: 10.1109/COMST.2003.5342226.

- [15] H. Tangmunarunkit, R. Govindan, S. Shenker and D. Estrin, "The impact of routing policy on Internet paths," Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213), 2001, pp. 736-742 vol.2, doi: 10.1109/INFCOM.2001.916262.
- [16] Bocharov, P. P., D'Apice, C. and Pechinkin, A. V.. Queueing Theory, Berlin, Boston: De Gruyter, 2011. <https://doi.org/10.1515/9783110936025>
- [17] Lakatos, László & Szeidl, László & Telek, Miklós. (2013). Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications. 10.1007/978-1-4614-5317-8.
- [18] J. P. Lehoczky, "Real-time queueing theory," 17th IEEE Real-Time Systems Symposium, 1996, pp. 186-195, doi: 10.1109/REAL.1996.563715.
- [19] Antzela Kosta, Nikolaos Pappas and Vangelis Angelakis (2017), "Age of Information: A New Concept, Metric, and Tool", Foundations and Trends in Networking: Vol. 12, No. 3, pp 162–259. DOI: 10.1561/13000000060.
- [20] Whitt, Ward. (2002). An Introduction to Stochastic-Process Limits and their Application to Queues. 10.1007/b97479.
- [21] Schwarz, M., Sauer, C., Daduna, H. et al. M/M/1 Queueing systems with inventory. Queueing Syst 54, 55–78 (2006). <https://doi.org/10.1007/s11134-006-8710-5>
- [22] K. V. Vijayashree & B. Janani (2018) Transient analysis of an M/M/1 queueing system subject to differentiated vacations, Quality Technology & Quantitative Management, 15:6, 730-748, DOI: 10.1080/16843703.2017.1335492
- [23] W. Zhao and J. Stankovic, "Performance analysis of FCFS and improved FCFS scheduling algorithms for dynamic real-time computer systems," in 1989 Real-Time Systems Symposium, Santa Monica, CA, USA, 1989 pp. 156,157,158,159,160,161,162,163,164,165. doi: 10.1109/REAL.1989.63566
- [24] (2003). Basic Properties of the Poisson Process. In: An Introduction to the Theory of Point Processes. Probability and its Applications. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/0-387-21564-6\\_2](https://doi.org/10.1007/0-387-21564-6_2)
- [25] L. Y. Chan, Dennis K. J. Lin, M. Xie & T. N. Goh (2002) Cumulative probability control charts for geometric and exponential process characteristics, International Journal of Production Research, 40:1, 133-150, DOI: 10.1080/00207540110073073
- [26] S. V. Subramanian and R. Dutta, "Comparative Study of M/M/1 and M/D/1 Models of a SIP Proxy Server," 2008 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, 2008, pp. 397-402, doi: 10.1109/ATNAC.2008.4783357.
- [27] J. P. Champati, H. Al-Zubaidy and J. Gross, "Statistical guarantee optimization for age of information for the D/G/1 queue," IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2018, pp. 130-135, doi: 10.1109/INFCOMW.2018.8406909.

- [28] Brian Davies, Brian Martin, Numerical inversion of the laplace transform: a survey and comparison of methods, *Journal of Computational Physics*, Volume 33, Issue 1, 1979, Pages 1-32, ISSN 0021-9991, [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(79\)90025-1](https://doi.org/10.1016/0021-9991(79)90025-1).
- [29] S. Kaul, R. Yates and M. Gruteser, "Real-time status: How often should one update?," 2012 Proceedings IEEE INFOCOM, 2012, pp. 2731-2735, doi: 10.1109/INFCOM.2012.6195689.
- [30] M. Costa, M. Codreanu and A. Ephremides, "On the Age of Information in Status Update Systems With Packet Management," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 62, no. 4, pp. 1897-1910, April 2016, doi: 10.1109/TIT.2016.2533395.
- [31] S. Ali, J. Qadir and A. Baig, "Routing protocols in Delay Tolerant Networks - a survey," 2010 6th International Conference on Emerging Technologies (ICET), 2010, pp. 70-75, doi: 10.1109/ICET.2010.5638377.
- [32] Verma, Ankita & Savita, & Kumar, Sanjiv. (2021). Routing Protocols in Delay Tolerant Networks: Comparative and Empirical Analysis. *Wireless Personal Communications*. 118. 10.1007/s11277-020-08032-4.
- [33] Zhang, Jie & Wang, Gang & Liu, Chen & Zhao, Fangzheng & Zhang, Xin. (2019). Delay Tolerant Network and the Algorithms of DTN Routing. *Journal of Physics: Conference Series*. 1169. 012058. 10.1088/1742-6596/1169/1/012058.
- [34] Mohammed J. F. Alenazi, Yufei Cheng, Dongsheng Zhang, and James P. G. Sterbenz. 2015. Epidemic routing protocol implementation in ns-3. In *Proceedings of the 2015 Workshop on ns-3 (WNS3 '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 83-90. <https://doi.org/10.1145/2756509.2756523>
- [35] X. Lu and P. Hui, "An Energy-Efficient n-Epidemic Routing Protocol for Delay Tolerant Networks," 2010 IEEE Fifth International Conference on Networking, Architecture, and Storage, 2010, pp. 341-347, doi: 10.1109/NAS.2010.46.
- [36] Vahdat, A, & Becker, D. (2000). Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Duke University, Durham, NC, Technical Report CS-2000-06.
- [37] Z. Feng and K. Chin, "A Unified Study of Epidemic Routing Protocols and their Enhancements," 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum, 2012, pp. 1484-1493, doi: 10.1109/IPDPSW.2012.187.
- [38] Samo Grasic, Elwyn Davies, Anders Lindgren, and Avri Doria. 2011. The evolution of a DTN routing protocol - PRoPHETv2. In *Proceedings of the 6th ACM workshop on Challenged networks (CHANTS '11)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 27-30. <https://doi.org/10.1145/2030652.2030661>
- [39] Lindgren, A., Doria, A., & Schelen, O. (2003). Probabilistic routing in intermittently connected networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 7(3), 19-20.

