



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Αυτο-οργανούμενα Δίκτυα Ανεκτικά σε Καθυστέρηση

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Άννα Βαζιντάρη

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Αυτο-οργανούμενα Δίκτυα Ανεκτικά σε Καθυστέρηση

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Άννα Βαζιντάρη

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Χρήστος Κανάλης  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γεώργιος Φικιώρης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Συμεών Παπαβασιλείου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Αθανάσιος Παναγόπουλος  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Μιχαήλ Θεολόγου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γεώργιος Ευθύμογλου  
Αν. Καθηγητής Πανεπιστημίου  
Πειραιώς

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

.....

Άννα Βαζιντάρη

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Άννα Βαζιντάρη, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

## Περίληψη

Η διατριβή μελετά την εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα ανεκτικά σε καθυστέρηση που αποτελούνται από αυτόνομους και ενεργειακά περιορισμένους κόμβους. Συγκεκριμένα, η διατριβή αντιμετωπίζει την κατανάλωση ενέργειας σε τρεις κρίσιμες από πλευράς ενεργειακής κατανάλωσης λειτουργίες, τη μετάδοση πολλαπλών αντιγράφων πληροφορίας στο δίκτυο, την ελεγχόμενη κινητικότητα των κόμβων του δικτύου και την ενεργητική ανίχνευση δικτύου που αυτοί επιτελούν. Η δυναμική φύση των δικτύων ανεκτικών σε καθυστέρηση, για την οποία οφείλονται οι συχνές αποσυνδέσεις λόγω εξάντλησης των ενεργειακών πόρων ή της αραιής κατανομής των κόμβων στην περιοχή ανάπτυξής τους, επιτάσσει την ανεξάρτητη δράση των ενδιάμεσων κόμβων που έχουν στόχο την παράδοση της πληροφορίας στους κόμβους-προορισμούς. Στο πλαίσιο αυτό, οι αυτόνομοι κόμβοι παρακινούνται άλλοτε στη μετάδοση πολλαπλών αντιγράφων της αποθηκευμένης πληροφορίας τους προκειμένου να εξασφαλίσουν ότι αυτή θα φθάσει στον προορισμό της, άλλοτε στην αυτο-κίνηση (κίνηση που καθορίζεται από τον ίδιο κόμβο), ώστε να αυξηθεί η πιθανότητα συνάντησης κόμβων εντός εμβέλειας, και άλλοτε στην εκπομπή συχνών σημάτων ανίχνευσης δικτύου προκειμένου να αξιοποιήσουν όποια ευκαιρία σύναψης επικοινωνίας με κόμβο εντός εμβέλειας προκύψει. Και οι τρεις αυτές διαδικασίες μπορούν να αποβούν εξαιρετικά ενεργοβόρες αν τα σχήματα που προτιμώνται για την αντιμετώπιση των αντίστοιχων επιπτώσεων δεν σχεδιαστούν κατάλληλα, κατά κύριο λόγο λαμβάνοντας υπόψη τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων με στόχο την εξισορρόπησή τους με το εκάστοτε προς βελτιστοποίηση μέγεθος.

Η διατριβή αντιμετωπίζει το θέμα της διάχυσης πολλαπλών αντιγράφων πληροφορίας στο δίκτυο αναπτύσσοντας ένα σχήμα που βασίζεται στην τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης/προώθησης που προωθούν ή αντιγράφουν την αποθηκευμένη πληροφορία, η τεχνική κωδικοποίησης δικτύου επεξεργάζεται την πληροφορία των κόμβων, συνδυάζοντας κατάλληλα τα αποθηκευμένα πακέτα και προωθώντας, τελικά, κατάλληλο συνδυασμό αυτών στον κόμβο με τον οποίο έχει συναφθεί επικοινωνία. Η διατριβή εφαρμόζει την τεχνική της γραμμικής κωδικοποίησης δικτύου, που είναι κατάλληλη για αυτο-οργανούμενα δίκτυα με αυτόνομους κόμβους, καθώς ο γραμμικός συνδυασμός των αποθηκευμένων πακέτων προκύπτει από πολλαπλασιασμό αυτών με γραμμικές συνιστώσες που οι κόμβοι επιλέγουν τυχαία από ένα αρκούντως μεγάλο

πεπερασμένο πεδίο. Το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα βασίζεται τόσο στην τεχνική κωδικοποίησης δικτύου για την προώθηση της πληροφορίας όσο και στην κατάλληλη αποθήκευση αυτής στους περιορισμένους αποθηκευτικούς πόρους των κόμβων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν αποδεικνύουν ότι το NC/MMA σχήμα επιτυγχάνει δραστική μείωση της πλεονάζουσας πληροφορίας που διακινείται στο δίκτυο και, κατ' επέκταση, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω μετάδοσης μηνυμάτων, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Παράλληλα, διατηρείται η πιθανότητα και η καθυστέρηση παράδοσης της πληροφορίας ενώ σε ορισμένες προσομοιώσεις παρατηρείται ακόμη και βελτίωση αυτών.

Στο πλαίσιο της ελεγχόμενης κινητικότητας, η διατριβή αξιοποιεί την κίνηση των κόμβων αναπτύσσοντας ένα σχήμα που παρακινεί τους κόμβους σε αυτο-κίνηση, λαμβάνοντας υπόψη τους εναπομένοντες ενεργειακούς τους πόρους και το ρυθμό επαφών στο δίκτυο. Έχει αποδειχθεί επενειλημμένα στη σχετική βιβλιογραφία ότι η κινητικότητα των κόμβων, εκτός από τις προκλήσεις που δημιουργεί σχετικά με τη δυναμική τοπολογία του δικτύου, αυξάνει την πιθανότητα συνάντησης των κόμβων. Ωστόσο, η κινητικότητα των κόμβων σχετίζεται και με αυξημένη κατανάλωση ενέργειας λόγω της φυσικής κίνησης των κόμβων και της αυξημένης συχνότητας με την οποία αυτοί ανιχνεύουν/σαρώνουν το δίκτυο ενόσω βρίσκονται σε κίνηση. Το προτεινόμενο σχήμα καλείται να αντιμετωπίσει το εξής δίλημμα των κόμβων: να κινηθούν με στόχο την αύξηση της πιθανότητας εύρεσης κόμβου εντός εμβέλειας ή να μείνουν ακίνητοι προσδοκώντας ότι κάποιος άλλος κόμβος του δικτύου θα κινηθεί. Το δίλημμα αυτό σε συνδυασμό με την αντίστοιχη σχέση ανταλλαγής μεταξύ του κόστους κίνησης και της πιθανότητας συνάντησης κόμβων του δικτύου αντιμετωπίζονται στη διατριβή. Η μαθηματική διατύπωση του σχετικού προβλήματος διαχείρισης της κινητικότητας κόμβων που ανήκουν σε δίκτυα ανεκτικά σε καθυστέρηση πραγματοποιείται με χρήση της θεωρίας παιγνίων που αποτελεί το κατεξοχήν εργαλείο μαθηματικής διατύπωσης σχέσεων ανταλλαγής. Τα αριθμητικά αποτελέσματα φανερώνουν ότι το προτεινόμενο σχήμα προσφέρει σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τη σχετικά μικρότερη μείωση στην πιθανότητα συνάντησης. Σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα ανεκτικά σε μείωση της πιθανότητας συνάντησης, το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να προσφέρει σημαντική επέκταση της διάρκειας ζωής.

Στο πλαίσιο της ενεργητικής ανίχνευσης του δικτύου, η διατριβή προτείνει ένα αυτόνομο σχήμα που παρακινεί τους κόμβους σε εκπομπή σημάτων ανίχνευσης δικτύου λαμβάνοντας υπόψη τους εναπομένοντες ενεργειακούς τους πόρους και το ρυθμό επαφών στο δίκτυο. Ενώ η ανίχνευση δικτύου σε αραιά δίκτυα ανεκτικά σε καθυστέρηση αποτελεί το μόνο τρόπο σύναψης επικοινωνίας με κόμβους που βρίσκονται εντός εμβέλειας, λανθασμένη σχεδίαση της διαδικασίας αυτής ενδέχεται να οδηγήσει σε άσκοπη κατανάλωση ενέργειας ή σε απώλεια ευκαιριών σύναψης επικοινωνίας με κόμβους εντός εμβέλειας. Δεδομένου του ενεργειακού κόστους εκπομπής σήματος ανίχνευσης, το προτεινόμενο σχήμα καλείται να αντιμετωπίσει

το εξής δίλημμα των κόμβων: να εκπέμψουν σήμα ανίχνευσης με στόχο τον εντοπισμό κόμβου εντός εμβέλειας ή να μην εκπέμψουν, προσδοκώντας ότι κάποιος άλλος κόμβος του δικτύου θα το πράξει. Το δίλημμα αυτό σε συνδυασμό με την αντίστοιχη σχέση ανταλλαγής μεταξύ του κόστους ανίχνευσης και της πιθανότητας επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου αντιμετωπίζονται στη διατριβή με εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει σημαντική μείωση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας για την ανίχνευση του δικτύου, διατηρώντας, παράλληλα, ένα ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο της πιθανότητας επικοινωνίας. Σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα που επιδέχονται μείωση της πιθανότητας επικοινωνίας, το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να επεκτείνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής.

Συνοψίζοντας, η διατριβή συμβάλλει ερευνητικά στην αντιμετώπιση της εξοικονόμησης ενέργειας στα ενεργειακά περιορισμένα δίκτυα ανεκτικά σε καθυστέρηση.

**Λέξεις κλειδιά:** Αυτο-οργανούμενα δίκτυα ανεκτικά σε καθυστέρηση, κωδικοποίηση δικτύου, ελεγχόμενη κινητικότητα, ενεργητική ανίχνευση, θεωρία παιγνίων





## Abstract

This thesis deals with energy-efficiency in wireless self-organizing delay tolerant networks (DTNs) comprising autonomous, energy-constrained nodes. In particular, the thesis addresses energy consumption under three critical aspects of DTNs; the information overhead diffused in the network, the controlled mobility of DTN nodes and the active sensing they perform. The dynamic DTN nature, resulting from frequent disconnections of inter-nodal links, which is due to either the exhaustion of energy resources or to node sparsity, motivates the autonomous DTN nodes to perform either of the following operations (i) transmit multiple copies of stored information to ensure that the information reaches its destination (ii) move, in order to increase the encounter probability with nodes within their range or (iii) perform active sensing to exploit any chance of establishing communication with neighboring nodes. These operations may be extremely energy consuming if not properly designed. Hence, in the attempt to optimize specific network performance metrics, the relevant schemes should take into account the residual energy resources of DTN nodes.

The thesis addresses the issue of information overhead diffusion in DTNs by proposing a scheme based on Network Coding (NC). As opposed to traditional routing/forwarding protocols employed in DTNs that store and forward replicas of received information, the NC technique allows the intermediate nodes to process the received packets and forward a combination of them to the next node on the end-to-end path; when linear NC is employed, the packets are linearly combined before transmission. The thesis applies the random linear NC (RLNC), which is suitable for self-organized networks with autonomous nodes. This is accomplished by multiplying the stored information with linear coefficients randomly selected by the DTN nodes from a sufficiently large finite field. The proposed NC / MMA scheme implements NC both for storing and forwarding the received information to the next node on the end-to-end path. Extensive simulations have shown that the proposed NC / MMA scheme achieves a drastic reduction (i) of the information overhead diffused in the DTN and (ii) of the energy consumption due to transmission, thus extending the network lifetime.

In the framework of controlled mobility, the thesis proposes a DTN mobility scheme that regulates the nodes movement based on their residual energy resources and the contact rate characterizing the network. It has been verified in the literature that mobility increases the nodes encountering probability. However, the nodes mobility induces an energy cost due both

to the nodes physical movement and to the increased sensing frequency. This energy mobility cost gives rise to the following dilemma; should DTN nodes move in order to increase their encounter probability or should they stay static expecting that other nodes will move? This dilemma along with the respective trade-off between mobility cost and encounter probability are dealt with by the thesis. To formulate the relevant DTN mobility problem, game theory is employed as it can effectively deal with such trade-offs. Extensive simulations have shown that the proposed scheme is capable of properly handling the trade-off between energy consumption and encounter probability, offering a significant reduction in energy consumption compared to standard mobility models, at the cost of a considerably smaller reduction in encounter probability. In wireless self-organizing DTNs amenable to encounter probability reduction, the proposed scheme, being capable of regulating nodes mobility, may offer a significant lifetime extension.

The thesis also addresses the subject of active sensing in DTNs. An autonomous scheme is proposed that regulates nodes active sensing, taking into account their residual energy resources. Although contact probing is the only way of establishing communication between neighboring nodes, when not properly designed, it may lead to unnecessary energy consumption or to missed chances of establishing communication between nodes in sparse DTNs. The energy cost induced due to network probing gives rise to the following dilemma; should DTN nodes perform contact probing in order to increase the probability of establishing connection with neighboring nodes or not, expecting that other nodes will perform probing? This dilemma along with the respective trade-off between the energy cost due to probing and the connection probability are dealt with by the thesis employing game theory. Extensive simulations have shown that the proposed scheme handles the trade-off between energy consumption for probing and connection probability, offering a significant reduction in energy consumption, at the same time preserving a minimum acceptable connection probability level. In wireless self-organizing DTNs amenable to connection probability reduction, the proposed scheme, being capable of regulating nodes active sensing, may offer a significant lifetime prolongation.

Concluding, the thesis contributes in the area of energy-efficiency in wireless self-organizing delay tolerant networks.

**Keywords: Delay tolerant networks, wireless self-organizing networks, network coding, controlled mobility, contact probing, game theory**

## Ευχαριστίες

Η επιλογή της έναρξης εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής το Νοέμβριο του 2007 υπήρξε συνειδητή. Η ανάγκη για συνεχή μάθηση και προσφορά σε ερευνητικό επίπεδο υπό τη στέγη ενός ελληνικού πανεπιστημίου αποτέλεσαν οδηγό και κίνητρό μου όλα αυτά τα χρόνια. Στο ταξίδι αυτό, συνοδοιπόρος και πνευματικός αρωγός υπήρξε ο Επιβλέπων Καθηγητής μου, Παναγιώτης Κωττής, η συμβολή του οποίου ήταν καταλυτική για την ολοκλήρωση της διατριβής μου. Η καθοδήγηση του μέσα από τις ουκ ολίγες συζητήσεις μας, η επιμονή του στη λεπτομέρεια όπως και η πολύχρονη ερευνητική του εμπειρία τον κατέστησαν εξάίρετο και έμπιστο σύμβουλο στην ερευνητική μου πορεία. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την αμέριστη συμπαράστασή του και την κατανόηση των συνθηκών της εργασίας μου, την εμπιστοσύνη του στο πρόσωπο μου, το χρόνο και τη σημασία που έδινε στις απόψεις και την προσπάθειά μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην αδερφή μου Ελένη και τον εργοδότη μου, χάρη στους οποίους είχα τη δυνατότητα να εργάζομαι τα περισσότερα χρόνια της εκπόνησης της διατριβής μου, αποκτώντας πολύτιμη εργασιακή εμπειρία και πόρους που ενίσχυσαν το ερευνητικό μου έργο. Η ανοχή, υπομονή και υποστήριξη τους έδρασαν επικουρικά επιτρέποντας την απρόσκοπτη συνέχιση της ερευνητικής μου προσπάθειας.

Στο πλαίσιο εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής, ευχαριστώ θερμά τη Χριστίνα Βλάχου με την οποία, ως επιβλέπων της διπλωματικής της εργασίας, συνεργαστήκαμε εξαιρετικά επιτυγχάνοντας δημοσιεύσεις εργασιών στον τομέα της κωδικοποίησης δικτύου. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την Αγγελική Κορδαλή για τη συμπαράσταση στην κοινή μας πορεία υπό το πλαίσιο του προγράμματος “Ηράκλειτος II”.

Σε προσωπικό επίπεδο, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Μαρίνα και Κωνσταντίνο, για την συμπαράσταση και τη φροντίδα που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια. Η παρουσία τους και μόνο αρκούσε ορισμένες φορές για να μου δώσει δύναμη και κουράγιο να συνεχίζω την προσπάθειά μου. Ευχαριστώ, επίσης, την αδερφή μου Βίκυ και την οικογένειά της για την αγάπη και την υποστήριξή τους. Τέλος, ευχαριστώ θερμά το στενό μου περιβάλλον για την υπομονή, την κατανόηση και την ηθική συμπαράσταση τους στην πολύχρονη ερευνητική μου πορεία.

Αν και η ερευνητική προσπάθεια στο πλαίσιο της εκπόνησης μιας διατριβής είναι επίπονη, η ερευνητική εμπειρία, η πειθαρχία και οργάνωση στη σκέψη και το λόγο που αποκό-

μισα όλα αυτά τα χρόνια αποτελούν ανεκτίμητα εφόδια.

Άννα Βαζιντάρη  
Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Αφιερώνεται στους γονείς μου, Μαρίνα και Κωνσταντίνο



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>Δίκτυα Ανεκτικά σε Καθυστέρηση/Αποσύνδεση</b>	<b>31</b>
2.1	Εισαγωγή	31
2.2	Γενικά χαρακτηριστικά	31
2.2.1	Κινητικότητα	32
2.2.2	Αραιότητα	32
2.3	Κατηγορίες DTN δικτύων	32
2.4	Η DTN αρχιτεκτονική	34
2.4.1	Το στρώμα δεσμοποίησης (Bundle)	35
2.4.2	DTN περιοχές και πύλες	36
2.5	Δρομολόγηση στα DTN δίκτυα	37
2.6	Κωδικοποίηση δικτύου	39
2.7	Ο προσομοιωτής ONE	42
2.7.1	Περιγραφή του προσομοιωτή	42
<b>3</b>	<b>Ασύρματα αυτο-οργανούμενα δίκτυα</b>	<b>45</b>
3.1	Εισαγωγή	45
3.2	Κατηγορίες WSON δικτύων	46
3.3	Προσαρμοστικές υπηρεσίες σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα	47
3.3.1	Διαχείριση πόρων	47
3.3.1.1	Ενεργειακή διαχείριση	48
3.3.1.1.1	Προσαρμοστική μετάδοση δεδομένων	48
3.3.1.1.2	Προσαρμοστική ανίχνευση δικτύου	49
3.3.1.2	Διαχείριση εύρους ζώνης	49
3.3.2	Διαχείριση της τοπολογίας στα WSON δίκτυα	50
3.3.3	Δρομολόγηση/Προώθηση	51
3.3.4	Διαχείριση δεδομένων	52
<b>4</b>	<b>Κινητικότητα στα DTN δίκτυα</b>	<b>53</b>
4.1	Εισαγωγή	53

4.2	Μοντέλα κινητικότητας . . . . .	53
4.3	Χαρακτηριστικά μοντέλων κινητικότητας . . . . .	54
4.3.1	Μαθηματική περιγραφή των επαφών μεταξύ κόμβων . . . . .	54
4.3.1.1	Poisson διαδικασία . . . . .	55
4.3.1.1.1	Ομογενής Poisson διαδικασία . . . . .	55
4.3.1.1.2	Μη ομογενής Poisson διαδικασία . . . . .	56
4.3.1.1.3	Εκρηκτικότητα επαφών: Περιορισμοί του Poisson μοντέλου . . . . .	57
4.3.1.2	Self-Similar διαδικασία . . . . .	57
4.3.1.2.1	Pareto κατανομή . . . . .	59
4.3.1.2.2	Περικομμένη Pareto κατανομή . . . . .	59
4.3.2	Στατιστικά μεγέθη κινητικότητας . . . . .	60
4.3.3	Κατανομές στατιστικών μεγεθών κινητικότητας . . . . .	60
4.4	Κατηγοριοποίηση μοντέλων κινητικότητας . . . . .	61
4.4.1	Γενικά μοντέλα κινητικότητας . . . . .	62
4.4.1.1	Μοντέλο κινητικότητας τυχαίας διαδρομής (Random Walk) . . . . .	62
4.4.1.2	Μοντέλο κινητικότητας με τυχαία σημεία στάσης (Random Waypoint) . . . . .	64
4.4.1.2.1	Χωρική κατανομή κόμβων και μήκος μετάβασης . . . . .	65
4.4.1.2.2	Ταχύτητα κόμβων και μέση διάρκεια κίνησης . . . . .	67
4.4.1.2.3	Inter-hitting και inter-meeting χρονικές διάρκειες . . . . .	67
4.4.1.2.4	Ρυθμός επαφών . . . . .	68
4.4.1.2.5	Περιορισμοί του RWP . . . . .	68
4.4.1.3	Μοντέλο κινητικότητας τυχαίας διεύθυνσης (Random Di- rection) . . . . .	68
4.4.1.3.1	Inter-hitting και inter-meeting χρονική διάρκεια . . . . .	69
4.4.1.4	Σύνθετα μοντέλα κινητικότητας και μοντέλα κινητικότη- τας ομάδας . . . . .	69
4.4.2	Μοντέλα κινητικότητας για VANET δίκτυα . . . . .	70
4.4.3	Μοντέλα κινητικότητας για WSN δίκτυα . . . . .	70
4.4.4	Μοντέλα κινητικότητας για ευκαιριακά δίκτυα . . . . .	71
4.4.4.1	Χαρακτηριστικά ανθρώπινης κίνησης . . . . .	72
4.4.4.2	Σταθμισμένο RWP μοντέλο κινητικότητας . . . . .	72
4.4.4.3	Το χρονικά μεταβαλλόμενο μοντέλο κινητικότητας κοινό- τητας . . . . .	73
4.4.4.4	Το περικομμένο Levy-Walk μοντέλο κινητικότητας . . . . .	74
4.4.4.5	Το SWIM μοντέλο κινητικότητας . . . . .	75
4.4.4.6	Το SLAW μοντέλο κινητικότητας . . . . .	75



4.4.4.7	SMOOTH μοντέλο κινητικότητας	76
4.4.4.8	Περισσότερα μοντέλα κινητικότητας	77
4.5	Ελεγχόμενη κινητικότητα	77
<b>5</b>	<b>Κωδικοποίηση δικτύου σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα</b>	<b>81</b>
5.1	Εισαγωγή	81
5.2	Σχετική βιβλιογραφία	82
5.3	Το προτεινόμενο σχήμα	84
5.3.1	Ο προτεινόμενος MMA αλγόριθμος	87
5.3.2	Ο προτεινόμενος NC αλγόριθμος	89
5.3.3	Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποκωδικοποίησης	89
5.4	Αριθμητικά αποτελέσματα πρώτης ομάδας προσομοιώσεων	89
5.5	Αριθμητικά αποτελέσματα δεύτερης ομάδας προσομοιώσεων	94
5.6	Συμπεράσματα	99
<b>6</b>	<b>Παίγνιο για τη διαχείριση της κινητικότητας στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα</b>	<b>101</b>
6.1	Εισαγωγή	101
6.2	Κινητικότητα στα αυτο-οργανούμενα DTN	103
6.2.1	Ενεργειακό κόστος κινητικότητας	103
6.2.1.1	Ενεργειακό κόστος φυσικής κίνησης	103
6.2.1.2	Ενεργειακό κόστος ανίχνευσης δικτύου λόγω κίνησης	103
6.2.2	Μοντέλα κινητικότητας και βασικά μεγέθη	104
6.3	Διατύπωση του παιγνίου κινητικότητας στα DTN δίκτυα	105
6.3.1	Παίγνιο δύο κόμβων/παικτών	105
6.3.2	Παίγνιο $N$ κόμβων/παικτών	106
6.3.3	Μη συγχρονισμένα DTN δίκτυα	110
6.4	Το προτεινόμενο αυτόνομο σχήμα ρύθμισης της κινητικότητας σε DTN δίκτυα	112
6.4.1	Μεγέθη αποτίμησης της επίδοσης του προτεινομένου σχήματος	113
6.5	Αριθμητικά αποτελέσματα	113
6.6	Συμπεράσματα	120
<b>7</b>	<b>Παίγνιο ενεργητικής ανίχνευσης δικτύου σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα</b>	<b>121</b>
7.1	Εισαγωγή	121
7.2	Ανίχνευση DTN δικτύων	124
7.2.1	Προσδιορισμός της πιθανότητας $p_{enc}(T)$	125
7.2.2	Προσδιορισμός της CMP και της κατά ζεύγος CMP	125
7.3	Διατύπωση του παιγνίου ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα	126
7.3.1	Μικτή NE στρατηγική	128

7.4	Το προτεινόμενο σχήμα ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα . . . . .	130
7.4.1	Εξασφάλιση ελάχιστου επιπέδου πιθανότητας σύναψης επικοινωνίας	130
7.4.2	Περιγραφή του προτεινόμενου σχήματος . . . . .	131
7.5	Αριθμητικά αποτελέσματα . . . . .	132
7.6	Συμπεράσματα . . . . .	140
<b>8</b>	<b>Συμπεράσματα της διατριβής</b>	<b>141</b>
<b>A</b>	<b>Ανίχνευση δικτύου στα αυτο-οργανούμενα DTN</b>	<b>143</b>
A.1	Εισαγωγή . . . . .	143
A.2	Ανίχνευση δικτύου στα DTN . . . . .	143
A.2.1	Bluetooth . . . . .	143
A.2.2	Bluetooth χαμηλής ενέργειας . . . . .	144
A.2.3	WiFi . . . . .	144
A.2.4	Zigbee . . . . .	145
A.3	Μοντέλα ανίχνευσης DTN δικτύων . . . . .	145
A.3.1	Παθητική ανίχνευση δικτύου . . . . .	145
A.3.2	Ενεργητική ανίχνευση δικτύου . . . . .	146
<b>B</b>	<b>Θεωρία Παιγνίων</b>	<b>147</b>
B.1	Εισαγωγή . . . . .	147
B.1.1	Ιστορική Αναδρομή . . . . .	147
B.2	Μαθηματική περιγραφή και κατηγοριοποίηση των παιγνίων . . . . .	149
B.2.1	Μαθηματική περιγραφή παιγνίων . . . . .	149
B.2.1.1	Η κανονική ή στρατηγική περιγραφή . . . . .	149
B.2.1.2	Η εκτενής περιγραφή . . . . .	150
B.2.1.3	Σύγκριση μεταξύ κανονικής/στρατηγικής και εκτενούς περιγραφής . . . . .	151
B.2.1.4	Η περιγραφή συνασπισμού . . . . .	151
B.2.2	Κατηγοριοποίηση παιγνίων . . . . .	152
B.2.2.1	Στατικά και δυναμικά παίγνια . . . . .	152
B.2.2.2	Στοχαστικά και μη στοχαστικά παίγνια . . . . .	152
B.2.2.3	Συνεργατικά και μη συνεργατικά παίγνια . . . . .	153
B.2.2.4	Παίγνια με πλήρη ή μερική πληροφόρηση . . . . .	153
B.2.2.5	Παίγνια με τέλεια ή ατελή ιστορικότητα . . . . .	153
B.2.2.6	Παίγνια μηδενικού ή μη μηδενικού αθροίσματος . . . . .	153
B.3	Βασικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων . . . . .	153
B.3.1	Δράσεις και στρατηγικές . . . . .	154
B.3.2	Βασικοί ορισμοί βέλτιστων στρατηγικών . . . . .	154

B.3.3	Σημεία ισορροπίας . . . . .	156
B.4	Βασικά θεωρήματα ύπαρξης NE . . . . .	158
B.4.1	Προσδιορισμός μικτής στρατηγικής NE σε συμμετρικό παίγνιο δύο στρατηγικών . . . . .	158
<b>Γ</b>	<b>Υπολογισμός των αμιγών και μικτών NE στρατηγικών του παιγνίου κινητικότητας σε DTN δίκτυα</b>	<b>161</b>
Γ.1	Παίγνιο DTN κινητικότητας δύο κόμβων/παικτών . . . . .	161
Γ.1.1	Υπολογισμός αμιγούς NE στρατηγικής . . . . .	161
Γ.1.2	Υπολογισμός μικτής NE στρατηγικής . . . . .	161
Γ.2	Παίγνιο DTN κινητικότητας $N$ κόμβων/παικτών . . . . .	162
Γ.2.1	Συγχρονισμένα DTN δίκτυα . . . . .	162
Γ.2.2	Μη συγχρονισμένα DTN δίκτυα . . . . .	163
<b>Δ</b>	<b>Υπολογισμός των αμιγών και μικτών NE στρατηγικών του παιγνίου ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα</b>	<b>165</b>
Δ.1	Αμιγής NE στρατηγική . . . . .	165
Δ.2	Μικτή NE στρατηγική . . . . .	166
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>169</b>



## Κατάλογος πινάκων

3.1	Τα χαρακτηριστικά των WSON ανά κατηγορία δικτύων . . . . .	47
5.1	Παράμετροι προσομοίωσης της πρώτης ομάδας προσομοιώσεων . . . . .	90
5.2	Παράμετροι προσομοίωσης των πρωτοκόλλων επικοινωνίας στη δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων . . . . .	94
5.3	Παράμετροι προσομοίωσης της δεύτερης ομάδας προσομοιώσεων . . . . .	95
6.1	Τα οφέλη των κόμβων/παικτών $n_1$ και $n_2$ στον παίγνιο DTN κινητικότητας δύο κόμβων/παικτών. . . . .	106
6.2	Τα οφέλη του κόμβου/παίκτη $n_i$ στον παίγνιο DTN κινητικότητας $N$ κόμβων/παικτών. . . . .	107
7.1	Τα οφέλη των κόμβων/παικτών $n_1$ και $n_2$ στον παίγνιο DTN ενεργητικής ανίχνευσης. . . . .	128
B.1	Το παίγνιο του προγαμιαίου συμβολαίου στο Ταλμούδ, το ιερό κείμενο των Βαβυλωνίων. . . . .	148
B.2	Το παίγνιο του “Διλήματος του Φυλακισμένου”. . . . .	149
B.3	Το παίγνιο του “Διλήματος του Διαβιβαστή”. . . . .	150
B.4	Τα οφέλη ενός συμμετρικού παιγνίου με δύο παίκτες. . . . .	158



# Κατάλογος σχημάτων

2.1	Ετερογενή DTN δίκτυα . . . . .	33
2.2	Το στρώμα Bundle . . . . .	35
2.3	Παράδειγμα DTN δρομολόγησης . . . . .	36
2.4	Κατηγοριοποίηση των DTN πρωτοκόλλων δρομολόγησης . . . . .	39
2.5	Παράδειγμα αύξησης της ρυθμαπόδοσης με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου . . . . .	41
2.6	Παράδειγμα αύξησης της ενεργειακής απόδοσης με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου . . . . .	41
2.7	Παράδειγμα αποφυγής υποκλοπών με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου . . . . .	42
3.1	Διαχείριση Ενεργειας στα WSON δίκτυα . . . . .	48
3.2	Διαχείριση Εύρους Ζώνης στα WSON δίκτυα . . . . .	49
3.3	Διαχείριση Τοπολογίας στα WSON δίκτυα . . . . .	50
3.4	Δρομολόγηση/Προώθηση στα WSON δίκτυα . . . . .	51
4.1	Μοντέλα κινητικότητας για DTN δίκτυα . . . . .	61
4.2	Γενικά μοντέλα κινητικότητας . . . . .	62
4.3	Brown μοντέλο κινητικότητας . . . . .	63
4.4	Lévy flight μοντέλο κινητικότητας . . . . .	64
4.5	Παράδειγμα ενός δύο-διαστάσεων RWP μοντέλου κινητικότητας σε μοναδιαίο τετράγωνο . . . . .	65
4.6	Μοντέλα κινητικότητας για VANET . . . . .	70
4.7	Μοντέλα κινητικότητας WSN . . . . .	70
4.8	Κοινωνικά μοντέλα κινητικότητας . . . . .	71
4.9	Αλυσίδα Markov δύο καταστάσεων για το χρονικά μεταβαλλόμενο μοντέλο κινητικότητας . . . . .	73
5.1	Ο MMA αλγόριθμος. . . . .	88
5.2	Ποσοστιαία μεταβολή του κόστους παράδοσης της πληροφορίας $C_{del}^{(\%)}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το Epidemic πρωτόκολλο. . . . .	90

5.3	Ποσοστιαία μεταβολή του κόστους παράδοσης της πληροφορίας $C_{del}^{(\%)}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων για διάφορες τιμές της ταχύτητας των κόμβων και της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το PRoPHET πρωτόκολλο. . . . .	91
5.4	Ποσοστιαία μεταβολή της καθυστέρησης παράδοσης της πληροφορίας $D_{av}^{(\%)}$ ως προς το μέγεθος της μνήμης για διάφορες τιμές της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το Epidemic πρωτόκολλο δρομολόγησης για (α) χαμηλές τιμές ταχύτητας κόμβων (β) υψηλές τιμές ταχύτητας κόμβων. . . . .	92
5.5	Ποσοστιαία μεταβολή της καθυστέρησης παράδοσης της πληροφορίας $D_{av}^{(\%)}$ ως προς το μέγεθος της μνήμης για διάφορες τιμές της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το PRoPHET πρωτόκολλο για (α) χαμηλές τιμές ταχύτητας κόμβων (β) υψηλές τιμές ταχύτητας κόμβων. . . . .	92
5.6	Ποσοστιαία μεταβολή του ρυθμού της πληροφορίας $R_{del}^{(\%)}$ ως προς το μέγεθος της μνήμης για διάφορες τιμές της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το Epidemic πρωτόκολλο για (α) χαμηλές τιμές ταχύτητας κόμβων (β) υψηλές τιμές ταχύτητας κόμβων. . . . .	93
5.7	Ποσοστιαία μεταβολή του ρυθμού της πληροφορίας της πληροφορίας $R_{del}^{(\%)}$ ως προς το μέγεθος της μνήμης για διάφορες τιμές της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το PRoPHET πρωτόκολλο για (α) χαμηλές τιμές ταχύτητας κόμβων (β) υψηλές τιμές ταχύτητας κόμβων. . . . .	93
5.8	Η ποσοστιαία μείωση του $E_C^{(\%)}$ ως προς το μέγεθος της μνήμης των κόμβων για το NC/MMA σχήμα (Epidemic πρωτόκολλο, χρόνος προσομοίωσης 9000s, ταχύτητα κόμβων 7 – 10m/s). . . . .	95
5.9	Η ποσοστιαία μείωση του $E_C^{(\%)}$ ως προς την ταχύτητα των κόμβων για το NC/MMA σχήμα (Epidemic πρωτόκολλο, χρόνος προσομοίωσης 9000s, μέγεθος μνήμης 64kB). . . . .	96
5.10	Απόδοση του NC/MMA σχήματος ( $E_C^{(\%)}$ , $R_{del}^{(\%)}$ ) ως προς το βαθμό των κόμβων (Epidemic πρωτόκολλο, μέγεθος μνήμης 64kB, ταχύτητα κόμβων 7 – 10m/s). . . . .	96
5.11	Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ NC/MMA σχήματος-Epidemic πρωτόκολλο και NC/MA σχήματος-PRoPHET πρωτόκολλο για Zigbee διεπαφή επικοινωνίας (μέγεθος μνήμης 64kB, ταχύτητα κόμβων 7 – 10m/s). . . . .	97
5.12	Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ NC/MMA σχήματος-Epidemic πρωτόκολλο και NC/MA σχήματος-PRoPHET πρωτόκολλο για Zigbee διεπαφή επικοινωνίας (64kB μέγεθος μνήμης, 7 – 10m/s ταχύτητα κόμβων). . . . .	98



6.1	Εξάρτηση του κανονικοποιημένου ενεργειακού κατωφλίου $E_{th}$ ως προς το $N$ , ( $r = 50m$ , $a = 0.75$ , $u = 1m/s$ ). . . . .	114
6.2	Κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας στη φάση παιγνίου ως συνάρτηση του $x$ για διάφορες τιμές του $N$ ( $r = 50m$ , $a = 0.75$ , $u = 1m/s$ ). . . . .	115
6.3	Η πιθανότητα συνάντησης στη φάση παιγνίου ως συνάρτηση του $x$ για διάφορες τιμές του $N$ ( $r = 50m$ , $a = 0.75$ , $u = 1m/s$ ). . . . .	115
6.4	Ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων $N$ για διάφορες τιμές της παραμέτρου κίνησης $a$ ( $r = 50m$ , $u = 1m/s$ ). . . . .	116
6.5	Ποσοστιαία μείωση της πιθανότητας συνάντησης ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων $N$ για διάφορες τιμές της παραμέτρου κίνησης $a$ ( $r = 50m$ , $u = 1m/s$ ). . . . .	117
6.6	Ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων $N$ για διάφορες τιμές της εμβέλειας $r$ ( $a = 0.75$ , $u = 1m/s$ ). . . . .	117
6.7	Ποσοστιαία μείωση της πιθανότητας συνάντησης ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων $N$ για διάφορες τιμές της εμβέλειας $r$ ( $a = 0.75$ , $u = 1m/s$ ). . . . .	118
6.8	Ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων $N$ για διάφορες τιμές της εμβέλειας $r$ υπό το σενάριο ελλειπούς συγχρονισμού( $a = 0.75$ , $u = 1m/s$ ) . . . . .	118
6.9	Ποσοστιαία μείωση της πιθανότητας συνάντησης ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων $N$ για διάφορες τιμές της εμβέλειας $r$ υπό το σενάριο ελλειπούς συγχρονισμού( $a = 0.75$ , $u = 1m/s$ ). . . . .	119
7.1	Εξάρτηση του κανονικοποιημένου ενεργειακού κατωφλίου $E_{th}$ από το $\tau/T$ για διάφορες τιμές της παραμέτρου $k$ , ( $r = 50m$ , $u = 1m/s$ , $n = 1.57$ ). . . . .	134
7.2	Η επίδραση της QoS προδιαγραφής $h$ στην διαφορά των ενεργειακών κατωφλίων $\Delta x = E_s - E_{th}$ για διάφορες τιμές του $\tau/T$ , ( $r = 50m$ , $u = 1m/s$ , $n = 1.57$ , $k = 2$ ). . . . .	135
7.3	Κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας ως συνάρτηση του $x$ για διάφορες τιμές του $\tau/T$ ( $r = 50m$ , $u = 1m/s$ , $n = 1.57$ , $h = 0.5$ , $k = 2$ , $\lambda \cdot T = 1$ ). . . . .	135
7.4	Κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας ως συνάρτηση του $x$ για διάφορες τιμές του $h$ ( $r = 50m$ , $u = 1m/s$ , $n = 1.57$ , $\tau/T = 0.25$ , $k = 2$ , $\lambda \cdot T = 1$ ). . . . .	136
7.5	Η πιθανότητα επικοινωνίας ως συνάρτηση του $x$ για διάφορες τιμές του $\tau/T$ ( $r = 50m$ , $u = 1m/s$ , $n = 1.57$ , $h = 0.5$ , $k = 2$ , $\lambda \cdot T = 1$ ). . . . .	136
7.6	Η πιθανότητα επικοινωνίας ως συνάρτηση του $x$ για διάφορες τιμές του $h$ ( $r = 50m$ , $u = 1m/s$ , $n = 1.57$ , $\tau/T = 0.25$ , $k = 2$ , $\lambda \cdot T = 1$ ). . . . .	137
7.7	Επίδραση του πλήθους των κόμβων $N$ στην κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας ( $r = 50m$ , $u = 1m/s$ , $\tau = 10s$ , $k = 2$ , $h = 0.5$ , $\lambda \cdot T = 1$ ). . . . .	137

7.8	Επίδραση του πλήθους των κόμβων $N$ στην πιθανότητα επικοινωνίας ( $r = 50m, u = 1m/s, \tau = 10s, k = 2, h = 0.5, \lambda \cdot T = 1$ ). . . . .	138
7.9	Ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ως συνάρτηση του $h$ για διάφορες τιμές του $\tau/T$ ( $r = 50m, u = 1m/s, n = 1.57, k = 2, \lambda \cdot T = 1$ ). . . . .	139
B.1	Εκτενής περιγραφή του “Διλήμματος του Διαβιβαστή” . . . . .	151
B.2	Περιγραφή των κατά Pareto βέλτιστων στρατηγικών προφίλ . . . . .	156



## Κατάλογος συντμήσεων

CMP	Contact Missing Probability
CMM	Community Mobility Model
DTN	Delay Tolerant Network
GPS	Geographic Positioning System
HCMM	Home-cell community mobility model
Home-MEG	Home-Markovian Evolving Graph
ICDT	Intermittently Connected Delay Tolerant
IPN	Interplanetary Networks
ISM	Industrial Scientific Medical
ONE	Opportunistic Networking Environment
LATP	Least Action Trip Planning
LNC	Linear Network Coding
MANET	Mobile Ad Hoc Networks
MMA	Memory Management Algorithm
MS/SD	Multiple Sources/Single Destination
MS/MD	Multiple Sources/Multiple Destinations
NC	Network Coding
PSWN	Pocket Switched Wireless Network
RD	Random Direction
RLNC	Random Linear Network Coding
RW	Random Walk
RWP	Random Waypoint
RPGM	Reference Point Group Model
SCF	Store Carry Forward
SAN	Sensor Actuator Network
SLAW	Self-Similar Least Action Walk
SM/SD	Single Source/Single Destination
SM/MD	Single Source/Multiple Destination
TTL	Time To Live
TLW	Truncated Levy-Walk
WMN	Wireless Mesh Network
WSN	Wireless Sensor Network
WSON	Wireless Self-Organizing Network
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη σχημάτων εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα με ανοχή σε καθυστέρηση.

Συγκεκριμένα, το Κεφάλαιο 1 αποτελεί εισαγωγή στο αντικείμενο της διατριβής δίνοντας μια περίληψη των θεμάτων με τα οποία αυτή ασχολείται.

Στο Κεφ. 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα δίκτυα με ανοχή σε καθυστέρηση (Delay Tolerant Networks, DTN), με αναφορά στα χαρακτηριστικά και την αρχιτεκτονική τους, την κατηγοριοποίηση των σχημάτων δρομολόγησης που έχουν αναπτυχθεί για αυτό τον τύπο δικτύων και την κωδικοποίηση δικτύων (Network Coding, NC) ως μέθοδος προώθησης δεδομένων. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στο βασικότερο προσομοιωτή για DTN δίκτυα, τον προσομοιωτή ONE (Opportunistic Network Environment).

Στο Κεφ. 3 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αυτο-οργανούμενων δικτύων (Wireless Self-Organizing Networks, WSON). Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι προσαρμοστικές υπηρεσίες που υλοποιούνται στο πλαίσιο των WSON δικτύων.

Στο Κεφ. 4 γίνεται εκτενής αναφορά στην κινητικότητα των DTN δικτύων ως βασικό χαρακτηριστικό τους. Στο κεφάλαιο αυτό, τονίζεται η σημασία της κινητικότητας των κόμβων σε ένα δίκτυο, παρουσιάζονται οι βασικότερες διαδικασίες σύναψης επαφών και τα στατιστικά μεγέθη των μοντέλων κινητικότητας και πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση των κυριότερων μοντέλων κινητικότητας που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία για τα DTN δίκτυα. Τέλος, γίνεται αναφορά στην ελεγχόμενη κινητικότητα ως μέθοδος αξιοποίησης των ευεργετικών αποτελεσμάτων που επιφέρει η κίνηση των κόμβων και παρατίθεται εκτενής βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο θέμα.

Στο Κεφ. 5 παρουσιάζεται η πρώτη εργασία στα αυτο-οργανούμενα DTN. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο αναπτυγμένος αλγόριθμος διαχείρισης της μνήμης των DTN κόμβων που κάνουν χρήση της κωδικοποίησης δικτύου για να προωθήσουν και να αποθηκεύσουν τη διακινούμενη πληροφορία του δικτύου. Στο κεφάλαιο αυτό, τονίζονται τα ευεργετικά στοιχεία της κωδικοποίησης δικτύου σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της μείωσης της περίσσειας διακινούμενης πληροφορίας στο δίκτυο.

Στο Κεφ. 6 αναπτύσσεται το προτεινόμενο σχήμα που ρυθμίζει την κινητικότητα των

DTN κόμβων κάνοντας χρήση της θεωρίας παιγνίων. Το προτεινόμενο σχήμα βασίζεται στη διατύπωση ενός παιγνίου που διαχειρίζεται τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της καταναλισκόμενης ενέργειας λόγω της κίνησης των κόμβων και της πιθανότητας συνάντησης των κόμβων. Το δίλημμα που εξετάζεται αφορά την απόφαση των κόμβων αν θα κινηθούν ή όχι στην αρχή κάθε κύκλου της DTN λειτουργίας. Το συγκεκριμένο θέμα άπτεται της ελεγχόμενης κινητικότητας στα DTN δίκτυα.

Το Κεφ. 7 παρουσιάζει ένα προτεινόμενο σχήμα για ελεγχόμενη εκπομπή σημάτων ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, το προτεινόμενο σχήμα βασίζεται στη διατύπωση ενός παιγνίου κατά τη διάρκεια του οποίου οι κόμβοι καλούνται να αποφασίσουν αν θα εκπέμψουν σήμα ανίχνευσης δικτύου ή όχι στην αρχή κάθε κύκλου της DTN λειτουργίας. Το παίγνιο διαχειρίζεται τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της καταναλισκόμενης ενέργειας λόγω εκπομπής σημάτων ανίχνευσης και της πιθανότητας εντοπισμού γειτονικού κόμβου. Το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει την επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου διατηρώντας την πιθανότητα εντοπισμού γειτονικού κόμβου σε αποδεκτά επίπεδα, όπως αυτά τίθενται από τις δοθείσες προδιαγραφές.