- [40] S. Bhattacharjee, S. Basu, S. Roy and S. Das Bit, "Best-effort delivery of emergency messages in post-disaster scenario with content-based filtering and Priority-enhanced PRoPHET over DTN," 2016 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/COMSNETS.2016.7439936.
- [41] Z. Du, C. Wu, T. Yoshinaga and Y. Ji, "A Prophet-Based DTN Protocol for VANETs," 2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCCom/IOP/SCI), 2018, pp. 1876-1879, doi: 10.1109/SmartWorld.2018.00315.
- [42] Ayaz, Muhammad & Abdullah, Azween & Low, Tang. (2010). Dynamic Cluster Based Routing for Underwater Wireless Sensor Networks. 10.1109/ITSIM.2010.5561598.
- [43] Pirzadi, S., Pourmina, M.A. & Safavi-Hemami, S.M. A novel routing method in hybrid DTN–MANET networks in the critical situations. *Computing* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00607-022-01084-3>
- [44] Li, Z., & Shen, H. (2013). SEDUM: Exploiting social networks in utility-based distributed routing for DTNs. *IEEE Transactions on Computers*, 62(1), 83–97.
- [45] LeBrun, J., Chuah, C.N., Ghosal, D., & Zhang, M. (2005). Knowledge-based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks. In *IEEE VTC'05-Spring*, Stockholm, Sweden.
- [46] Becker, C., & Schiele, G. (2001). New mechanisms for routing in ad hoc networks through world models. In *4th Plenary Cabernet Workshop*, Pisa, 2001 (pp. 1–4).
- [47] Daly, E. M., & Haahr, M. (2007). Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs. In *Proceedings of the 8th ACM international symposium on mobile ad hoc networking and computing*, September 09–14 (pp. 32–40).
- [48] R. Ramanathan, R. Hansen, P. Basu, R.R. Hain, R. Krishnan, "Prioritized epidemic Routing for Opportunistic Networks", *Proc. of ACM on Mobile Opportunistic Networks, MobiOpp*, June 2007
- [49] E.P.C. Jones and P.A.S. Ward, "Routing Strategies for Delay-Tolerant Networks", *Computer Communications*, 2008
- [50] Grossglauser, M., & Tse, D. (2002). Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 10(4), 477–486.
- [51] A. Lindgren, A. Doria, O. Schelen, "Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 7, Issue 3, pp. 19-20, July, 2003
- [52] T. Spyropoulos, K. Psounis, c. S. Raghavendra, "Spray and Wait: An Efficient Routing scheme for Intermittently Connected mobile networks", *Proc. of ACM on WDTN*, 2005