Τέλος, το Κεφ. 8 ολοκληρώνει τη διατριβή, παραθέτοντας τα συμπεράσματα από την εφαρμογή των προτεινόμενων σχημάτων στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα.

## Κεφάλαιο 2

# Δίκτυα Ανεκτικά σε Καθυστέρηση/Αποσύνδεση

### 2.1 Εισαγωγή

Το Κεφ. 2 ασχολείται με την παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών των δικτύων με ανοχή σε καθυστέρηση/αποσύνδεση (Delay/Disruption Tolerant Networks, DTN). Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι τύποι των DTN δικτύων, η DTN αρχιτεκτονική, η κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, η τεχνική κωδικοποίησης δικτύου (Network Coding, NC) για την εφαρμογή της στα συγκεκριμένα δίκτυα και οι βασικές αρχές του προσομοιωτή ONE.

### 2.2 Γενικά χαρακτηριστικά

Τα DTN δίκτυα αποτελούν μια κατηγορία ασύρματων δικτύων στα οποία (i) η σύνδεση του κόμβου-πηγή με τον κόμβο-προορισμό δεν είναι πάντα εφικτή, (ii) ο ρυθμός απωλειών δεδομένων είναι υψηλός και (iii) ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι χαμηλός. Οι συγκεκριμένες συνθήκες είναι αποτέλεσμα του δυναμικού περιβάλλοντος που προκύπτει είτε λόγω της κινητικότητας των DTN κόμβων είτε λόγω εξάντλησης των ενεργειακών πόρων ορισμένων από αυτούς είτε λόγω της προγραμματισμένης και όχι διαρκούς συνδεσιμότητάς τους, που ενδέχεται να προκαλείται από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες [1]. Σε πολλές περιπτώσεις, τα DTN δίκτυα χαρακτηρίζονται από την αραιή κατανομή των κόμβων τους σε μεγάλη έκταση επιφάνειας έχοντας περιορισμένους ενεργειακούς πόρους και μικρή εμβέλεια. Τα DTN δίκτυα απαντώνται στη βιβλιογραφία με διάφορες ονομασίες, όπως ευκαιρικά (opportunistic), περιοδικά διακοπτόμενα (intermittently connected), ακραία (extreme) και απαιτητικά (challenged) δίκτυα [2].

### 2.2.1 Κινητικότητα

Η κινητικότητα αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό αρκετών DTN δικτύων, το οποίο συμβάλλει στη διαμόρφωση δυναμικής δικτυακής τοπολογίας. Εκτός από τις δυσκολίες που επιφέρει η αστάθεια ενός δυναμικού περιβάλλοντος (όπως η δυσκολία σύνδεσης του κόμβου-πηγή με τον κόμβο-προορισμό, η μικρή διάρκεια επικοινωνίας μεταξύ κόμβων), σε αρκετές περιπτώσεις, η κινητικότητα των κόμβων αυξάνει την πιθανότητα εντοπισμού άλλων κόμβων του δικτύου εντός εμβέλειας και σύναψης επικοινωνίας μαζί τους. Αρκετά πρωτόκολλα κίνησης έχουν αναπτυχθεί από την ερευνητική κοινότητα και η χρήση τους σε προσομοιώσεις ενισχύει τη μελέτη κρίσιμων θεμάτων στα DTN δίκτυα, όπως η δρομολόγηση, η εξοικονόμηση ενέργειας κτλ. Το Κεφ. 4 μελετά εκτενώς τα μοντέλα κινητικότητας στα DTN δίκτυα και την επίδρασή τους σε διάφορες παραμέτρους.

### 2.2.2 Αραιότητα

Ένα, επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό αρκετών DTN δικτύων αποτελεί η αραιότητα τους και τα μέτρα που την αποτιμούν. Το πλήθος των κόμβων σε σχέση με την επιφάνεια δραστηριοποίησής τους δεν αρκεί ως ακριβές μέτρο της πυκνότητας ενός δικτύου, καθώς αυτή επηρεάζεται και από την εμβέλεια των κόμβων. Η αραιότητα των DTN δικτύων μπορεί να αποτιμηθεί με περισσότερη αξιοπιστία μέσω του *βαθμού των κόμβων* (nodes degree) που υπολογίζεται από τη σχέση

$$n = \pi \cdot d \cdot r^2 \quad (2.1)$$

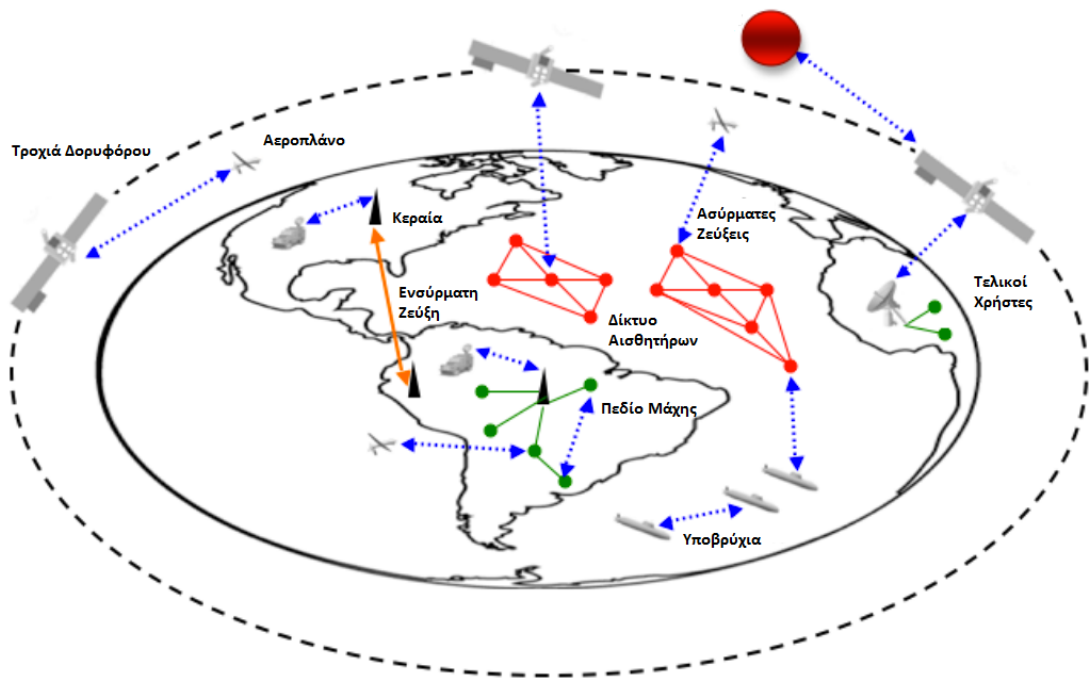
όπου  $r$  είναι η εμβέλεια των κόμβων σε  $m$  και  $d = N/A$  είναι ο λόγος του πλήθους των κόμβων προς την επιφάνεια ανάπτυξης  $A$  του DTN σε  $m^2$ . Ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνει αυτή η παράμετρος, τα DTN δίκτυα χαρακτηρίζονται από αραιά έως και πυκνά. Το όριο πυκνότητας πάνω από το οποίο τα DTN δίκτυα εξασφαλίζουν την αδιάλειπτη συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων είναι η τιμή  $n_t = 4.5$ , που ονομάζεται *κατώφλι διασποράς* (percolation threshold) [3]. Πάνω από το όριο αυτό, τα δίκτυα παύουν να είναι DTN.

## 2.3 Κατηγορίες DTN δικτύων

Στην ευρύτερη κατηγορία των DTN δικτύων ανήκουν τα [1], [2], [4]:

- *Επίγεια κινητά δίκτυα (Terrestrial Mobile Networks)*: Οι κόμβοι αυτού του τύπου δικτύων μπορεί να είναι φορητοί υπολογιστές/ταμπλέτες (laptops/tablets), έξυπνα τηλέφωνα (smartphones), συσκευές εντοπισμού γεωγραφικού στίγματος (Global Positioning System, GPS), τηλεκατευθυνόμενα ελικόπτερα (drones) κλπ. Σε αυτή την κατηγορία δικτύων ανήκουν επίσης τα στρατιωτικά αυτο-οργανούμενα δίκτυα (military ad hoc networks) που εντοπίζονται σε στρατόπεδα, πεδία μάχης ή τρομοκρατικές επιθέσεις, τα





Σχήμα 2.1: Ετερογενή DTN δίκτυα

οχηματικά αυτο-οργανούμενα δίκτυα (Vehicular Ad hoc NETWORKS, VANET) αποτελούμενα από οχήματα που φέρουν τηλεπικοινωνιακούς κόμβους με σκοπό την επικοινωνία τόσο μεταξύ τους όσο και με στατικούς κόμβους προς ανταλλαγή πακέτων πληροφορίας, τα δίκτυα που χρησιμοποιούνται για τη διαδικτυακή διασύνδεση απομονωμένων περιοχών (Village networks), καθώς και τα κοινωνικά δίκτυα (social networks) ή δίκτυα «τσέπης» (Pocket-Switched Wireless Networks, PSWN) που χρησιμοποιούν τις ανθρώπινες κινητικές συνήθειες και τοπικές/καθολικές πληροφορίες προκειμένου να δρομολογήσουν τα δεδομένα πληροφορίας που λαμβάνουν. Η επικοινωνία σε αυτά τα δίκτυα είναι συνήθως διακοπτόμενη λόγω των δυναμικών συνθηκών μετάδοσης που διαμορφώνονται από τη συνεχή κίνηση των κόμβων, την εξάντληση των ενεργειακών τους πόρων και την παρεμβολή εμποδίων (κτιρίων ή άλλων συσκευών κτλ.).

- *Δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSN)*: Τα δίκτυα αισθητήρων των οποίων οι κόμβοι είτε κινούνται (Mobile Wireless Sensor Networks, MWSN) είτε έχουν περιορισμένους ενεργειακούς ή επεξεργαστικούς πόρους, είτε ακόμα λειτουργούν υπό αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες, θεωρούνται DTN δίκτυα. Η κίνηση των κόμβων, η οποία ενδέχεται να είναι αποτέλεσμα ίδιας κίνησης των αισθητήρων (Sensor Actuator Networks, SAN) ή κίνησης των μέσων/αντικειμένων/οντοτήτων πάνω στα οποία προσαρμόζονται οι αισθητήρες (Zebranet [5], CARNIVORE [6]) δημιουργούν ένα δυναμικό περιβάλλον δυσχεραίνοντας την επικοινωνία τόσο μεταξύ τους όσο και με τον κόμβο-συγκέντρωσης (sink node). Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει στην περι-

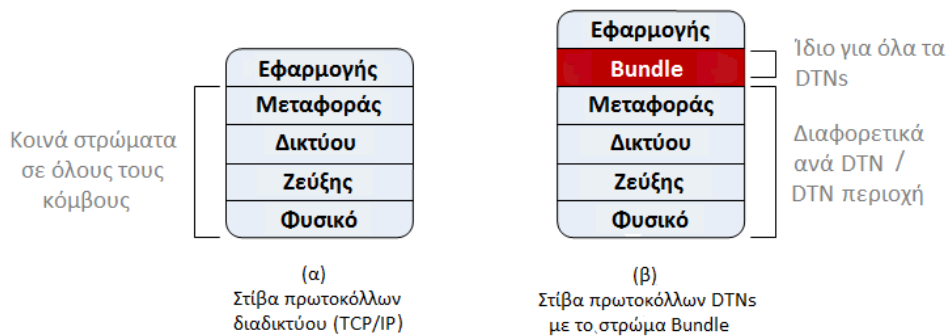
πτωση όπου οι αισθητήρες εναλλάσσουν περιοδικά την κατάσταση λειτουργίας τους από ενεργή (active mode) σε αδρανή (sleep mode) προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια, ή προκειμένου να αποφύγουν την εξάντληση των ενεργειακών τους πόρων. Ως DTN θεωρούνται επίσης τα δίκτυα αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη και παρακολούθηση του περιβάλλοντος και των φυσικών φαινομένων, π.χ. τα υπέργεια ή υποθαλάσσια ακουστικά δίκτυα, όπως και τα δίκτυα αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ζωής των ζώων. Αυτό το είδος δικτύων αισθητήρων ενδέχεται να λειτουργεί υπό αρκετά αντίξοες καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες καθιστώντας την επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων διακοπτόμενη. Το συγκεκριμένο είδος δικτύων απαντάνται στη βιβλιογραφία και υπό τον όρο *διακοπτόμενα δίκτυα αισθητήρων με ανοχή στην καθυστέρηση* (Intermittently Connected Delay-Tolerant Wireless Sensor Networks, ICDT-WSN) [7].

- *Ακραία δίκτυα (extreme networks)*: Ως ακραία δίκτυα χαρακτηρίζονται τα δίκτυα που λειτουργούν σε υψηλές ραδιοσυχνότητες, όπως τα διαπλανητικά δίκτυα (Interplanetary Networks, IPN), δηλαδή τα δίκτυα που απαρτίζονται από κόμβους καταναμημένους στο διάστημα σε τεράστιες αποστάσεις μεταξύ τους, τα δορυφορικά δίκτυα και ορισμένα οπτικά δίκτυα ελεύθερου χώρου. Τα συγκεκριμένα δίκτυα υπόκεινται είτε σε υψηλές καθυστερήσεις με προγραμματισμένες διακοπές (π.χ. λόγω πλανητικών δυναμικών ή περιοδικής κίνησης των δορυφόρων) είτε σε διακοπές επικοινωνίας λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών (π.χ. καιρικές συνθήκες).

## 2.4 Η DTN αρχιτεκτονική

Η εγγενής δυναμική φύση των DTN δικτύων καθιστά ακατάλληλες τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές για τον καθορισμό ενός ενιαίου πλαισίου λειτουργίας τους. Προς τούτο, από νωρίς δραστηριοποιήθηκε η επιστημονική κοινότητα με σκοπό τη διαμόρφωση μιας αρχιτεκτονικής που θα επιτύγχανε τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών DTN δικτύων. Η αρχιτεκτονική DTN [8], [9] σχεδιάστηκε αρχικά από την ανάγκη παροχής υπηρεσιών παρομοίων με αυτές του Διαδικτύου στα διαπλανητικά δίκτυα αποσκοπώντας στην περαιτέρω εξερεύνηση του διαστήματος. Ωστόσο, η εξέλιξη της οδήγησε σε ένα ευρύτερο πλαίσιο λειτουργίας όλων των DTN δικτύων. Η DTN αρχιτεκτονική ορίζει τις βασικές αρχές διευθυνσιοδότησης, προτεραιοποίησης, κατακερματισμού, αποθήκευσης, δρομολόγησης, προώθησης και επανένωσης των δεδομένων πληροφορίας των DTN δικτύων και προσδιορίζει τον τρόπο συγχρονισμού, αξιοπιστίας και ασφάλειας μεταξύ ετερογενών DTN δικτύων. Συγκεκριμένα, για την DTN αρχιτεκτονική ισχύουν τα ακόλουθα:

- Τα μηνύματα είναι μεταβλητού μήκους και όχι ροές πληροφορίας ή μηνύματα σταθερού μεγέθους ώστε να επιτρέπεται στο δίκτυο να αποφασίζει ορθά για τον προγραμ-



Σχήμα 2.2: Το στρώμα Bundle

ματισμό και την επιλογή των διαδρομών, όταν αυτό είναι εφικτό.

- Η χρήση σύνταξης με ονόματα για τη διευθυνσιοδότηση, η οποία υποστηρίζει ένα μεγάλο εύρος ονομασιών και συμβάσεων για διευθύνσεις βελτιώνοντας τη διαλειτουργικότητα.
- Η χρήση αποθηκευτικού χώρου στο δίκτυο ώστε να υποστηρίζεται η λειτουργία της αποθήκευσης και της προώθησης σε πολλαπλές διαδρομές, και, ενδεχομένως, σε μεγάλες κλίμακες χρόνου.
- Η παροχή μηχανισμών ασφάλειας που προστατεύουν το δίκτυο από μη εξουσιοδοτημένη χρήση.
- Η παροχή υπηρεσιών υψηλού επιπέδου, με επιλογές την αναφορά της παράδοσης και τον έλεγχο της ωφέλιμης ζωής των δεδομένων ώστε να επιτραπεί στο δίκτυο να ικανοποιεί καλύτερα τις ανάγκες των εφαρμογών.

#### 2.4.1 Το στρώμα δεσμοποίησης (Bundle)

Η καινοτομία της DTN αρχιτεκτονικής είναι η προσθήκη ενός νέου στρώματος στη στίβα πρωτοκόλλων διαδικτύου (TCP/IP stack), του στρώματος δεσμοποίησης (bundle) [10], που παρεμβάλλεται μεταξύ του στρώματος μεταφοράς και του στρώματος εφαρμογής. Το στρώμα bundle υποστηρίζει την τεχνική αποθήκευσης, μεταφοράς και προώθησης (Store - Carry - Forward, SCF), σύμφωνα με την οποία, οι κόμβοι αποθηκεύουν για αρκετό χρονικό διάστημα τα πακέτα πληροφορίας που λαμβάνουν -λόγω της διακοπτόμενης φύσης των DTN δικτύων- και τα προωθούν όταν προκύψει γειτονικός κόμβος. Επιπλέον, το στρώμα bundle προβλέπει τη βήμα-προς-βήμα αξιόπιστη μετάδοση πληροφορίας, παρέχοντας την επιλογή για ενημέρωση παράδοσης, ένα πλήθος διαγνωστικών εργαλείων και εργαλείων διαχείρισης και ένα βασικό σχήμα ασφάλειας με προαιρετική ενεργοποίηση, που αποτρέπει τη μη εξουσιοδοτημένη χρήση του δικτύου. Το ευέλικτο σχήμα διευθυνσιοδότησης που υποστηρίζεται είναι σε

θέση να ενθυλακώνει διαφορετικά σχήματα ονοματοδοσίας-διευθυνσιοδότησης υπό ενιαία σύνταξη.

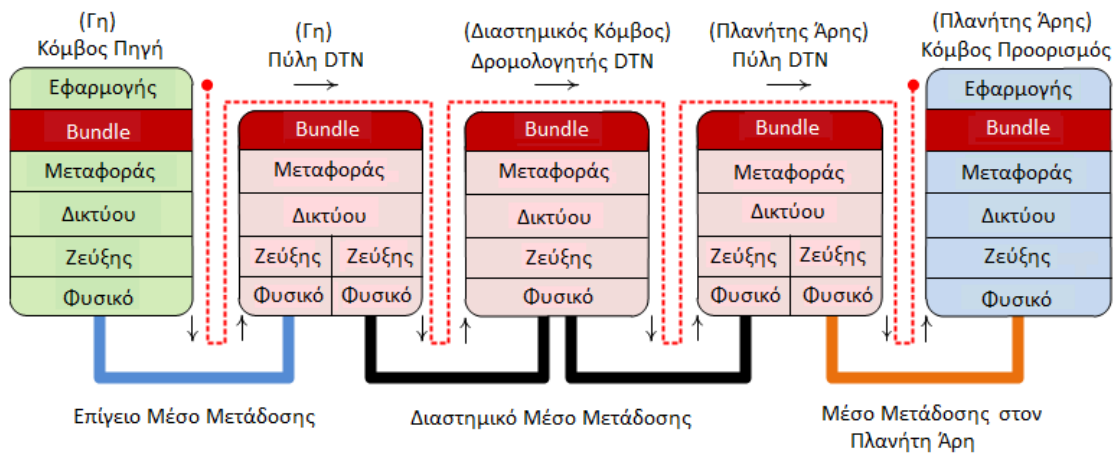
Ως bundle αναφέρονται και τα μηνύματα που δημιουργούνται στο στρώμα bundle. Το στρώμα αυτό αποθηκεύει και προωθεί ολόκληρα bundle ή τμήματα αυτών μεταξύ των κόμβων. Σε όλα τα δίκτυα τα οποία απαρτίζουν ένα DTN δίκτυο χρησιμοποιείται το ίδιο πρωτόκολλο για το bundle στρώμα. Στο Σχ. 2.2 απεικονίζεται το νέο αυτό στρώμα σε σχέση με τη στίβα πρωτοκόλλων Διαδικτύου (TCP/IP).

### 2.4.2 DTN περιοχές και πύλες

Η DTN αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τις έννοιες των περιοχών (regions) και των πυλών (gateways). Ως περιοχή ορίζεται ένα δικτυακό περιβάλλον μέσα στο οποίο οι κόμβοι έχουν κοινά εξειδικευμένα πρωτόκολλα και κοινή ονοματοδοσία. Η επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ των περιοχών επιτυγχάνεται μέσω της ύπαρξης ειδικών πυλών στα σημεία της μεταξύ τους σύνδεσης. Δύο κόμβοι ανήκουν στην ίδια περιοχή εφόσον μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους χωρίς τη μεσολάβηση πύλης. Οι διάφορες περιοχές αποτελούν δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία ενδέχεται να είναι μη συμβατά μεταξύ τους.

Οι DTN πύλες είναι υπεύθυνες για την αποθήκευση των δεδομένων μέχρι να υπάρξει ευκαιρία επικοινωνίας με κάποιο κόμβο στο επόμενο βήμα (hop) της δρομολόγησης ενός μηνύματος. Επιπλέον, οι πύλες τοποθετούνται στα σύνορα μεταξύ των περιφερειακών δικτύων ώστε να καθιστούν συμβατά τα διαφορετικά πρωτόκολλα των δικτύων αυτών και να αναγνωρίζουν τις διευθύνσεις προορισμού των μηνυμάτων. Οι διευθύνσεις προορισμού των μηνυμάτων είναι αναγνωρίσιμες μόνο στην περιοχή του δικτύου όπου ανήκει ο παραλήπτης τους. Οι πύλες τις μετατρέπουν σε τοπικά αναγνωρίσιμα ονόματα για τη γειτονική περιοχή.

Στο Σχ. 2.3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα δρομολόγησης bundle από τον κόμβο Γη προς



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα DTN δρομολόγησης

τον κόμβο Πλανήτη Άρης όπου είναι εμφανής η ανάγκη παρουσίας DTN πυλών και δρομολογητών στη διαδρομή από τον κόμβο-πηγή προς τον κόμβο-προορισμό.

## 2.5 Δρομολόγηση στα DTN δίκτυα

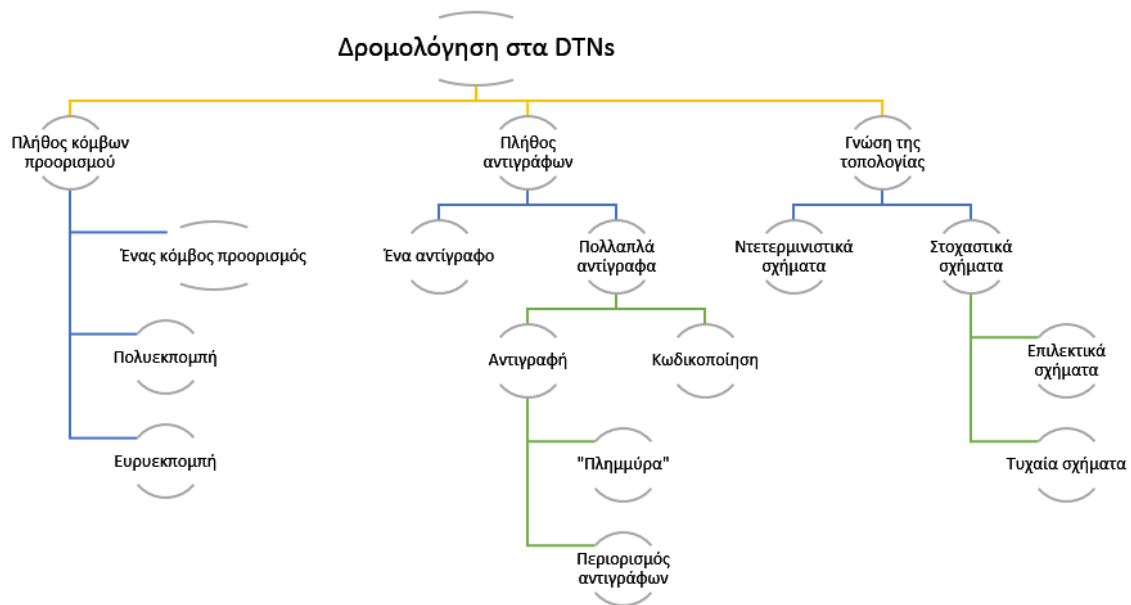
Η δρομολόγηση των πακέτων πληροφορίας αποτελεί αρκετά απαιτητική διαδικασία στα DTN δίκτυα λόγω των συχνών διακοπών στην επικοινωνία μεταξύ των DTN κόμβων και κατ' επέκταση της μη ύπαρξης διαδρομής από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμό ανά πάσα στιγμή. Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες ταξινόμησης των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για DTN δίκτυα έχουν γίνει αποσκοπώντας στην οργάνωση του αρκετά μεγάλου όγκου σχημάτων δρομολόγησης που έχουν προταθεί [1], [2], [11]- [12]. Ακολούθως, παρουσιάζονται έξι σημεία στα οποία τα DTN αποτυγχάνουν να χρησιμοποιήσουν επιτυχώς τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης που εφαρμόζονται στο Διαδίκτυο.

- Η παράδοση της πληροφορίας από κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμό δεν μπορεί να είναι ποτέ όσο ταχεία είναι στο Διαδίκτυο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του επόμενου βήματος με κριτήριο τη μείωση της καθυστέρησης παράδοσης της πληροφορίας. Ωστόσο, η καθυστέρηση είναι και πάλι μεγαλύτερη σε σχέση με το Διαδίκτυο. Με δεδομένες τις εγγενείς καθυστερήσεις, εγείρεται η ανάγκη σχεδιασμού πρωτοκόλλων και ανάπτυξης εφαρμογών που μπορούν να προσαρμοστούν σε τέτοιες συνθήκες.
- Δεδομένης της δυναμικής τοπολογίας και των συχνών διακοπών στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, χρησιμοποιείται η τεχνική της αποθήκευσης, μεταφοράς και προώθησης, SCF. Οι κόμβοι αποθηκεύουν στους ενταμιευτές τους τις δέσμες πληροφορίας (bundles) που λαμβάνουν, τις μεταφέρουν με κάθε τους κίνηση και τις προωθούν όταν παρουσιαστεί γειτονικός κόμβος. Η λειτουργικότητα αυτή υποστηρίζεται και από το στρώμα δέματος ενώ διαφέρει από αυτή του διαδικτύου.
- Συνήθως, επειδή οι DTN κόμβοι δεν έχουν πλήρη γνώση της ακριβούς τοπολογίας του δικτύου στο οποίο ανήκουν, λειτουργούν αυτόνομα και βάσει των υπολογισμών των παραμέτρων που τίθενται από το εκάστοτε DTN πρωτόκολλο δρομολόγησης. Επομένως, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης του Διαδικτύου, τα οποία προσαρμόζονται ανάλογα με τον όγκο δεδομένων που διακινείται στο δίκτυο, η προσαρμογή των πρωτοκόλλων δρομολόγησης ανάλογα με το φορτίο του δικτύου δεν αποτελεί απαίτηση στα DTN δίκτυα.
- Ενώ τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης διαθέτουν τη δυνατότητα να δρομολογούν τα πακέτα σε διαφορετική διαδρομή όταν παρουσιάζεται συμφόρηση σε

κάποια ζεύξη, στα DTN δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη αυτής της λειτουργικότητας. Λόγω του ασύρματου μέσου επικοινωνίας των DTN κόμβων και της -συνήθως- αραιής κατανομής τους, είναι συχνότερη η υπερφόρτωση των ενταμιευτών τους παρά η συμφόρηση των ζεύξεων επικοινωνίας. Επομένως, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης, στα DTN δίκτυα προκύπτει η ανάγκη σωστής διαχείρισης των αποθηκευτικών μέσων των κόμβων και όχι η ανάγκη αντιμετώπισης καταστάσεων συμφόρησης των ζεύξεων.

- Καίτοι υπάρχουν περιπτώσεις DTN δικτύων στις οποίες μπορεί να προβλεφθεί πιθανή μελλοντική συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων, όπως στην περίπτωση των δορυφορικών δικτύων, η πρόβλεψη μελλοντικής ζεύξης είναι εν γένει εξαιρετικά δύσκολη στα DTN δίκτυα. Επομένως, δεν είναι δυνατή η γνώση της ακριβούς τοπολογίας του δικτύου σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, όπως απαιτείται για τη λειτουργία των παραδοσιακών πρωτοκόλλων δρομολόγησης.
- Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης επιτυγχάνουν την αποφυγή των βρόχων που ενδέχεται να ανακύψουν στο δίκτυο στη διαδρομή από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμού. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι κόμβοι δεν έχουν ακριβή γνώση της τοπολογίας του δικτύου, τέτοια δυνατότητα δεν υπάρχει στα DTN δίκτυα καθώς θα απέβαινε κοστοβόρα ενεργειακά και επεξεργαστικά.

Όπως φαίνεται στο Σχ.2.4, η ταξινόμηση των διαφόρων σχημάτων δρομολόγησης που αφορούν τα DTN δίκτυα μπορεί να γίνει με κριτήριο (i) το πλήθος των κόμβων για τους οποίους προορίζεται η πληροφορία που στέλει ο κόμβος-πηγή, (ii) το πλήθος των πακέτων-αντιγράφων που το εκάστοτε πρωτόκολλο διαχέει στο δίκτυο μέχρι η πληροφορία να φθάσει από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμό και (iii) το κατά πόσο οι κόμβοι του δικτύου έχουν πλήρη, μερική ή μηδενική γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Με βάση το πρώτο κριτήριο, τα σχήματα διακρίνονται σε (i) αυτά που ασχολούνται με την αποστολή πληροφορίας από ένα κόμβο-πηγή προς ένα κόμβο-προορισμό, (ii) αυτά που μελετούν τη δρομολόγηση σε περιπτώσεις πολυεκπομπής και (iii) αυτά όπου η πληροφορία του κόμβου-πηγής αφορά όλους τους κόμβους του δικτύου (ευρυεκπομπή). Με βάση το δεύτερο κριτήριο, τα σχήματα δρομολόγησης/προώθησης διακρίνονται σε αυτά που επιτρέπουν είτε μόνο το αρχικό πακέτο της πηγής να κυκλοφορεί στο δίκτυο είτε πολλαπλά αντίγραφά του. Στη δεύτερη κατηγορία, χρησιμοποιείται είτε η μέθοδος της αντιγραφής, με βάση τη τεχνική της πλημμύρας ή τεχνικών που περιορίζουν το πλήθος των αντιγράφων, είτε η τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου. Τέλος, με βάση το τρίτο κριτήριο, τα σχήματα διακρίνονται σε ντετερμινιστικά, όταν υπάρχει πλήρης γνώση της τοπολογίας του δικτύου (δορυφορικά συστήματα), και σε στοχαστικά, όταν υπάρχει μερική ή καθόλου γνώση των κόμβων ως προς το πώς διαμορφώνονται οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων κάθε χρονική στιγμή. Τα στοχαστικά σχήματα, διακρίνονται στα επιλεκτικά, όπου χρησιμοποιούνται στοχαστικές συναρτήσεις χρησιμότη-



Σχήμα 2.4: Κατηγοριοποίηση των DTN πρωτοκόλλων δρομολόγησης

τας με βάση τις οποίες λαμβάνονται οι αποφάσεις δρομολόγησης δεδομένων και στα τυχαία, όπου γίνεται χρήση συγκεκριμένων κατανομών για την πρόβλεψη της κατάστασης του δικτύου και της συνδεσιμότητας των κόμβων. Λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς των DTN δικτύων και σε αρκετές περιπτώσεις της αραιής κατανομής των κόμβων που τα απαρτίζουν, ορισμένα από τα προαναφερθέντα σχήματα καταλήγουν απλώς να προωθούν τα πακέτα που λαμβάνουν σε όποια ευκαιρία επαφής μεταξύ γειτονικών κόμβων προκύψει. Η λειτουργία αυτή διαφέρει από την έννοια της δρομολόγησης όπου κάποια από τα προαναφερθέντα σχήματα υλοποιούν και κατά την οποία ο κόμβος επιλέγει πού θα προωθήσει την αποθηκευμένη πληροφορία.

## 2.6 Κωδικοποίηση δικτύου

Η εφαρμογή της τεχνικής κωδικοποίησης δικτύου NC στα πρωτόκολλα δρομολόγησης / προώθησης αποτελεί ένα διαρκώς αναπτυσσόμενο ερευνητικό αντικείμενο λόγω της αποτελεσματικής αξιοποίησης των ενεργειακών και αποθηκευτικών πόρων των κόμβων που προσφέρει. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης/προώθησης, τα οποία δεν υποστηρίζουν την επεξεργασία της αποθηκευμένης πληροφορίας στους κόμβους πριν την προώθησή της στον επόμενο κόμβο, η τεχνική NC παρέχει τη δυνατότητα στους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου να αποστείλουν ένα κωδικοποιημένο πακέτο στον επόμενο κόμβο, που προκύπτει από συνδυασμό των αποθηκευμένων πακέτων τους. Για παράδειγμα, στο στρώμα δικτύου οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορούν να εκτελούν δυαδική πρόσθεση των ανεξάρτητων ροών, ενώ στο φυσικό στρώμα ενός δικτύου οπτικών ινών μπορούν να υπερθέτουν τα ει-

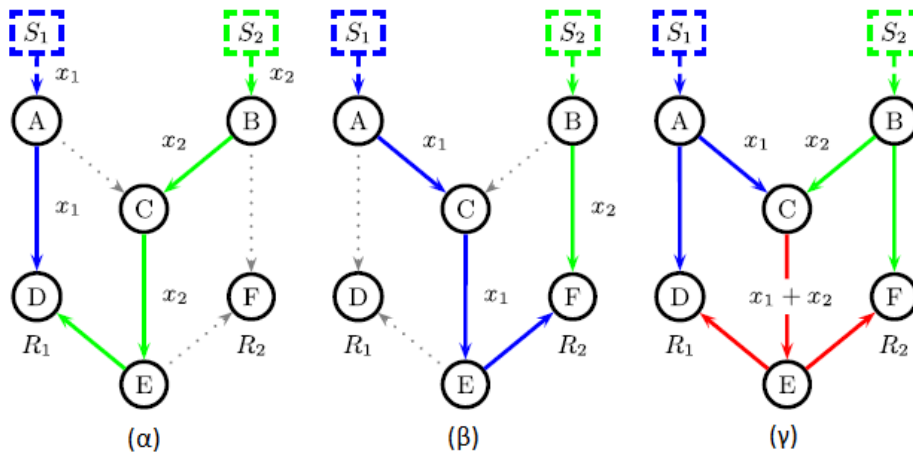
σερχόμενα οπτικά μηνύματα. Στην περίπτωση της γραμμικής τεχνικής NC (Linear Network Coding, LNC), προωθείται γραμμικός συνδυασμός των αποθηκευμένων πακέτων. Σε αυτό το πλαίσιο, ο κόμβος-προορισμός, εφόσον συγκεντρώσει στον ενταμιευτή του ένα ικανό αριθμό γραμμικώς ανεξάρτητων πακέτων, αποκτά τη δυνατότητα να αποκωδικοποιήσει την πληροφορία που έχει στείλει η πηγή [13].

Η δυσκολία του σχεδιασμού ενός σχήματος που εφαρμόζει την τεχνική NC έγκειται στην εύρεση του κώδικα NC, στον προσδιορισμό, δηλαδή, των κόμβων που θα υλοποιούν την τεχνική NC και στην εύρεση των συνιστωσών NC, δηλαδή των διανυσμάτων που θα πολλαπλασιάζουν την αποθηκευμένη πληροφορία πριν αυτή προωθηθεί στον επόμενο κόμβο. Καίτοι, αρχικά, η τεχνική NC προοριζόταν για ενσύρματα δίκτυα, η εφαρμογή της αργότερα στα ασύρματα δίκτυα επέφερε σημαντική βελτίωση στη ρυθμαπόδοση (throughput) και την αποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων των κόμβων. Σε αυτό συμβάλλει το ότι η τεχνική NC αξιοποιεί κατάλληλα την εγγενή φύση ευρυεκπομπής του ασύρματου μέσου μετάδοσης.

Οι σχέσεις ανταλλαγής που προκύπτουν από την εισαγωγή της κωδικοποίησης δικτύου σε ένα σχήμα δρομολόγησης είναι σχέσεις μεταξύ πολυπλοκότητας, καθυστέρησης, πλεονασμού δεδομένων (overhead) και απαιτούμενου πλήθους μεταδόσεων για την παράδοση του μηνύματος. Η κύρια πρόκληση, λοιπόν, έγκειται στην ανάπτυξη σχήματος που χρησιμοποιεί την τεχνική NC και επιτυγχάνει το βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ ορισμένων από τα προαναφερθέντα αντικρουόμενα μεγέθη. Η εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου στα DTN δίκτυα οδηγεί σε μείωση του πλεονασμού μηνυμάτων στο δίκτυο και επιτυγχάνει καλύτερη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της πιθανότητας παράδοσης του μηνύματος και του πλεονασμού μηνυμάτων στο δίκτυο σε σχέση με την εφαρμογή των ίδιων σχημάτων δρομολόγησης χωρίς κωδικοποίηση δικτύου. Λόγω της μείωσης του πλεονασμού μηνυμάτων στο δίκτυο, αξιοποιούνται αποτελεσματικότερα οι πόροι του δικτύου, όπως η ενέργεια, το εύρος ζώνης και οι ενταμιευτές των κόμβων, αφού μειώνεται το πλήθος των αναγκαίων μεταδόσεων για να παραδοθεί ένα μήνυμα και κατ' επέκταση, το πλήθος των μηνυμάτων που αποθηκεύονται στους ενταμιευτές των ενδιάμεσων κόμβων. Τα μειονεκτήματα της εφαρμογής της κωδικοποίησης δικτύου είναι κυρίως η πολυπλοκότητα που εισάγεται στο σύστημα, η διατήρηση του επιπέδου ασφάλειας σε συστήματα όπου η ασφάλεια είναι κρίσιμη απαίτηση και η ενσωμάτωσή της στην υπάρχουσα δομή [14].

Τα σχήματα που χρησιμοποιούν την τεχνική NC διακρίνονται σε συγκεντρωμένα και αποκεντρωμένα. Τα συγκεντρωμένα σχήματα απαιτούν τη συνεχώς πλήρη γνώση της τοπολογίας δικτύου από τους κόμβους. Δεδομένου ότι κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό στην πλειοψηφία των DTN δικτύων, τα σχήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα DTN δίκτυα είναι κατανεμημένα όπου οι κόμβοι λειτουργούν ανεξάρτητα χωρίς να γνωρίζουν τις μελλοντικές συνδέσεις με γειτονικούς κόμβους. Η τυχαία γραμμική τεχνική NC (Randomized Linear Network Coding, RLNC) μπορεί να αξιοποιηθεί από τα σχήματα NC καθώς, σύμφωνα με αυτή, οι κόμβοι επιλέγουν τυχαία από ένα αρκετά μεγάλο πεπερασμένο πεδίο τιμών τις





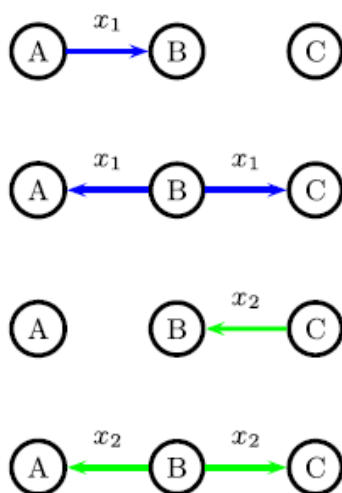
Σχήμα 2.5: Παράδειγμα αύξησης της ρυθμαπόδοσης με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου

γραμμικές συνιστώσες των διανυσμάτων με τα οποία θα πολλαπλασιάσουν την αποθηκευμένη πληροφορία πριν την προωθήσουν στον επόμενο κόμβο.

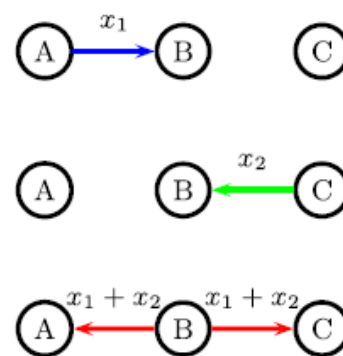
Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται ένα υποτυπώδες δίκτυο -γνωστό ως δίκτυο “πεταλούδα”- ως κατευθυνόμενοι γράφοι όπου οι κορυφές αντιστοιχούν στους κόμβους και οι ακμές στις ζεύξεις μεταξύ των κόμβων.

Στα Σχ. 2.5 (α) και (β) φαίνεται πώς μεταδίδονται τα ψηφία  $x_1$  και  $x_2$  από τους κόμβους  $S_1$  και  $S_2$  προς τους κόμβους  $R_1$  και  $R_2$ , αντίστοιχα, χωρίς τη χρήση κωδικοποίησης δικτύου σε ένα δίκτυο “πεταλούδα” (butterfly network), ενώ στο Σχ. 2.5 (γ) φαίνεται η ίδια διαδικασία με χρήση κωδικοποίησης δικτύου. Ενώ στην πρώτη περίπτωση το ψηφίο  $x_1$  μπορεί να

Χωρίς κωδικοποίηση δικτύου



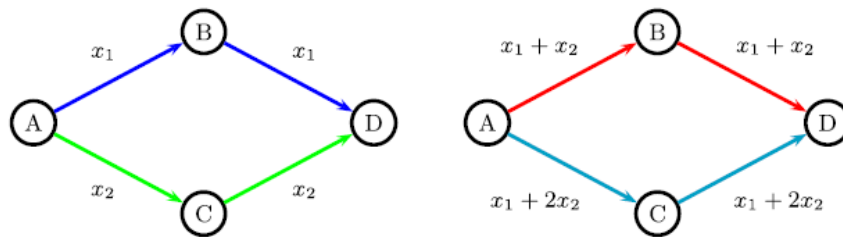
Με κωδικοποίηση δικτύου



Σχήμα 2.6: Παράδειγμα αύξησης της ενεργειακής απόδοσης με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου

δρομολογηθεί από τον κόμβο  $S_1$  στον κόμβο  $R_1$  μέσω της διαδρομής  $\{AC, CE, ED\}$  και το  $x_2$  από τον κόμβο  $S_2$  στον κόμβο  $R_2$  μέσω της διαδρομής  $\{BC, CE, EF\}$ , στη δεύτερη περίπτωση ο κόμβος C μπορεί να μεταδώσει το xor (δυναδικό άθροισμα) των ψηφίων και οι κόμβοι  $R_1, R_2$  να ανακτήσουν τα  $x_1$  και  $x_2$ , αντίστοιχα, αφού θα έχουν λάβει τα  $\{x_1, (x_1 + x_2)\}$  και  $\{x_2, (x_1 + x_2)\}$ .

Στο Σχ.2.6, ο κόμβος A πρόκειται να στείλει το δυαδικό ψηφίο  $x_1$  στον κόμβο C και ο κόμβος C το  $x_2$  στον A. Ο ενδιάμεσος κόμβος B, που δρα ως αναμεταδότης, δέχεται και τα δύο ψηφία. Χωρίς κωδικοποίηση δικτύου ο κόμβος B μεταδίδει το  $x_1$  στον κόμβο A και το  $x_2$  στον κόμβο C. Υποθέτοντας ότι ο χρόνος χωρίζεται σε χρονοσχισμές και ότι ένας τερματικός κόμβος μπορεί να μεταδώσει ή να λάβει ένα ψηφίο κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής, για τη μετάδοση των δύο ψηφίων χρειάζονται τέσσερις χρονοσχισμές. Η κωδικοποίηση δικτύου, ωστόσο, εκμεταλλεύεται τη δυνατότητα ευρυστοιχίας του μέσου μετάδοσης και ο B εκπέμπει το συδυασμό  $xor\ x_1 + x_2$  των ψηφίων όποτε χρειάζονται τρεις χρονοσχισμές για τη μετάδοσή τους. Είναι φανερό ότι η κωδικοποίηση δικτύου επιτυγχάνει μείωση της καθυστέρησης, του χρόνου κατάληψης του ασύρματου διαύλου και εξοικονόμηση ενέργειας.



Σχήμα 2.7: Παράδειγμα αποφυγής υποκλοπών με εφαρμογή της κωδικοποίησης δικτύου

Στο Σχ.2.7, απεικονίζεται η περίπτωση όπου ο κόμβος A πρόκειται να στείλει δύο δυαδικά ψηφία στον κόμβο D. Υποθέτοντας ότι κάποιος με στόχο την υποκλοπή των αρχείων έχει πρόσβαση μόνο στη μία από τις δύο δυνατές διαδρομές από τον A στον D, ο A μπορεί να στείλει ένα διαφορετικό γραμμικό συνδυασμό των ψηφίων μέσω των δύο διαδρομών. Με αυτόν τον τρόπο κάποιος που έχει στόχο την υποκλοπή των ψηφίων έχει 50% πιθανότητα να υποκλέψει ένα από τα δύο ψηφία.