- [53] Jain, S., Fall, K., & Patra, R. (2004). Routing in a delay tolerant network. In Proceedings of the 2004 conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, Portland, Oregon (pp. 145–158).
- [54] J. Burgess, B. Gallagher, D. Jensen and B.N. Levine, “MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-tolerant Networks”, Proc. of IEEE INFOCOM, April 2006
- [55] Erramilli, V., & Crovella, M. (2008). Forwarding in opportunistic networks with resource constraints. In Proceedings of the third ACM workshop on challenged networks, San Francisco, CA (pp. 41–48).
- [56] Nelson, S., Bakht, M., & Kravets, R. (2009). Encounter-based routing in DTNs. In IEEE INFOCOM’09, Rio de Janeiro, Brazil.
- [57] Dubois-Ferriere, H., Grossglauser, M., & Vetterli, M. (2003). Age matters: Efcient route discovery in mobile ad hoc networks using encounter ages. In Proceedings of the 4th international symposium on mobile ad hoc networking and computing (pp. 257–266) Annapolis, MD.
- [58] Li, Z., & Shen, H. (2013). SEDUM: Exploiting social networks in utility-based distributed routing for DTNs. *IEEE Transactions on Computers*, 62(1), 83–97.
- [59] Spyropoulos, T., Psounis, K., & Raghavendra, C. (2008). Efcient routing in intermittently connected mobile networks: The single-copy case. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(1), 63–76.
- [60] Merugu, S., Ammar, M., & Zegura, E. (2004). Routing in space and time in networks with predictable mobility. Technical Report GIT-CC-04-7, Georgia Institute of Technology.
- [61] Niu, J., Guo, J., Cai, Q., Sadeh, N., & Guo, S. (2011). Predict and spread: An efcient routing algorithm for opportunistic networking. In *IEEE wireless communications and networking conference* (pp. 498–503) Quintana Roo.
- [62] Balasubramanian, A., Levine, B. N., & Venkataramani, A. (2007). DTN routing as a resource allocation problem. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 37(4), 373–384. <https://doi.org/10.1145/1282427.1282422>.
- [63] . Demmer M., & Fall K. (2007). DTLRSR: Delay tolerant routing for developing regions. *ACM NSDR’07*, Kyoto, Japan.
- [64] Huang, H. Y., Luo, P. E., Li, M., Li, D., Li, X., Shu, W., et al. (2007). Performance evaluation of suvnet with real-time traf c data. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(6), 3381–3396.
- [65] J. Shen, S. Moh, and I. Chung, “Routing Protocols in Delay Tolerant Networks: A Comparative Survey”, 23rd International Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, (ITC-CSCC 2008)
- [66] E.P.C. Jones, L.Li, P.A.S. Ward, “Practical Routing in Delay-Tolerant Networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 6, No. 8, Aug 2007



- [67] Zhao, W., Ammar, M., & Zegura, E. (2004). A Message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In Proceedings of the 5th ACM international symposium on mobile ad hoc networking and computing, Roppongi Hills, Tokyo, May 24–26 (pp. 187–198).
- [68] Mei, A., & Stefa, J. (2012). Give2get: Forwarding in social mobile wireless networks of selfish individuals. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 9(4), 569–582.
- [69] Oliveira De, E. C. R., & Albuquerque De, C. V. N. (2009). Nectar: A dtn routing protocol based on neighborhood contact history. In ACM SAC’09, Honolulu, Hawaii, USA.
- [70] Zhang, Y., & Zhao, J. (2009). Social network analysis on data diffusion in delay tolerant networks. In Proceedings of the tenth ACM international symposium on mobile ad hoc networking and computing, LA, May 18–21 (pp. 345–346).
- [71] Wang, Y., Jain, S., Martonosi, M., & Fall, K. (2005). Erasure-coding based routing for opportunistic networks. In ACM WDTN’05, Philadelphia, Pennsylvania.
- [72] Farahmand, F., Cerutti, I., Patel, A., Zhang, Q., & Jue, J. (2008). Relay node placement in vehicular delaytolerant networks. In IEEE GLOBECOM’08, New Orleans, Louisiana, USA, 2008.
- [73] Gao, W., Cao, G., Iyengar, A., & Srivatsa, M. (2014). Cooperative caching for efficient data access in disruption tolerant networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(3), 611–625.
- [74] Poersch, A., Macedo, D., & Nogueira, J. (2012). Resource location for opportunistic networks. In fifth international conference on information technology, mobility and security (pp. 1–5), (NTMS), Istanbul.
- [75] Nguyen, H., & Giordano, S. (2012). Context information prediction for social-based routing in opportunistic networks. *Ad Hoc Networks*, 10(8), 1557–1569.
- [76] Ramanathan, R., Hansen, R., Basu, P., Rosales-Hain, R., & Krishnan, R. (2007). Prioritized epidemic routing for opportunistic networks. In ACM MobiOpp’07, San Juan, Puerto Rico, USA.
- [77] <https://www.geeksforgeeks.org/random-waypoint-model/>
- [78] <https://github.com/giorgoskallitsis99/DTN-AoI>
- [79] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388-404, March 2000, doi: 10.1109/18.825799.