## 2.7 Ο προσομοιωτής ONE

### 2.7.1 Περιγραφή του προσομοιωτή

Ο προσομοιωτής ONE δημιουργήθηκε στο τεχνολογικό πανεπιστήμιο του Ελσίνκι με σκοπό τη ρεαλιστική προσομοίωση DTN δικτύων. Σε σύγκριση με άλλα περιβάλλοντα που προσομοιώνουν μόνο σχήματα δρομολόγησης, ο προσομοιωτής ONE συνδυάζει μοντέλα

κινητικότητας, πρωτόκολλα δρομολόγησης, οπτικοποίηση του δικτύου και εύκολη εξαγωγή αναφορών για τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε ένα εύκολα επεκτάσιμο περιβάλλον.

Στον προσομοιωτή ONE, η περιοχή ανάπτυξης/προσομοίωσης, το εύρος εκπομπής των κόμβων και το μοντέλο κινητικότητας που ακολουθούν ορίζονται πριν την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης δημιουργούνται ειδοποιήσεις για την εγκατάσταση ή την απώλεια συνδέσεων, τη μετάδοση, τη διαγραφή, την αποτυχία μετάδοσης και την παράδοση μηνυμάτων. Ο προσομοιωτής ONE έχει τη δυνατότητα εξαγωγής γράφων των διαδρομών των παραδομένων μηνυμάτων

Ο προσομοιωτής ONE υποστηρίζει αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως το επιδειμικό, το PROPHET, το MaxProp, το Spray and Wait κτλ. Σε όλα τα σχήματα δρομολόγησης, όταν δύο κόμβοι έρχονται εντός εμβέλειας και υπάρχει δυνατότητα ανταλλαγής πληροφορίας πραγματοποιείται αρχικά έλεγχος αν υπάρχει αποθηκευμένο μήνυμα που προορίζεται για τον άλλο κόμβο. Η δρομολόγηση των υπολοίπων μηνυμάτων εξαρτάται από το σχήμα δρομολόγησης. Το μήνυμα δρομολόγησης του ONE περιλαμβάνει την κλάση Message Router. Επιπλέον, υποστηρίζονται αρκετά μοντέλα κινητικότητας, όπως τυχαία μοντέλα κινητικότητας ή μοντέλα βασισμένα σε χάρτη, όπου οι διαδρομές των κόμβων είναι συγκεκριμένες.

Ο προσομοιωτή ONE είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Τα πακέτα λογισμικού του ONE είναι τα εξής:

- Πακέτο οπτικοποίησης
- Πακέτο δρομολόγησης
- Πακέτο κινητικότητας
- Πακέτο αναφορών
- Πακέτο εισόδου
- Πακέτο δοκιμών σωστής λειτουργίας
- Το κεντρικό πακέτο

Στη διατριβή, ο προσομοιωτής ONE χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της εφαρμογής της τεχνικής κωδικοποίησης σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα (βλ. Κεφ. 5).



## Κεφάλαιο 3

# Ασύρματα αυτο-οργανούμενα δίκτυα

### 3.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη της ασύρματης τεχνολογίας και η αυξημένη χρήση των ασύρματων συσκευών που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια επιβάλλει τη γενική αλλαγή στον τρόπο αντιμετώπισης των ασύρματων δικτύων. Τα ασύρματα δίκτυα έχουν πλέον έντονη την ανάγκη της αυτο-οργάνωσης προκειμένου να προσαρμόζονται ταχέως και εύκολα στις δυναμικές συνθήκες που τα χαρακτηρίζουν. Σύμφωνα με την [15], ως αυτο-οργάνωση ορίζεται η εμφάνιση μιας προσαρμοστικής δικτυακής δομής της οποίας η λειτουργικότητα προκύπτει από απλές τοπικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεμονωμένων οντοτήτων.

Η ανάγκη για αυτο-οργάνωση οφείλεται στην έλλειψη κεντρικής διαχείρισης, τη διαφορετικότητα των συσκευών, την αναξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία ορισμένων δικτύων, την κινητικότητα των κόμβων, τους περιορισμούς των πόρων των κόμβων ή την ανάγκη υποστήριξης των διαφόρων τύπων τηλεπικοινωνιακής κίνησης που υπάρχουν στο δίκτυο. Τα ασύρματα δίκτυα που χαρακτηρίζονται από αυτο-οργάνωση απαντώνται στη βιβλιογραφία ως *ασύρματα αυτο-οργανούμενα δίκτυα* (Wireless Self-Organizing Networks, WSON) [16] και απαιτούν την ύπαρξη περισσότερης υπολογιστικής ευφυΐας στους αυτόνομους κόμβους που τα απαρτίζουν. Σύμφωνα με την αρκετά εκτενή βιβλιογραφία στο θέμα των αυτόνομων κόμβων, τα WSON δίκτυα υποστηρίζουν τις λειτουργίες της *αυτο-ρύθμισης* (self-configuration), *αυτο-ίασης* (self-healing), *αυτο-προστασίας* (self-protection) και *αυτο-βελτιστοποίησης* (self-healing). Τα χαρακτηριστικά που διέπουν τα WSON δίκτυα είναι:

- Έλλειψη εξωτερικού ελέγχου
- Προσαρμογή σε μεταβλητές συνθήκες
- Κοινή στόχευση των κόμβων του δικτύου και τοπικές αλληλεπιδράσεις
- Πολυπλοκότητα
- Δυναμική Λειτουργία

- Διακυμάνσεις και αστάθεια
- Εξάντληση πόρων
- Πολλαπλά σημεία ισορροπιών και τοπικών ακρότατων στις εκάστοτε σχέσεις ανταλλαγής

Σε αντίθεση με τα WSON δίκτυα, τα μη αυτο-οργανούμενα δίκτυα είτε δέχονται οδηγίες από ένα κεντρικό κόμβο είτε λειτουργούν με προδιαγεγραμμένους τρόπους. Η σχέση ανταλλαγής που προκύπτει κατά τη διαχείριση ενός WSON δικτύου είναι μεταξύ της δυνατότητας προσαρμογής και της δυνατότητας συνοχής και επέκτασης.

## 3.2 Κατηγορίες WSON δικτύων

Στην ευρύτερη κατηγορία των WSON δικτύων ανήκουν τα ασύρματα ad hoc δίκτυα, δηλαδή δίκτυα τα οποία μπορούν να σχηματιστούν οπουδήποτε και οποτεδήποτε χωρίς την ανάγκη ύπαρξης υποδομής. Η έλλειψη υποδομής σημαίνει ότι οι κόμβοι επικοινωνούν απευθείας αξιοποιώντας βασικές διαδικασίες, όπως δρομολόγηση, κατανομή διευθύνσεων επικοινωνίας και δικτυακής ταυτοποίησης. Παραδείγματα WSON δικτύων είναι τα εξής: [16]

- WSN δίκτυα: Τα WSN δίκτυα αποτελούνται από μικρούς σε διαστάσεις κόμβους με δυνατότητες ανίχνευσης του δικτύου, ασύρματης επικοινωνίας και υπολογισμών. Η συνήθης χρήση των WSN δικτύων είναι για παρατήρηση περιβαλλοντικών συνθηκών και φαινομένων, όπως και για εντοπισμό στόχων. Επομένως, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου, η επικοινωνία μεταξύ κόμβων αφορά ένα-προς-πολλούς (κόμβος-συγκέντρωσης προς αισθητήρες) και πολλούς-προς-ένα (αισθητήρες προς κόμβο-συγκέντρωσης). Τα WSN δίκτυα είναι ομογενή αποτελούμενα από το ίδιο τύπο αισθητήρων. Οι μόνες πιθανές εξαιρέσεις ομοιογένειας αποτελούν οι κόμβοι-συγκέντρωσης, οι οποίοι, για να επιτελούν τις αυξημένες λειτουργίες τους, ενδέχεται να είναι ισχυρότεροι υπολογιστικά σε σχέση με τους απλούς αισθητήρες. Επιπλέον, τα WSN δίκτυα είναι μεγάλης κλίμακας με εκατοντάδες ή χιλιάδες κόμβους εγκατεστημένους σε ευρείες γεωγραφικές περιοχές, με αρκετά περιορισμένους ενεργειακούς, επεξεργαστικούς και αποθηκευτικούς πόρους.
- Ασύρματα χαοτικά δίκτυα (Wireless Mesh Networks, WMN): Τα WMN δίκτυα μπορεί να ταξινομηθούν σε WMN δίκτυα υποδομής (infrastructure WMN), σε WMN δίκτυα πελατών (client WMN) και υβριδικά WMN δίκτυα (hybrid WMN). Στα WMN δίκτυα υποδομής οι κόμβοι σχηματίζουν ένα μικρό δίκτυο παροχής υπηρεσιών Διαδικτύου προς πελάτες. Σε αυτό τον τύπο WMN δεν παρατηρείται ετερογένεια ή διαβάθμιση στη συνεργασία μεταξύ των κόμβων. Ωστόσο, τα WMN δίκτυα υποδομής οφείλουν να

	<b>Ad Hoc Δίκτυα (Γενικά)</b>	<b>WSN</b>	<b>WMN</b>	<b>DTN</b>
Κινητικότητα	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή προς Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Περιορισμός Πόρων	Υψηλός	Πολύ Υψηλός	Χαμηλός προς Υψηλός	Μεσαίος
Διακύμανση Συνεργασίας	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή προς Υψηλή	Υψηλή
Ετερογένεια	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή προς Υψηλή	Πολύ Υψηλή

*Πίνακας 3.1: Τα χαρακτηριστικά των WSON ανά κατηγορία δικτύων*

ανταποκρίνονται στην αυξημένη ζήτηση για εξυπηρέτηση των WMN δικτύων πελατών και να υποστηρίζουν την ετερογένεια των τρόπων σύνδεσης των κόμβων-πελατών με αυτά. Τα WMN δίκτυα πελατών έχουν τα χαρακτηριστικά των κινητών ad-hoc δικτύων (Mobile Ad-hoc NETWORKS, MANET), η σύνδεση μεταξύ κόμβων είναι πάντα εξασφαλισμένη ενώ παρατηρείται ετερογένεια στους τρόπους σύνδεσης με τα WMN δίκτυα υποδομής. Τέλος, τα υβριδικά WMNs απαρτίζονται τόσο από κόμβους-πελάτες όσο και από κόμβους-υποδομής. Στα δίκτυα αυτά, η επικοινωνία μεταξύ πελάτη-με-πελάτη και πελάτη με το δίκτυο υποδομής είναι εξασφαλισμένη παρά τις προκλήσεις που εισάγει η κινητικότητα και η μεγάλη ετερογένεια των χαρακτηριστικών των κόμβων.

- DTN δίκτυα: Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα DTN δίκτυα αντιμετωπίζουν συχνές διακοπές επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων ενώ δεν είναι πάντα εφικτή η σύνδεση του κόμβου-πηγής με τον κόμβο-προορισμό. Επιπλέον, οι DTN κόμβοι χαρακτηρίζονται συνήθως από περιορισμένους ενεργειακούς, επεξεργαστικούς και αποθηκευτικούς πόρους.

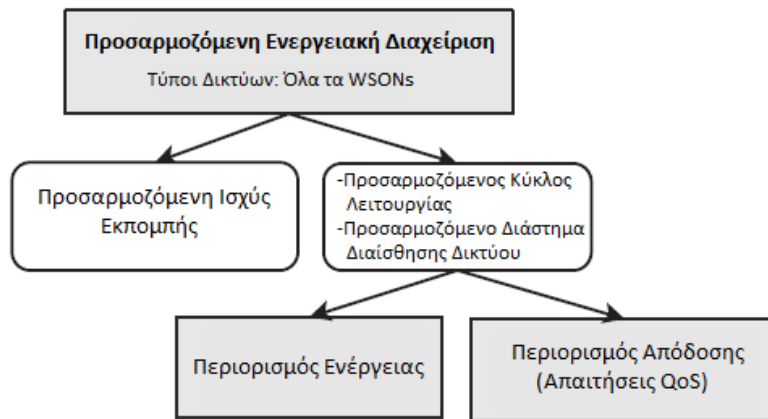
Ο Πίνακας 3.1 εμφανίζει τη διαβάθμιση βασικών χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων WSON.

### **3.3 Προσαρμοστικές υπηρεσίες σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα**

Η δυνατότητα προσαρμογής παρέχει μεγάλη ευελιξία υπό δυναμικές συνθήκες λειτουργίας αλλά θέτει σημαντικές προκλήσεις στη σχεδίαση υπηρεσιών που την υποστηρίζουν. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι υπηρεσίες αυτο-οργανούμενων DTN δικτύων που διαθέτουν την ικανότητα προσαρμογής σε δυναμικές συνθήκες [16].

#### **3.3.1 Διαχείριση πόρων**

Η διαχείριση των πόρων αφορά την επεξεργαστική ισχύ και μνήμη, το εύρος ζώνης και την ενέργεια των κόμβων. Ωστόσο, στη βιβλιογραφία είναι συχνότερη η ανάπτυξη και μελέτη



Σχήμα 3.1: Διαχείριση Ενέργειας στα WSON δίκτυα

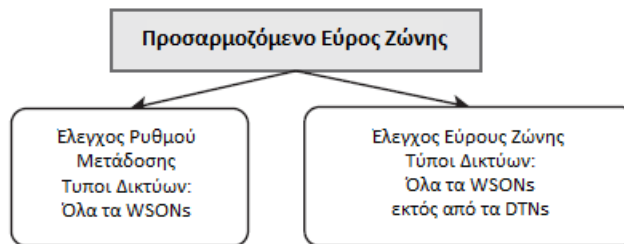
σημάτων που αφορούν τη διαχείριση του εύρους ζώνης και της ενέργειας των κόμβων.

### 3.3.1.1 Ενεργειακή διαχείριση

Η ενέργεια αποτελεί ένα από τους κρισιμότερους πόρους που διαθέτουν οι κόμβοι και εξαρτάται από τα επίπεδα της εναπομένουσας ενέργειας των κόμβων και τη δυνατότητα φόρτισής των συσσωρευτών ενέργειάς τους. Η διαχείριση ενέργειας στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα αφορά την ενέργεια που καταναλώνεται τόσο κατά την εκπομπή όσο και κατά την αναμονή (idle mode). Στην πρώτη περίπτωση, οι σχετικές ερευνητικές προσπάθειες προσανατολίζονται στην εύρεση του βέλτιστου συμβιβασμού μεταξύ δύο αντικρουόμενων στόχων, της μείωσης της ισχύος εκπομπής και της αύξησης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Στη δεύτερη περίπτωση, τα προτεινόμενα σχήματα αποσκοπούν είτε στην κατάλληλη ρύθμιση του κύκλου λειτουργίας των κόμβων είτε στον προσδιορισμό της βέλτιστης συχνότητας ανίχνευσης του δικτύου. Η αντισταθμιστική σχέση την οποία διαχειρίζονται στην περίπτωση αυτή τα προτεινόμενα σχήματα είναι μεταξύ της συχνότητας ανίχνευσης του δικτύου ή της χρονικής διάρκειας όπου ο κόμβος βρίσκεται σε αδρανή κατάσταση (sleep mode) και της πιθανότητας αποκατάστασης ζεύξης επικοινωνίας μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων. Σε κάθε περίπτωση, τα προτεινόμενα σχήματα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα προσαρμογής στις δυναμικές συνθήκες του διαύλου.

**3.3.1.1.1 Προσαρμοστική μετάδοση δεδομένων** Η μετάδοση δεδομένων μεταξύ των κόμβων επηρεάζεται από δύο παράγοντες (i) την ισχύ εκπομπής και (ii) τη χρονική διάρκεια μετάδοσης των δεδομένων. Μέσω του ελέγχου της ισχύος εκπομπής, το δίκτυο επηρεάζεται ποικιλοτρόπως. Για παράδειγμα, επιλέγοντας διαφορετικά επίπεδα ισχύος λειτουργίας των κόμβων, υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της τοπολογίας του δικτύου προκειμένου να ικανοποιηθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας (k-συνδεδεμένο δίκτυο, δέντρο ευρεκπομπής κτλ). Επιπλέον, ο έλεγχος της ισχύος μετάδοσης επηρεάζει την παρεμβολή με-





Σχήμα 3.2: Διαχείριση Εύρους Ζώνης στα WSON δίκτυα

ταξύ των κόμβων.

**3.3.1.1.2 Προσαρμοστική ανίχνευση δικτύου** Η λειτουργία της ανίχνευσης δικτύου μπορεί να ρυθμιστεί είτε μεταβάλλοντας κατάλληλα τον κύκλο λειτουργίας του κόμβου (εναλλαγή μεταξύ ενεργής και αδρανούς κατάστασης) είτε καθορίζοντας τη συχνότητα με την οποία οι κόμβοι εκπέμπουν σήματα ανίχνευσης του δικτύου.

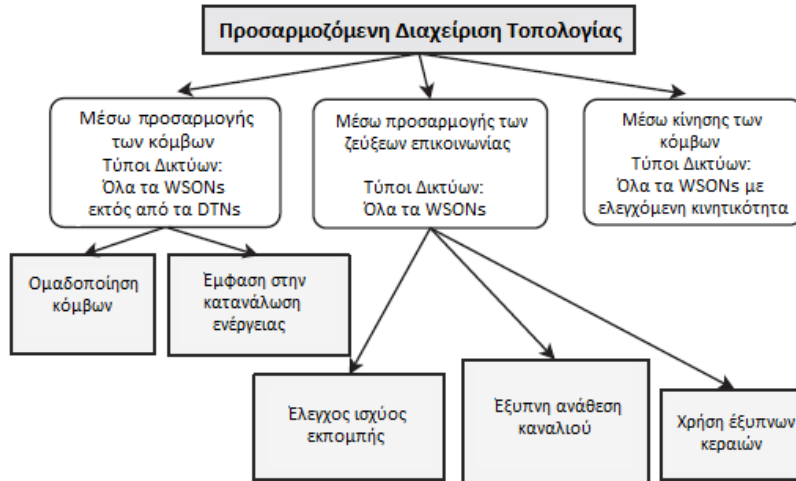
Στην πρώτη περίπτωση, η δυσκολία ανάπτυξης ενός σχήματος ρύθμισης της κατάστασης των κόμβων έγκειται στο ότι ένας κόμβος πρέπει να είναι σε αδρανή κατάσταση όταν δεν υπάρχει κίνηση στο δίκτυο και μεταβαίνει άμεσα σε ενεργή κατάσταση όταν εμφανιστεί κίνηση στο δίκτυο. Επομένως, ένα σχήμα με σταθερή εναλλαγή καταστάσεων αποτυγχάνει υπό συνθήκες υψηλής ή χαμηλής κίνησης. Για το λόγο αυτό, τα σχήματα ρύθμισης της κατάστασης των κόμβων οφείλουν να διαθέτουν δυνατότητα προσαρμογής στις συνθήκες αυξημένης ή μειωμένης κίνησης του δικτύου.

Στη δεύτερη περίπτωση, τα σχήματα που αναπτύσσονται αποσκοπούν στον προσδιορισμό της βέλτιστης συχνότητας ανίχνευσης του δικτύου από τους κόμβους, η τιμή της οποίας οφείλει να προσαρμόζεται ανάλογα στην πυκνότητα του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι για αραιά δίκτυα οι κόμβοι πραγματοποιούν ανίχνευση του δικτύου με μικρή συχνότητα ενώ για πυκνά δίκτυα η συχνότητα ανίχνευσης είναι υψηλή (βλ. Παράρτημα Α).

### 3.3.1.2 Διαχείριση εύρους ζώνης

Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα όπου το εύρος ζώνης είναι απεριόριστο, το εύρος ζώνης στα ασύρματα δίκτυα είναι περιορισμένο. Επιπλέον, στα ασύρματα δίκτυα το διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορεί να είναι χρονικά μεταβαλλόμενο, λόγω των δυναμικών συνθηκών που προκύπτουν από την κινητικότητα των κόμβων, τις καιρικές συνθήκες, την ετερογένεια των επιμέρους δικτύων και τις παρεμβολές που προκύπτουν από τον ανταγωνισμό των κόμβων για χρήση των ασύρματων πόρων.

Στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα η διαχείριση του εύρους ζώνης γίνεται εμμέσως μέσω του ελέγχου του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Κατάλληλα πρωτόκολλα στο φυσικό στρώμα προσαρμόζουν το ρυθμό μετάδοσης στην ποιότητα των ζεύξεων ή την πυκνότητα του δικτύου. Ο άμεσος έλεγχος του εύρους ζώνης με δυνατότητα επιλογής για δέσμευσή του



Σχήμα 3.3: Διαχείριση Τοπολογίας στα WSON δίκτυα

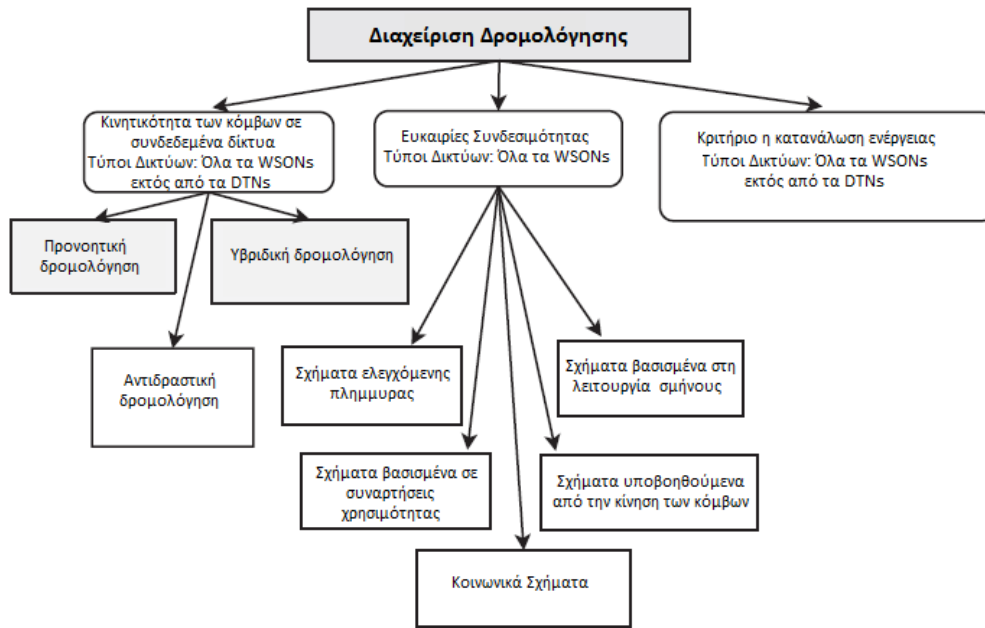
σε υπηρεσίες με προτεραιότητα (QoS), ο οποίος χρησιμοποιείται σε αρκετά WSON δίκτυα, προϋποθέτει την ύπαρξη διαρκούς συνδεσιμότητας μεταξύ των κόμβων του δικτύου, και κατ' επέκταση, δεν είναι εφαρμόσιμος στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα.

### 3.3.2 Διαχείριση της τοπολογίας στα WSON δίκτυα

Η διαχείριση της τοπολογίας στα WSON δίκτυα μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω προσαρμογής της θέσης κόμβων (node adaptation), είτε μέσω προσαρμογής των ζεύξεων (link adaptation) είτε μέσω κίνησης των κόμβων. Επειδή η προσαρμογή των κόμβων αφορά την επιβολή ιεραρχίας μέσω ομαδοποίησης τους ή την κατ' επιλογή απενεργοποίησή τους, είναι απαραίτητη η γνώση της τοπολογίας του δικτύου. Επομένως, η διαχείριση της δικτυακής τοπολογίας μέσω προσαρμογής των κόμβων δεν είναι εφικτή στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα.

Η προσαρμογή των ζεύξεων στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα μπορεί να πραγματοποιηθεί με (i) την προσαρμογή της ισχύος εκπομπής των κόμβων στην πυκνότητα του δικτύου ή τη συμφόρηση των ζεύξεων, (ii) τη δυναμική ανάθεση καναλιών επικοινωνίας που επηρεάζει τη γειτνίαση των κόμβων ή (iii) τη χρήση πολυκατευθυντικών έξυπνων κεραιών, των οποίων η προσαρμογή της διεύθυνσης των δεσμών εκπομπής επηρεάζει την τοπολογία του δικτύου.

Η κίνηση των κόμβων μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση της τοπολογίας των αυτο-οργανούμενων DTN δικτύων. Στα δίκτυα που υποστηρίζουν την *ελεγχόμενη κίνηση* (controlled mobility) των κόμβων τους (SAN κτλ) η δυνατότητα προσαρμογής της κίνησης των κόμβων διαμορφώνει δυναμική δικτυακή τοπολογία προκειμένου να ικανοποιηθούν συγκεκριμένες προδιαγραφές απόδοσης.



Σχήμα 3.4: Δρομολόγηση/Προώθηση στα WSON δίκτυα

### 3.3.3 Δρομολόγηση/Προώθηση

Η προσαρμοζόμενη δρομολόγηση/προώθηση στα WSON δίκτυα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με κριτήριο (i) την κινητικότητα των κόμβων σε συνδεδεμένα δίκτυα, (ii) τις ευκαιρίες σύνδεσης στα αποσυνδεδεμένα δίκτυα και (iii) την κατανάλωση ενέργειας ή την εναπομένονσα ενέργεια των κόμβων. Το πρώτο και τρίτο κριτήριο δεν αφορά τα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα και, επομένως, δεν θα μελετηθούν σε αυτή την εργασία.

Μια διαφορετική ταξινόμηση των σχημάτων δρομολόγησης/προώθησης στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα είναι η ακόλουθη:

- *Σχήματα Ελεγχόμενης Πλημμύρας (Controlled Flooding)*: Τα σχήματα αυτά βασίζονται στο Epidemic πρωτόκολλο δρομολόγησης και σε παραλλαγές αυτού, σε μια προσπάθεια αξιοποίησης της κατανεμημένης φύσης του Epidemic πρωτοκόλλου και της μείωσης του πλεονασμού της πληροφορίας που διαχέεται στο δίκτυο.
- *Σχήματα βασισμένα σε Συναρτήσεις Χρησιμότητας (Utility-Based)*: Τα σχήματα αυτά αξιοποιούν κατάλληλες συναρτήσεις χρησιμότητας ως κριτήρια για την επιλογή των κόμβων στους οποίους προωθούν την αποθηκευμένη πληροφορία. Στόχος είναι η μείωση των αρνητικών επιπτώσεων του επιδημικού πρωτοκόλλου (PROPHET, MaxProp, Delegation Forwarding and Spray and Focus).
- *Σχήματα βασισμένα στην Κοινωνική Συμπεριφορά (Social behavior-based)*: Τα σχήματα αυτά χρησιμοποιούν κινητικές συνήθειες του ανθρώπου και τα αντίστοιχα σχή-

ματα κίνησης προκειμένου να μελετηθεί η δρομολόγηση τηλεπικοινωνιακών κόμβων που φέρονται από ανθρώπους είτε από συσκευές σε παρόμοια κινητική συμπεριφορά.

- *Σχήματα Υποβοηθούμενα από την Κίνηση των Κόμβων (Mobility-assisted)*: Τα σχήματα αυτά αξιοποιούν την κίνηση των κόμβων προκειμένου να αυξήσουν τη συνδεσιμότητα και τη χωρητικότητα του δικτύου.
- *Σχήματα βασισμένα στη Λειτουργία Σμήνους (Swarm intelligence-based)*: Τα σχήματα αυτά επιτρέπουν να εφαρμοστούν διαφορετικά κριτήρια βελτιστοποίησης ανά ροή πληροφορίας αντί κοινών κριτηρίων για όλες τις ροές πληροφορίας προκειμένου να ικανοποιηθούν οι προδιαγραφές ποιότητας (QoS).

### **3.3.4 Διαχείριση δεδομένων**

Η διαχείριση δεδομένων στα WSON δίκτυα και κυρίως στα WSN δίκτυα αποτελεί βασικό σχεδιαστικό πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει ένα πλήθος προκλήσεων, όπως το συντονισμό των κινήσεων μεταξύ κόμβων με περιορισμένους επεξεργαστικούς και αποθηκευτικούς πόρους. Τα σχήματα που ασχολούνται με τη διαχείριση δεδομένων διαχωρίζονται σε αυτά που αφορούν τη συλλογή ροών πληροφορίας από ένα κεντρικό κόμβο, τη διάχυση της πληροφορίας προς το δίκτυο και την επεξεργασία της πληροφορίας μέσα στο δίκτυο.

## Κεφάλαιο 4

### Κινητικότητα στα DTN δίκτυα

#### 4.1 Εισαγωγή

Στο Κεφ. 4 παρουσιάζονται τα μοντέλα κινητικότητας που χρησιμοποιούνται ανά κατηγορία DTN δικτύων. Σε πολλές περιπτώσεις η κινητικότητα των κόμβων αυξάνει την πιθανότητα να υπάρξει ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους, λόγω της δυναμικής τοπολογίας που αυτή διαμορφώνει. Συνεπώς, η κινητικότητα των κόμβων αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά ενός DTN δικτύου που χρήζει περαιτέρω μελέτης.

#### 4.2 Μοντέλα κινητικότητας

Στην πλειοψηφία των DTN δικτύων, η κινητικότητα των κόμβων αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό που καθορίζει τη συχνότητα, την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησής τους. Η κινητικότητα των κόμβων ενδέχεται να καθορίζεται από εξωγενείς παράγοντες, όπως η κίνηση των οντοτήτων στα οποία προσαρτώνται (άνθρωποι, ζώα) ή από τα μοντέλα κινητικότητας που οι κόμβοι ακολουθούν. Σε κάθε περίπτωση, η κινητικότητα των κόμβων διαμορφώνει μια δυναμική τοπολογία δικτύου στην οποία η σύνδεσή τους δεν είναι εγγυημένη και η διάρκεια της σύνδεσής τους ενδέχεται να είναι μικρή. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις, η δυναμική τοπολογία αυξάνει την πιθανότητα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων που βρίσκονται ή αναμένεται να βρεθούν εντός εμβέλειας [17], [18]. Ιδιαίτερα στα αραιά DTN, η κινητικότητα των κόμβων αποτελεί ένα από τους λίγους τρόπους για να καταστεί εφικτή η μεταξύ τους επικοινωνία [19], [20]. Επιπλέον, σε σχήματα που χρησιμοποιούν την τεχνική NC, η κίνηση των κόμβων ενισχύει την ανάμειξη των δεδομένων, που με τη σειρά της συμβάλλει στην επιλογή κατάλληλων και γραμμικώς ανεξάρτητων συνιστωσών για να αποκρυπτογραφηθεί η πληροφορία στον κόμβο-προορισμό [14].

Τα μοντέλα κινητικότητας επιδιώκουν την προσομοίωση της πραγματικής κίνησης των κόμβων, η οποία χαρακτηρίζεται από χρονικά μεταβλητή ταχύτητα και κατεύθυνση [21], [22]. Καθώς τα πρότυπα κίνησης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση των ασύρμα-

των κινητών δικτύων -συνεπώς των DTN δικτύων- η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου κινητικότητας για ένα δίκτυο κόμβων είναι καθοριστική για τη μελέτη των πραγματικών προβλημάτων του δικτύου [23]- [24]. Κατά τη ανάλυση των μοντέλων κινητικότητας, κάθε κόμβος αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα, διευκολύνοντας τη μελέτη της επίδρασης της δυναμικής τοπολογίας, που οφείλεται στην κίνηση των κόμβων, στην απόδοση του δικτύου.

Η κίνηση κάθε κόμβου σε οποιοδήποτε μοντέλο κινητικότητας χαρακτηρίζεται από μια ακολουθία διαστημάτων τυχαίας διάρκειας (epoch), κατά τη διάρκεια των οποίων ο κόμβος κινείται με σταθερή κατεύθυνση (φορά και διεύθυνση) και ταχύτητα. Η ταχύτητα και η κατεύθυνση ενός κινούμενου κόμβου ενδέχεται να μεταβάλλονται από διάστημα σε διάστημα, ακολουθώντας συγκεκριμένες προδιαγραφές κατά μοντέλο κινητικότητας. Για την κατάλληλη διατύπωση των χαρακτηριστικών ενός μοντέλου κινητικότητας, πρέπει να αποσαφηνιστούν οι ακόλουθες παράμετροι [21]:

- Η μεταβλητότητα της διάρκειας των διαστημάτων κίνησης κατά τη λειτουργία του δικτύου, η κατανομή που ακολουθεί η διάρκεια των διαστημάτων και τα στατιστικά μεγέθη της (μέση τιμή, μεταβλητότητα)
- Το ενδεχόμενο στάσης των κόμβων κατά τη μετάβαση από το ένα διάστημα κίνησης στο επόμενο
- Η στατιστική κατανομή της διεύθυνσης των κόμβων κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος κίνησης (π.χ. ομοιόμορφα κατανεμημένη στο διάστημα  $(0, 2\pi)$ )
- Η στατιστική κατανομή της ταχύτητας των κόμβων
- Η συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας, της διεύθυνσης και της διάρκειας του διαστήματος κίνησης μεταξύ των κόμβων
- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function, *pdf*) της ατομικής ή συλλογικής κίνησης των κόμβων, εξαρτώμενη από τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου κινητικότητας.

## 4.3 Χαρακτηριστικά μοντέλων κινητικότητας

### 4.3.1 Μαθηματική περιγραφή των επαφών μεταξύ κόμβων

Η μαθηματική περιγραφή των επαφών μεταξύ κόμβων σε ένα DTN δίκτυο αποτελεί βασικό ζήτημα για τα μοντέλα κινητικότητας. Ως επαφή μεταξύ δύο κόμβων ορίζεται η χωρική προσέγγισή τους ώστε να εντοπίζονται ο ένας τον άλλο μέσω των διεπαφών επικοινωνίας τους (κεραίες). Σε πολλές περιπτώσεις, ο ορισμός των μοντέλων κινητικότητας βασίζεται στην

στατιστική κατανομή της διαδικασίας επαφών σε ένα δίκτυο (contact process). Για τη μαθηματική περιγραφή των επαφών μεταξύ κόμβων θεωρείται η στοχαστική διαδικασία που περιγράφει τη χρονική αλληλουχία σύναψης επαφών μεταξύ κόμβων ενός δικτύου. Πολλά μοντέλα κινητικότητας χρησιμοποιούν συγκεκριμένο μοντέλο επαφών στο δίκτυο, βάσει του οποίου προκύπτουν τα στατιστικά μεγέθη τους. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται συχνότερα για τη περιγραφή επαφών σε DTN δίκτυα είναι το Poisson και το Self-Similar.

#### 4.3.1.1 Poisson διαδικασία

Η γνωστότερη διαδικασία περιγραφής επαφών είναι η Poisson διαδικασία [25], που έχει πάρει το όνομα της από την ομώνυμη κατανομή. Σύμφωνα με τον ευρύτερο μαθηματικό ορισμό της, η Poisson διαδικασία είναι μια στοχαστική, συνεχής διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη μαθηματική περιγραφή των χρονικών στιγμών κατά τις οποίες πραγματοποιείται μια ακολουθία γεγονότων σε ένα σύστημα. Μια παραλλαγή του ορισμού της αναφέρει ότι η Poisson διαδικασία είναι μια διαδικασία καταμέτρησης του πλήθους των γεγονότων  $\{N(t), t \geq 0\}$  που πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η Poisson διαδικασία αναφέρεται στην καταμέτρηση του πλήθους των επαφών που συνάπτονται μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων σε ένα δίκτυο DTN ή, άλλως, στη μαθηματική διατύπωση των χρονικών στιγμών κατά τις οποίες δύο τυχαίοι κόμβοι του δικτύου έρχονται σε επαφή. Σε μια Poisson διαδικασία, ένα γεγονός συμβαίνει σε τυχαίες χρονικές στιγμές ενώ η πιθανότητα αυτό να συμβεί σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι μηδενική. Συνεπώς, η Poisson διαδικασία δεν αποσκοπεί στον προσδιορισμό της πιθανότητας πραγματοποίησης ενός γεγονότος σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση το γεγονός είναι η σύναψη επαφής μεταξύ δύο κόμβων. Συνήθως, η Poisson διαδικασία χρησιμοποιείται για τη μαθηματική περιγραφή των χρονικών διαστημάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ διαδοχικών γεγονότων. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την Poisson διαδικασία, η πιθανότητα να συμβούν δύο γεγονότα την ίδια χρονική στιγμή είναι μηδενική.

**4.3.1.1.1 Ομογενής Poisson διαδικασία** Συχνά στη βιβλιογραφία, ο ορισμός της ομογενούς Poisson διαδικασίας (homogeneous Poisson process) [25] συμπίπτει με το γενικευμένο ορισμό της Poisson διαδικασίας. Τα χαρακτηριστικά της ομογενούς Poisson διαδικασίας είναι:

- Οι διαδικασίες σύναψης επαφών μεταξύ κόμβων ενός δικτύου σε ασυνεχή χρονικά διαστήματα είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται *ιδιότητα των ανεξάρτητων προσανξήσεων* (independent increments) που καθιστά την Poisson διαδικασία μια διαδικασία “χωρίς μνήμη” (memoryless property).

- Η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας του πλήθους των επαφών που συνάπτονται σε ένα χρονικό διάστημα εξαρτάται μόνο από τη διάρκεια του διαστήματος και είναι ανάλογη προς αυτό. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται *ιδιότητα των στατικών προσανξήσεων* (stationary increments).
- Τα χρονικά διαστήματα που παρεμβάλλονται μεταξύ δύο επαφών είναι εκθετικά κατανεμημένα στο χρόνο, με σταθερό ρυθμό επαφών  $\lambda$ . Η εκθετική κατανομή με σταθερό ρυθμό  $\lambda$  έχει μέση τιμή και διασπορά ίση με  $\lambda$ .
- Η υπέρθεση ανεξάρτητων Poisson διαδικασιών με ρυθμούς  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  αποτελεί Poisson διαδικασία με ρυθμό  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N$ .

Σύμφωνα με την Poisson διαδικασία, η πιθανότητα να συναφθούν  $n$  επαφές σε χρονικό διάστημα  $[0, T)$  ισούται με

$$P(N(t) = n) = \frac{(\lambda \cdot T)^n \cdot e^{-\lambda \cdot T}}{n!} \quad (4.1)$$

Επομένως, η πιθανότητα να υπάρξει τουλάχιστον μια επαφή στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι ίση με

$$P(N(t) > 0) = 1 - P(N(t) = 0) = 1 - e^{-\lambda \cdot T} \quad (4.2)$$

**4.3.1.1.2 Μη ομογενής Poisson διαδικασία** Η μη ομογενής Poisson διαδικασία (non-homogeneous ή inhomogeneous Poisson process) [25] είναι η χρονικά μεταβαλλόμενη εκδοχή της Poisson διαδικασίας, καθώς αφορά την καταμέτρηση του πλήθους των γεγονότων που συμβαίνουν σε ένα χρονικό διάστημα με χρονικά μεταβαλλόμενο ρυθμό  $\lambda(t)$ . Ο ρυθμός  $\lambda(t)$  μπορεί να είναι είτε μια ντετερμινιστική συνάρτηση του χρόνου ή μια ανεξάρτητη στοχαστική διαδικασία (Cox process). Για τη μη ομογενή Poisson διαδικασία δεν ισχύουν οι ιδιότητες των στατικών προσανξήσεων και των εκθετικά κατανεμημένων χρονικών διαστημάτων μεταξύ επαφών. Αυτό είναι εύλογο καθώς, αν το πλήθος των γεγονότων που πραγματοποιούνται σε ένα διάστημα ακολουθούν τη μη ομογενή Poisson διαδικασία, τότε έχουν ρυθμό που αποτελεί συνάρτηση του χρόνου  $\lambda(t)$  και όχι ανάλογο της διάρκειας του διαστήματος,  $\lambda \cdot t$ . Συγκεκριμένα, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα  $[0, T)$ , ο ρυθμός πραγματοποίησης γεγονότων είναι ίσος με

$$\lambda_{[0,T)} = \int_0^T \lambda(t) dt \quad (4.3)$$

Επομένως, η πιθανότητα το πλήθος των γεγονότων που πραγματοποιούνται σε διάστημα



$[0, T)$  να είναι  $n$  είναι ίση με

$$P(N(t) = n) = \frac{e^{-\lambda_{[0,T]}} \cdot (\lambda_{[0,T]})^n}{n!} \quad (4.4)$$

και η πιθανότητα να υπάρξει τουλάχιστον μια επαφή στο συγκεκριμένο διάστημα είναι ίση με

$$P(N(t) > 0) = 1 - P(N(t) = 0) = 1 - e^{-\lambda_{[0,T]}} \quad (4.5)$$

**4.3.1.1.3 Εκρηκτικότητα επαφών: Περιορισμοί του Poisson μοντέλου** Ένας βασικός περιορισμός του Poisson μοντέλου είναι η αδυναμία μαθηματικής διατύπωσης της εκρηκτικής εμφάνισης επαφών στο δίκτυο. Το Poisson μοντέλο είναι κατάλληλο για τη μαθηματική περιγραφή γεγονότων που πραγματοποιούνται με ρυθμό περιορισμένης μεταβλητότητας τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς το χώρο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι επαφές συνάπτονται με διαδικασίες που είτε είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους είτε έχουν χρονικές συσχετίσεις που εξασθενούν ταχέως κατά εκθετικό τρόπο. Επιπλέον, περιορισμένη μεταβλητότητα υποδηλώνει καθόλου ή περιορισμένη εκρηκτικότητα. Ωστόσο, η εμφάνιση επαφών μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου ενδέχεται να χαρακτηρίζεται από υψηλή ή ακραία εκρηκτικότητα. Στατιστικά, η χρονικά μεταβαλλόμενη κίνηση σε ένα δίκτυο μπορεί να διατυπωθεί μαθηματικά μέσω συναρτήσεων που παρουσιάζουν εξαρτήσεις μεγάλου εύρους (long-range dependencies) ή, άλλως, αυτοσυσχέτιση με εξασθένηση νόμου-δύναμης (power-law decay). Από την άλλη πλευρά, η χωρική μεταβλητότητα μπορεί να περιγραφεί μέσω heavy-tailed κατανομών με άπειρη διασπορά, όπως η Pareto κατανομή. Γενικότερα, η μεγάλη μεταβλητότητα ως προς το χώρο και το χρόνο δημιουργεί στο δίκτυο κίνηση με συμπεριφορά μορφοκλάσματος (fractal behavior), που διαθέτει στατιστικές ιδιότητες που επαναλαμβάνονται σε πολλές κλίμακες χρόνου. Η συμπεριφορά μορφοκλάσματος χαρακτηρίζει την αυτο-ομοιόμορφη (self-similar) κίνηση [26].

#### 4.3.1.2 Self-Similar διαδικασία

Η έννοια της αυτο-ομοιόμορφας (self-similarity) εισήχθη για πρώτη φορά στον τομέα των τηλεπικοινωνιών από τον Mandelbrot το 1965. Ωστόσο, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στη μαθηματική περιγραφή της κίνησης τη δεκαετία του 1980. Μια στοχαστική διαδικασία είναι αυτο-ομοιόμορφη ή παρουσιάζει εξαρτήσεις μεγάλου εύρους αν η συνάρτηση αυτοσυσχέτισής της εξασθενεί αργά, με πολυωνυμική εξασθένηση ή εξασθένηση νόμου-δύναμης [26]. Διαισθητικά, η αργή εξασθένηση υποδηλώνει υψηλή συσχέτιση μεταξύ διακριτών σημείων της διαδικασίας [27]. Σε αντίθεση με την Poisson διαδικασία, κατά την οποία γεγονότα που απέχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα μεταξύ τους είναι ανεξάρτητα, σε self-similar διαδικασίες παραβιάζεται η υπόθεση ανεξαρτησίας, καθώς γεγονότα που απέχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα μεταξύ τους εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση. Η αυτο-ομοιόμορφη

αποτιμάται συνήθως μέσω της παραμέτρου Hurst. Η παράμετρος Hurst λαμβάνει τιμές από 0.5 έως 1, όπου το 0.5 δηλώνει μη συσχετιζόμενα γεγονότα ενώ τιμές μεγαλύτερες από 0.5 δηλώνουν περισσότερο σύνθετες διαδικασίες. Η παράμετρος Hurst αποτελεί μέτρο της εκρηκτικότητας self-similar γεγονότων. Η παράμετρος Hurst μπορεί να αποτιμηθεί μέσω δειγματικών τεχνικών που παρουσιάζονται στη [28]. Ακολούθως, παρατίθενται οι μαθηματικές βάσεις της αυτο-ομοιομορφίας [29].

Έστω  $X = (X_t : t = 0, 1, \dots)$  μια στοχαστική διαδικασία με στάσιμη συνδιακύμανση (covariance-stationary stochastic process) ή, άλλως, στατική -υπό την ευρεία έννοια- στοχαστική διαδικασία (wide-sense stationary stochastic process). Αυτό συνεπάγεται ότι η  $X$  είναι μια διαδικασία με σταθερή μέση τιμή  $\mu = E[X_t]$ , πεπερασμένη διακύμανση  $\sigma^2 = E[(X_t - \mu)^2]$  και συνάρτηση αυτοσυσχέτισης  $r(k) = E[(X_t - \mu) \cdot (X_{t+k} - \mu)] / E[(X_t - \mu)^2]$ ,  $k = 0, 1, \dots$  εξαρτώμενη μόνο από το  $k$ . Συγκεκριμένα, η διαδικασία  $X$  έχει συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της μορφής

$$r(k) \sim a_1 \cdot k^{-\beta}, k \rightarrow \infty \quad (4.6)$$

όπου  $0 < \beta < 1$  και  $a_1$  μια πεπερασμένη θετική σταθερά.

Έστω  $X^{(m)} = (X_k^{(m)} : k = 1, 2, \dots)$ ,  $m = 1, 2, \dots$  μια χρονοσειρά που προκύπτει από τη μεσοστάθμιση των σειρών σε μη επικαλυπτόμενα διαστήματα μεγέθους  $m$ . Σημειώνεται ότι για κάθε  $m$ , οι αθροιστικές χρονοσειρές  $X^{(m)}$  είναι στοχαστικές διαδικασίες με στατική συνδιακύμανση. Έστω, επίσης,  $r^{(m)}$  η αντίστοιχη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης.

Η διαδικασία  $X$  θεωρείται ακριβώς (δεύτερου βαθμού) αυτο-ομοιόμορφη (exactly second-order self-similar) με παράμετρο αυτο-ομοιομορφίας Hurst,  $H = 1 - \beta/2$ , αν οι αντίστοιχες αθροιστικές διαδικασίες  $X^{(m)}$  έχουν την ίδια συνάρτηση αυτοσυσχέτισης με τη διαδικασία  $X$ , δηλαδή,  $r^{(m)}(k) = r(k)$ . Ένα παράδειγμα ακριβώς αυτο-ομοιόμορφης διαδικασίας είναι ο μορφοκλασματικός θόρυβος Gauss (FGN) με παράμετρο  $1/2 < H < 1$  που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Mandelbrot και Van Ness το 1968.

Η διαδικασία  $X$  θεωρείται ασυμπτωτικά (δεύτερου βαθμού) αυτο-ομοιόμορφη (asymptotically second-order self-similar) με παράμετρο αυτο-ομοιομορφίας Hurst,  $H = 1 - \beta/2$ , αν η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης  $r^{(m)}(k)$  των αντίστοιχων αθροιστικών διαδικασιών  $X^{(m)}$  προσεγγίζουν ασυμπτωτικά (για μεγάλες τιμές του  $m$  και του  $k$ ) τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της διαδικασίας  $X$ .

Μαθηματικά, η αυτο-ομοιομορφία μιας διαδικασίας μπορεί να διακριθεί με διάφορους τρόπους:

- βραδεία εξασθένηση της διακύμανσής της
- βραδύτερη εξασθένηση (συγκριτικά με την εκθετική εξασθένηση) της συνάρτησης αυτοσυσχέτισής της, υποδηλώνοντας εξάρτηση ευρείας κλίμακας (long-range)

- πολυωνυμική συμπεριφορά της φασματικής πυκνότητάς της

Οι self-similar διαδικασίες χρησιμοποιούν heavy-tail κατανομές για τη μαθηματική περιγραφή του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών γεγονότων. Οι heavy-tail κατανομές χρησιμοποιούνται για τη μαθηματική περιγραφή τυχαίων μεταβλητών που λαμβάνουν μεγάλες τιμές με μεγάλη πιθανότητα. Μια υποκατηγορία heavy-tail κατανομών αποτελούν οι power-law κατανομές, δηλαδή οι κατανομές των οποίων η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι πολυωνυμική. Στη βιβλιογραφία των DTN δικτύων ο όρος self-similar κίνηση χρησιμοποιείται συχνά για να υποδηλώσει τον power-law νόμο που διέπει το χρόνο μεταξύ δύο επαφών.

**4.3.1.2.1 Pareto κατανομή** Ο κύριος αντιπρόσωπος των power-law κατανομών είναι η Pareto κατανομή. Έστω  $X$  τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την Pareto κατανομή. Η πιθανότητα η μεταβλητή αυτή να λάβει τιμές μεγαλύτερες από κάποιο αριθμό  $x$  ή, άλλως, η *συνάρτηση επιβίωσης* (survival function)/*συνάρτηση ουράς* (tail function) περιγράφεται από τη σχέση

$$S(x) = P(X > x) = \begin{cases} (x/\beta)^{-\alpha} & \text{αν } x \geq \beta \\ 1 & \text{αν } x < \beta \end{cases} \quad (4.7)$$

όπου  $\beta$  η χαμηλότερη θετική τιμή της μεταβλητής  $X$  και  $\alpha$  θετική παράμετρος. Η παράμετρος  $\beta$  ονομάζεται παράμετρος *κλίμακας* (scale factor) ενώ η παράμετρος  $\alpha$  ονομάζεται παράμετρος *σχήματος* (shape factor) της Pareto κατανομής. Η *αθροιστική συνάρτηση κατανομής* (cumulative distribution function, cdf) μιας μεταβλητής που ακολουθεί την Pareto κατανομή προκύπτει:

$$F_X(x) = \begin{cases} 1 - (x/\beta)^{-\alpha} & \text{αν } x \geq \beta \\ 0 & \text{αν } x < \beta \end{cases} \quad (4.8)$$

**4.3.1.2.2 Περικομμένη Pareto κατανομή** Μια τυχαία μεταβλητή ακολουθεί την περικομμένη (truncated) Pareto κατανομή στο διάστημα  $[\alpha, \beta]$  αν έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function, pdf) της μορφής [30]

$$f(x) = \frac{c \cdot \alpha^c \cdot x^{-(c+1)}}{1 - (\alpha/\beta)^c} \quad (4.9)$$

και αθροιστική συνάρτηση κατανομής της μορφής

$$F(x) = \frac{1 - (\alpha/c)^c}{1 - (\alpha/\beta)^c} \quad (4.10)$$

όπου  $c$  κατάλληλη σταθερά.

### 4.3.2 Στατιστικά μεγέθη κινητικότητας

Τα μοντέλα κινητικότητας χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα στατιστικά μεγέθη που βοηθούν στη μελέτη διαφόρων ερευνητικών θεμάτων στα DTN. Σχετικά παραδείγματα αποτελούν η χωρική κατανομή των κόμβων (spatial node distribution), ο ρυθμός επαφών (contact rate), η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών επαφών<sup>1</sup> για ένα ζεύγος κόμβων (inter-contact time), η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών επαφών ενός κόμβου με οποιοδήποτε άλλο κόμβο του δικτύου (inter-any-contact time), η πιθανότητα σύναψης επαφής ενός κόμβου με οποιοδήποτε άλλο κόμβο του δικτύου (encounter probability), η διάρκεια επαφής (contact duration), η διάρκεια επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων (link duration), η χρονική διάρκεια της κίνησης, το μήκος του διαστήματος κίνησης, η χρονική διάρκεια στάσης των κόμβων κτλ. Ακολουθώς, παρατίθενται οι ορισμοί των βασικών στατιστικών μεγεθών.

**Ορισμός 4.1.** Ως *inter-meeting time* ορίζεται η χρονική διάρκεια που παρεμβάλλεται μεταξύ διαδοχικών επαφών ενός ζεύγους κινούμενων κόμβων.

**Ορισμός 4.2.** Ως *inter-any-meeting time* ορίζεται η χρονική διάρκεια που παρεμβάλλεται μεταξύ διαδοχικών επαφών ενός κινούμενου κόμβου με οποιοδήποτε άλλο κινούμενο κόμβο του δικτύου.

**Ορισμός 4.3.** Ως *inter-hitting time* ορίζεται η χρονική διάρκεια που παρεμβάλλεται μεταξύ διαδοχικών επαφών ενός κινούμενου με ένα ακίνητο κόμβο.

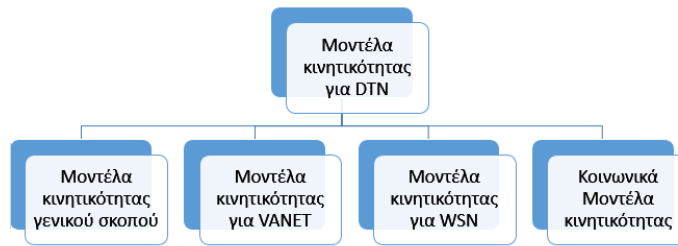
**Ορισμός 4.4.** Ως *inter-any-hitting time* ορίζεται η χρονική διάρκεια που παρεμβάλλεται μεταξύ διαδοχικών επαφών ενός κινούμενου κόμβου με οποιοδήποτε ακίνητο κόμβο του δικτύου.

### 4.3.3 Κατανομές στατιστικών μεγεθών κινητικότητας

Αναφορικά με τη χρονική διάρκεια των επαφών σε DTN δίκτυα, εκτενής βιβλιογραφία έχει επιβεβαιώσει ότι αυτή ακολουθεί την Pareto κατανομή [19,31–33]. Ωστόσο, στα VANET δίκτυα υπάρχουν ενδείξεις ότι, μέχρι ένα χρονικό σημείο, η χρονική διάρκεια επαφών κινούμενων οχημάτων ακολουθεί την εκθετική κατανομή, ενώ, στη συνέχεια, ακολουθεί την Pareto κατανομή [34].

Αντίστοιχα προς το μοντέλο κινητικότητας που ακολουθούν οι κόμβοι, η χρονική διάρκεια στάσης κόμβων σε κάποιο σημείο και η διασπορά των σημείων στάσεων στην περιοχή αναφοράς ακολουθούν συγκεκριμένη κατανομή. Στα τυχαία μοντέλα κινητικότητας, που παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα, η χρονική διάρκεια στάσεων θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη στο διάστημα  $[0, T_{stop}]$  [35–37] ενώ στα μοντέλα κινητικότητας που προσομοιώνουν την ανθρώπινη κίνηση η χρονική διάρκεια στάσεων ακολουθεί power-law κατανομή

<sup>1</sup> Δύο κόμβοι είναι σε επαφή όταν ο ένας βρίσκεται στην εμβέλεια του άλλου



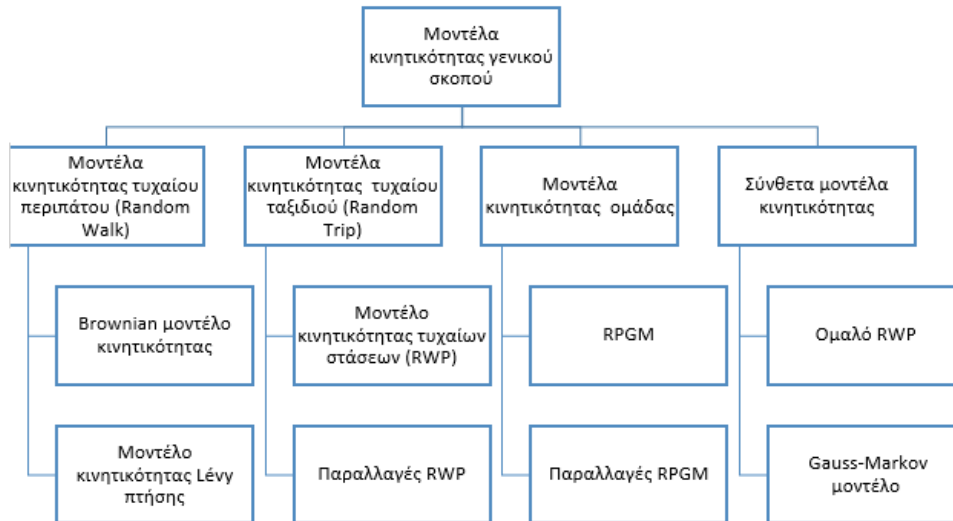
Σχήμα 4.1: Μοντέλα κινητικότητας για DTN δίτυα

(π.χ. Pareto κατανομή) [38]. Ομοίως, η κατανομή των σημείων στάσης στην περιοχή αναφοράς ακολουθεί την ομοιόμορφη κατανομή στα τυχαία μοντέλα κινητικότητας και power-law κατανομή ή την περικομμένη (truncated) Pareto κατανομή στα κοινωνικά μοντέλα κινητικότητας.

Εκτενώς έχουν ερευνηθεί στη βιβλιογραφία τόσο η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών επαφών συγκεκριμένου ζεύγους κόμβων ενός DTN δικτύου όσο και η κατανομή που αυτή ακολουθεί. Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες θεωρούν ότι αυτή ακολουθεί την εκθετική κατανομή μέσω της Poisson διαδικασίας επαφών που υιοθετούν [31, 38–45]. Άλλες, μελετώντας πραγματικά ίχνη ανθρώπινης κίνησης και DTN κόμβων, θεωρούν πως η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών επαφών συγκεκριμένου ζεύγους DTN κόμβων ακολουθεί power-law κατανομή (π.χ. Pareto) [19, 46–48]. Νεότερες προσεγγίσεις συγκλίνουν στο ότι η χρονική αυτή διάρκεια ακολουθεί truncated power-law κατανομή, δηλαδή κατανομή που εμφανίζει power-law χαρακτήρα μέχρι ένα χρονικό σημείο και ακολούθως εκθετική κατανομή [22, 49–52].

#### 4.4 Κατηγοριοποίηση μοντέλων κινητικότητας

Η κατηγοριοποίηση των μοντέλων κινητικότητας αποτελεί ευρύ ερευνητικό θέμα στη βιβλιογραφία. Τα κριτήρια κατηγοριοποίησης ποικίλλουν όπως και οι ερευνητικές προσπάθειες ταξινόμησης των μοντέλων κινητικότητας. Συγκεκριμένα, τα μοντέλα κινητικότητας μπορούν να διακριθούν με βάση (i) το μοντέλο επαφών που ακολουθούν, (ii) τον τύπο DTN δικτύου στο οποίο αναφέρονται, (iii) τον τύπο κίνησης που περιγράφουν και (iv) το πλήθος κόμβων στο οποίο αναφέρονται (μεμονωμένη κίνηση ή κίνηση ομάδας κόμβων). Στο εδάφιο αυτό, γίνεται προσπάθεια περιληπτικής παράθεσης των βασικότερων μοντέλων κινητικότητας με κριτήριο τον τύπο DTN δικτύου [21], [53].



Σχήμα 4.2: Γενικά μοντέλα κινητικότητας

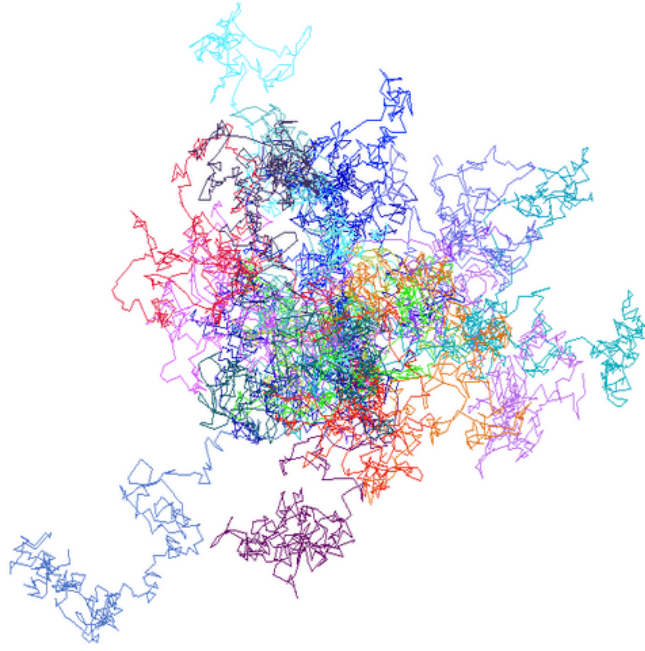
#### 4.4.1 Γενικά μοντέλα κινητικότητας

Τα μοντέλα κινητικότητας αυτού του είδους μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν τόσο για προσομοιώσεις όσο και για θεωρητική ανάλυση. Ωστόσο, δεν αποδίδουν με ακρίβεια την πραγματική κίνηση των κόμβων. Στα μοντέλα κινητικότητας γενικού σκοπού ανήκουν τα τυχαία μοντέλα κινητικότητας και τα μοντέλα κινητικότητας ομάδας.

##### 4.4.1.1 Μοντέλο κινητικότητας τυχαίας διαδρομής (Random Walk)

Τα μοντέλα κινητικότητας τυχαίας διαδρομής (Random Walk, RW) αφορούν την τροχιά κίνησης όπως διαγράφεται από διαδοχικά τυχαία βήματα. Σε αυτά τα μοντέλα, οι κόμβοι κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους. Επομένως, ένα δίκτυο με  $N$  κινούμενους κόμβους περιγράφεται μαθηματικά χρησιμοποιώντας  $N$  ανεξάρτητες και στοχαστικά ισότιμες τυχαίες διαδρομές. Τα RW μοντέλα κίνησης χαρακτηρίζονται από μηδενικούς χρόνους στάσης μεταξύ διαδοχικών διαστημάτων κίνησης, ενώ η ταχύτητα και η διεύθυνση των κόμβων αλλάζει σε κάθε διάστημα. Στην αρχή κάθε διαστήματος, κάθε κόμβος επιλέγει τυχαία και ομοιόμορφα στο διάστημα  $(0, 2\pi)$  τη νέα του διεύθυνση  $\theta(t)$ . Με όμοιο τρόπο, η ταχύτητα των κόμβων ακολουθεί την ομοιόμορφη στο διάστημα  $[0, u_{max}]$  ή τη Gauss κατανομή. Στην περίπτωση όπου ο κόμβος φθάσει το όριο της περιοχής αναφοράς, ο κόμβος ανακλάται πίσω στην περιοχή αναφοράς με γωνία  $\theta(t)$  ή  $\pi - \theta(t)$ . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *διασυνοριακό φαινόμενο* (border effect). Τα RW μοντέλα κίνησης είναι μοντέλα χωρίς μνήμη, υπό την έννοια ότι η πληροφορία σχετικά με την προηγούμενη κατάσταση δεν χρησιμοποιείται για μελλοντικές καταστάσεις. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα και η διεύθυνση σε ένα διάστημα κίνησης είναι ανεξάρτητες από αυτές του προηγούμενου διαστήματος κίνησης [54].

Τα μοντέλα κινητικότητας τυχαίας διαδρομής διακρίνονται σε διακριτά και συνεχή σε



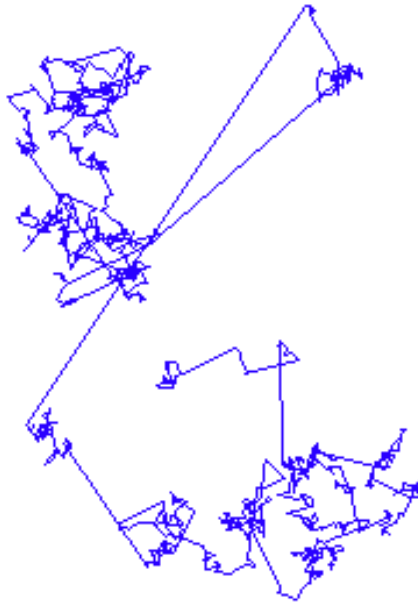
Σχήμα 4.3: Brown μοντέλο κινητικότητας

αντιστοιχία με το αν η περιοχή κίνησης περιλαμβάνει ένα διακριτό σύνολο σημείων στάσης ή αν είναι συνεχής. Στα διακριτά μοντέλα τυχαίας διαδρομής ανήκουν αυτά στα οποία τα σημεία στάσης ορίζουν ένα δισδιάστατο πλέγμα και σε αυτά όπου τα σημεία στάσης με τις διαδρομές προς αυτά ορίζουν ένα γράφο. Τα διακριτά μοντέλα κινητικότητας είναι ισοδύναμα με αλυσίδες Markov διακριτού χρόνου. Οι αλυσίδες Markov διακριτού χρόνου διατυπώνονται μαθηματικά με καταστάσεις που περιγράφουν τις πιθανές θέσεις  $p_i$  του κόμβου από το σύνολο  $R$  των πιθανών θέσεων του και πιθανότητες μετάβασης που ορίζονται ως εξής

$$P(p_i \rightarrow p_j) = \begin{cases} \frac{1}{|N(p_i)|} & \text{αν } p_j \in N(p_i) \\ 0 & \text{άλλως} \end{cases} \quad (4.11)$$

Στα συνεχή μοντέλα τυχαίας διαδρομής ανήκουν το μοντέλο κίνησης Brown (Brownian Motion) και το μοντέλο πτήσης Lévy (Lévy flight). Το μοντέλο κινητικότητας Brown περιγράφει την κίνηση σωματιδίων που αιωρούνται σε υγρό ή αέριο. Η κίνηση Brown μελετήθηκε για πρώτη φορά από τον Robert Brown το 1827, ο οποίος μελέτησε την κίνηση κόκκων γύρης στο νερό. Με μαθηματικούς όρους, η κίνηση Brown μπορεί να περιγραφεί από τη Wiener στοχαστική διαδικασία. Το μοντέλο πτήσης Lévy περιγράφει διαδρομές των οποίων το μήκος κατανέμεται με βάση μια heavy-tail κατανομή πιθανότητας. Συγκεκριμένα, το μήκος των διαδρομών  $y$  ακολουθεί την power-law κατανομή, με

$$y = x^{-\alpha} \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.4: Lévy flight μοντέλο κινητικότητας

όπου  $1 < \alpha < 3$ .

Η βασική διαφορά μεταξύ της κίνησης Brown και του μοντέλου πτήσης Lévy είναι ότι στο μοντέλο πτήσης Lévy μπορούν να συμβούν διαδρομές μεγάλου μήκους, καθιστώντας το μοντέλο αυτό χρήσιμο για τη μαθηματική περιγραφή της κίνησης των ζώων κατά τη διάρκεια κυνηγιού ή τροφοληψίας.

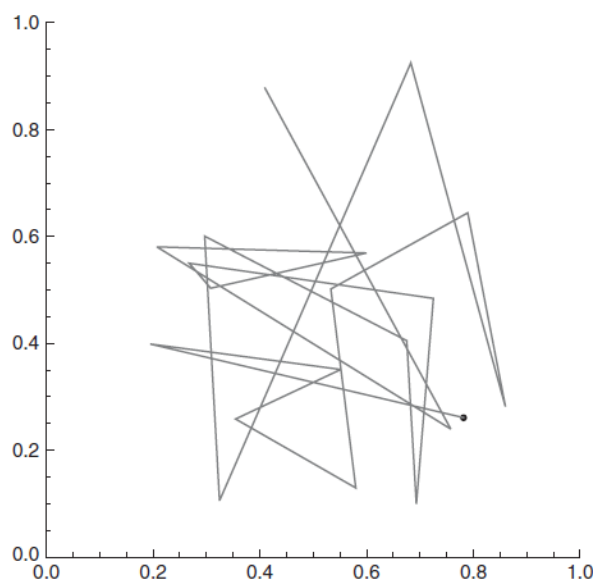
Η μη διατήρηση της πληροφορίας από το προηγούμενο διάστημα σε συνδυασμό με την ταχεία κίνηση, τις τυχαίες αλλαγές κατεύθυνσης, την έλλειψη συγκεκριμένου προορισμού και στάσεων οδηγούν σε μη ρεαλιστική περιγραφή της πραγματικής κίνησης κόμβων ενός δικτύου, καθιστώντας τα RW μοντέλα κινητικότητας μη ακριβή [55].

#### 4.4.1.2 Μοντέλο κινητικότητας με τυχαία σημεία στάσης (Random Waypoint)

Το μοντέλο κινητικότητας με τυχαία σημεία στάσης (Random Waypoint, RWP), που αναπτύχθηκε αρχικά από τους Jason και Maltz (1996) προκειμένου να μελετηθεί η απόδοση του DSR (Dynamic Source Routing) πρωτοκόλλου δρομολόγησης για MANET, θεωρείται ως η πρώτη προσπάθεια να οριστεί ένα απλό μοντέλο κινητικότητας με στόχο τη μαθηματική περιγραφή της εκούσιας ανθρώπινης κίνησης. Το RWP είναι το πλέον διαδεδομένο μοντέλο κινητικότητας και, ως εκ τούτου, αποτελεί προεπιλογή για αρκετούς προσομοιωτές όπως ο Ns2 (Ns2Team 2011), GloMoSim (Ομάδα 2011a), GTNetS (ομάδα 2011b) κ.α.

Το RWP μοντέλο κινητικότητας είναι παρόμοιο με το RW με τη διαφορά ότι το RWP προβλέπει στάσεις μεταξύ διαφορετικών διαστημάτων κίνησης [55]. Σύμφωνα με το RWP [56], η κινητικότητα των κόμβων ενός δικτύου περιγράφεται μαθηματικά χρησιμοποιώντας ανε-





Σχήμα 4.5: Παράδειγμα ενός δύο-διαστάσεων RWP μοντέλου κινητικότητας σε μοναδιαίο τετράγωνο

ξάρτητες στοχαστικές διαδικασίες. Το RWP περιγράφει την κίνηση κινούμενων κόμβων στο εσωτερικό της περιοχής ανάπτυξης ενός δικτύου. Ένας κόμβος επιλέγει τυχαία το σημείο-προορισμό (waypoint) και κινείται ευθύγραμμα προς αυτό με σταθερή ταχύτητα, επιλεγμένη ομοιόμορφα από το διάστημα  $[u_{min}, u_{max}]$ . Αφού ο κόμβος αναμείνει επί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα  $T_p$  (pausing time) στο σημείο-προορισμό, επιλέγει νέο προορισμό και ταχύτητα και επαναλαμβάνει την προαναφερθείσα διαδικασία. Η κίνηση από ένα σημείο-προορισμό σε επόμενο ονομάζεται *μετάβαση* (transition) ή *εποχή κίνησης* (epoch) ή *περίοδος κίνησης* (movement period)  $L$ . Τα σημεία-προορισμοί κατανέμονται ομοιόμορφα στη περιοχή ανάπτυξης του δικτύου. Ένα παράδειγμα του RWP σε περιοχή ανάπτυξης μορφής μοναδιαίου τετραγώνου  $R = [0, 1]^2$  απεικονίζεται στο Σχ. 4.5. Στο σχήμα απεικονίζεται η τροχιά που ακολουθεί ένα κόμβος σε είκοσι βήματα. Ακολουθεί ανάλυση των βασικών μεγεθών του RWP [35, 57, 58].

**4.4.1.2.1 Χωρική κατανομή κόμβων και μήκος μετάβασης** Η χωρική κατανομή κόμβων (spatial node distribution) αφορά τη θέση των κόμβων στην περιοχή ανάπτυξης σε κάθε στιγμή και αποτελεί το πρώτο βασικό χαρακτηριστικό του RWP μοντέλου που μελετήθηκε στη βιβλιογραφία. Με βάση αυτή προκύπτει ο υπολογισμός του μήκους μετάβασης.

**4.4.1.2.1.1 Μήκος μετάβασης σε γραμμική περιοχή ανάπτυξης** Υποθέτοντας τμήμα ευθείας γραμμής  $[0, \alpha]$ , η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της χωρικής κατανομής των

κόμβων είναι:

$$f_L(l) = \begin{cases} -\frac{2}{a} \cdot (1 - \frac{l}{a}) & \text{αν } 0 \leq l \leq a \\ 0 & \text{άλλως} \end{cases} \quad (4.13)$$

όπου  $l$  είναι το άνω όριο της απόστασης δύο σημείων επί του τμήματος της ευθείας.

Το μέσο μήκος μετάβασης  $E[L]$  προκύπτει

$$E[L] = \int_0^a l \cdot f_L(l) dl = \frac{a}{3} \quad (4.14)$$

**4.4.1.2.1.2 Μήκος μετάβασης σε ορθογώνια περιοχή ανάπτυξης** Σε μια ορθογώνια περιοχή ανάπτυξης δικτύου  $a \times b$ ,  $a \geq b$ , η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που προσδιορίζει τη χωρική κατανομή των κόμβων είναι ίση προς:

$$f_L(l) = \frac{4 \cdot l}{a^2 \cdot b^2} \cdot f_0(l) \quad (4.15)$$

όπου

$$f_0(l) = \begin{cases} -\frac{\pi}{2} \cdot a \cdot b - a \cdot l - b \cdot l + \frac{1}{2} \cdot l^2 & \text{αν } 0 \leq l \leq b \\ a \cdot b \cdot \arcsin \frac{b}{l} + a \cdot \sqrt{l^2 - b^2} - \frac{1}{2} \cdot b^2 - a \cdot l & \text{αν } b \leq l \leq a \\ a \cdot b \cdot \arcsin \frac{b}{l} + a \cdot \sqrt{l^2 - b^2} - \frac{1}{2} \cdot b^2 - & \\ a \cdot b \cdot \arccos \frac{a}{l} + b \cdot \sqrt{l^2 - a^2} - \frac{1}{2} \cdot a^2 - \frac{1}{2} \cdot 2 & \text{αν } a \leq l \leq \sqrt{a^2 + b^2} \\ 0 & \text{άλλως} \end{cases} \quad (4.16)$$

Το μέσο μήκος μετάβασης  $E[L]$  προκύπτει:

$$E[L] = \frac{1}{15} \cdot \left[ \frac{a^3}{b^2} + \frac{b^3}{a^2} + \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \left( 3 - \frac{a^2}{b^2} - \frac{b^2}{a^2} \right) \right] + \frac{1}{6} \cdot \left[ \frac{b^2}{a} \cdot \operatorname{arcosh} \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{b} + \frac{a^2}{b} \cdot \operatorname{arcosh} \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a} \right] \quad (4.17)$$

όπου  $\operatorname{arcosh}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$ .

**4.4.1.2.1.3 Μήκος μετάβασης σε κυκλική περιοχή ανάπτυξης** Σε κυκλική περιοχή ανάπτυξης με ακτίνα  $a$ , η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που προσδιορίζει τη χωρική κατανομή τίθεται ίση προς:

$$f_L(l) = \begin{cases} \frac{8}{\pi \cdot a} \cdot \frac{l}{2 \cdot a} \cdot (\arccos(l/(2 \cdot a)) - \frac{l}{2 \cdot a} \sqrt{1 - (l/(2 \cdot a))^2}) & \text{αν } 0 \leq l \leq 2 \cdot a \\ 0 & \text{άλλως} \end{cases} \quad (4.18)$$

Το μέσο μήκος μετάβασης  $E[L]$  προκύπτει:

$$E[L] = \int_0^{2 \cdot a} l \cdot f_L(l) dl = 0.9054 \cdot a \quad (4.19)$$

**4.4.1.2.2 Ταχύτητα κόμβων και μέση διάρκεια κίνησης** Αν η ταχύτητα των κόμβων είναι σταθερή σε όλη τη διάρκεια της κίνησής τους, τότε  $u_i = u = const, \forall i$ . Σε αυτή την περίπτωση, η μέση διάρκεια κίνησης δίνεται από

$$E[T] = \frac{E[L]}{u} \quad (4.20)$$

όπου  $T$  η χρονική διάρκεια της μετάβασης από το ένα σημείο-προορισμό στο επόμενο.

Αν η ταχύτητα των κόμβων είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα  $[u_{min}, u_{max}]$ , η μέση τιμή της είναι ίση προς

$$\bar{u} = \frac{\ln(u_{max}) - \ln(u_{min})}{u_{max} - u_{min}} \quad (4.21)$$

Σε αυτή την περίπτωση, η μέση διάρκεια κίνησης προκύπτει

$$E[T] = \frac{E[L]}{\bar{u}} \quad (4.22)$$

**4.4.1.2.3 Inter-hitting και inter-meeting χρονικές διάρκειες** Με βάση τις [59], [60], η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών επαφών ενός κινούμενου με ένα ακίνητο κόμβο του δικτύου προκύπτει από τη σχέση

$$E[T_{rwp}] = \frac{\iint_U f(x, y) dx dy}{2 \cdot r \cdot A \cdot E[L]} \cdot \left( \frac{E[L]}{\bar{u}} + T_p \right) \quad (4.23)$$

όπου  $f(x, y)$  η χωρική κατανομή των κόμβων,  $A$  το μήκος της πλευράς της επιφάνειας ανάπτυξης,  $r$  η εμβέλεια των κόμβων,  $E[L]$  η μέση απόσταση κίνησης,  $\bar{u}$  η μέση ταχύτητα κίνησης ενός κινούμενου κόμβου και  $T_p$  ο μέσος χρόνος στάσης των κόμβων. Ανάλογα με το σχήμα της περιοχής ανάπτυξης, το αποτέλεσμα του ανωτέρω ολοκληρώματος που εμφανίζεται στην ανωτέρω σχέση διαφέρει.

Η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών επαφών ζεύγους κινούμενων κόμβων του δικτύου προκύπτει από τη σχέση

$$E[M_{rwp}] = \frac{N}{2r[p_m^2 \hat{u}_{rwp} \bar{u} + 2p_m(1 - p_m) \bar{u}]} = \frac{E[T_{rwp}]}{p_m \hat{u}_{rwp} + 2(1 - p_m)} \quad (4.24)$$

όπου  $\hat{u}_{rwp} = 1.75$  και  $p_m = E[T]/(E[T] + T_p)$  η πιθανότητα κάποιος κόμβος να κινείται κατά τη διάρκεια  $E[T] + T_p$ .

**4.4.1.2.4 Ρυθμός επαφών** Βάσει της [39], ο ρυθμός επαφών σε ένα δίκτυο κόμβων που ακολουθούν το RWP μοντέλο κινητικότητας είναι ίση με

$$\lambda_{rwp} = \frac{2wr\bar{u}}{A^2} \quad (4.25)$$

όπου  $w = 1.3683$  σταθερά και  $A^2$  η επιφάνεια της περιοχής ανάπτυξης.

**4.4.1.2.5 Περιορισμοί του RWP** Ακολούθως, παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά που εντοπίζονται στην πραγματική κίνηση κόμβων και τα οποία αδυναμεί να περιγράψει το RWP [54].

- Χρονική εξάρτηση της ταχύτητας: Στο RWP (όπως και σε άλλα τυχαία μοντέλα κίνησης), η ταχύτητα των κόμβων σε κάποιο διάστημα κίνησης είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα των κόμβων στο επόμενο διάστημα κίνησης. Αυτό οδηγεί σε απότομη αλλαγή ταχύτητας, γρήγορη επιτάχυνση, ξαφνική στάση και απότομη αλλαγή πορείας. Ωστόσο, σε σενάρια που εντοπίζονται στην πραγματική κίνηση κόμβων, η επιτάχυνση των κόμβων όπως και η αλλαγή διεύθυνσης γίνονται βαθμιαία και κατά συνέπεια ομαλά.
- Χωρική εξάρτηση της ταχύτητας: Στο RWP (όπως και σε άλλα τυχαία μοντέλα κίνησης) οι κόμβοι κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους. Ωστόσο, η πραγματική κίνηση των κόμβων εμφανίζει συσχέτιση.
- Γεωγραφικοί περιορισμοί κίνησης: Στο RWP και άλλα τυχαία μοντέλα κίνησης οι κόμβοι μπορούν να κινούνται ελεύθερα στην περιοχή προσομοίωσης, χωρίς την παρουσία κάποιου εμποδίου. Ωστόσο, η πραγματική κίνηση ενδέχεται να περιορίζεται από εμπόδια, κτίρια, δρόμους και λεωφόρους.

Οι ανωτέρω λόγοι οδήγησαν τους ερευνητές στην ανάπτυξη νέων μοντέλων κίνησης που πλησιάζουν αποτελεσματικότερα την πραγματική κίνηση των κόμβων.

#### **4.4.1.3 Μοντέλο κινητικότητας τυχαίας διεύθυνσης (Random Direction)**

Το μοντέλο κινητικότητας τυχαίας διεύθυνσης (Random Direction, RD) αναπτύχθηκε με σκοπό την παράκαμψη των κυμάτων πυκνότητας που δημιουργούνται στο μέσο αριθμό γειτόνων του RWP μοντέλου κίνησης. Ως κύμα πυκνότητας θεωρείται η ομαδοποίηση κόμβων σε ένα σημείο της περιοχής προσομοίωσης. Στην περίπτωση του RWP μοντέλου κινητικότητας, η ομαδοποίηση αυτή συμβαίνει στο κέντρο περίπου της περιοχής προσομοίωσης [61]. Βάσει του RD μοντέλου κινητικότητας, αντί να επιλέγουν ένα προορισμό μέσα στην περιοχή προσομοίωσης, οι κόμβοι επιλέγουν μια διεύθυνση κίνησης. Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης κάθε κόμβος επιλέγει μία διεύθυνση κίνησης μεταξύ  $0^\circ$  και  $359^\circ$  και εντοπίζει ένα προορισμό σε αυτή τη διεύθυνση. Στη συνέχεια, επιλέγει ταχύτητα κίνησης και ξεκινά το

ταξίδι του προς τον κόμβο-προορισμό. Όταν φθάσει στον προορισμό, ακινητοποιείται επί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και, έπειτα, επιλέγει νέα διεύθυνση κίνησης. Ομοίως, όταν ο κόμβος φθάσει στο σύνορο της περιοχής αναφοράς, ακινητοποιείται επί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, επιλέγει νέα διεύθυνση κίνησης ως προς τη γραμμή του συνόρου και συνεχίζει την κίνησή του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το RD μοντέλο κίνησης εμφανίζει λιγότερες διακυμάνσεις στην πυκνότητα των κόμβων σε σχέση με το RWP, καθώς οι κόμβοι κατανέμονται ομοιόμορφα στην περιοχή προσομοίωσης [54], [62].

**4.4.1.3.1 Inter-hitting και inter-meeting χρονική διάρκεια** Με βάση τις [59], [60], η χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών επαφών ενός κινούμενου με ένα στατικό κόμβου του δικτύου προκύπτει από τη σχέση

$$E[T_{rd}] = \frac{N}{2 \cdot r \cdot E[L]} \cdot \left( \frac{E[L]}{\bar{u}} + T_p \right) \quad (4.26)$$

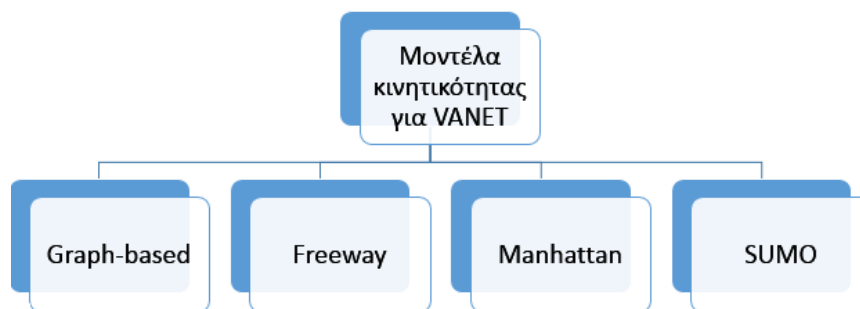
όπου  $N$  το πλήθος των κόμβων του δικτύου,  $r$  η εμβέλεια των κόμβων,  $E[L]$  η μέση απόσταση κίνησης,  $\bar{u}$  η μέση ταχύτητα κίνησης των κόμβων όταν κινούνται και  $T_p$  ο μέσος χρόνος στάσης των κόμβων. Η χρονική διάρκεια μεταξύ διαδοχικών επαφών ζεύγους κινούμενων κόμβων του δικτύου προκύπτει από τη σχέση

$$E[M_{rd}] = \frac{N}{2r(p_m^2 \hat{u}_{rd} \bar{u} + 2p_m(1 - p_m)\bar{u})} = \frac{E[T_{rd}]}{p_m \hat{u}_{rd} + 2(1 - p_m)} \quad (4.27)$$

όπου  $\hat{u}_{rd} = 1.27$  και  $p_m = E[T]/(E[T] + T_p)$  η πιθανότητα κάποιος κόμβος να κινείται κατά τη διάρκεια  $E[T] + T_p$ .

#### 4.4.1.4 Σύνθετα μοντέλα κινητικότητας και μοντέλα κινητικότητας ομάδας

Τα μοντέλα κινητικότητας ομάδας κόμβων αφορούν τη μαθηματική διατύπωση της συσχετισμένης κίνησης των κόμβων που μπορούν να ομαδοποιηθούν με κάποιο κριτήριο. Ρεαλιστικά παραδείγματα αποτελούν ομάδες στρατιωτών που κινούνται σε πεδίο μάχης, ομάδες τουριστών που κινούνται σε ένα μουσείο ή σε μια πόλη κ.α. Μια μεγάλη κατηγορία μοντέλων κινητικότητας ομάδας αποτελεί το RPGM (Reference Point Group Model) [53]. Τα σύνθετα μοντέλα κινητικότητας περιγράφουν κινήσεις κόμβων που είναι χρονικά συσχετισμένες. Παραδείγματα των μοντέλων αυτών αποτελούν το Smooth τυχαίο μοντέλο κίνησης (Smooth Random Mobility Model) και το Gauss-Markov μοντέλο κινητικότητας, που παρουσιάζονται αναλυτικά στις [21], [53]. Η αναλυτική παράθεσή τους εκφεύγει του πλαισίου της παρούσας διατριβής.



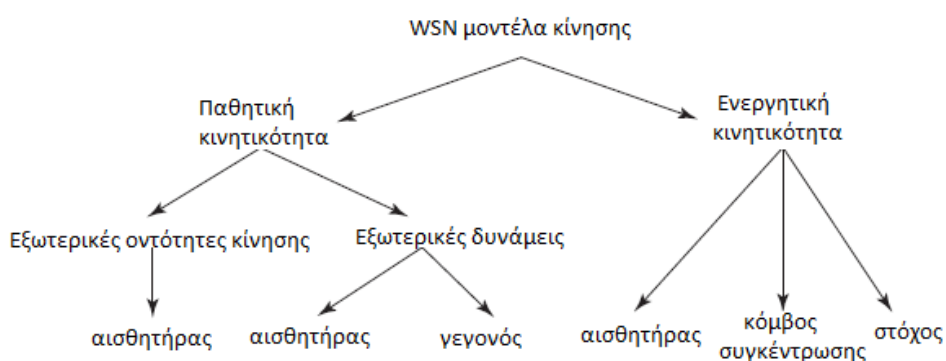
Σχήμα 4.6: Μοντέλα κινητικότητας για VANET

#### 4.4.2 Μοντέλα κινητικότητας για VANET δίκτυα

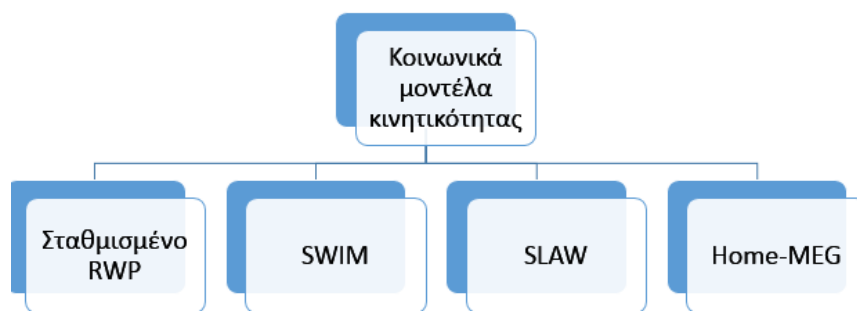
Τα μοντέλα κινητικότητας για VANET αφορούν τη μαθηματική περιγραφή οχημάτων που μεταφέρουν πληροφορία προς μετάδοση σε άλλους κόμβους. Παραδείγματα απλών μοντέλων κινητικότητας για VANET αποτελούν το μοντέλο που βασίζεται σε γράφους (Graph-based mobility model), το οποίο αρχικά αφορούσε τη μαθηματική περιγραφή της κίνησης πεζών, το μοντέλο κινητικότητας αυτοκινητόδρομου που περιγράφει την κίνηση οχημάτων σε αυτοκινητόδρομο (freeway mobility model) και το Manhattan μοντέλο κινητικότητας, που δέχεται ως είσοδο ένα χάρτη με δρόμους για τη μαθηματική περιγραφή της κίνησης οχημάτων σε αυτόν. Ένα περισσότερο σύνθετο μοντέλο κινητικότητας αποτελεί το SUMO μοντέλο κινητικότητας (Simulation of Urban MObility) (Ομάδα 2011a). Το πακέτο προσομοίωσης του SUMO είναι ανοικτού κώδικα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί δωρεάν [53].

#### 4.4.3 Μοντέλα κινητικότητας για WSN δίκτυα

Τα μοντέλα κινητικότητας που έχουν αναπτυχθεί για τα WSN μπορούν να διακριθούν σε παθητικά (passive) και ενεργητικά (active). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες που δεν μπορούν να λάβουν αποφάσεις κίνησης ανεξάρτητα ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι κόμβοι οι οποίοι δρουν ανεξάρτητα και μπορούν να λάβουν αποφάσεις κίνησης. Τα



Σχήμα 4.7: Μοντέλα κινητικότητας WSN



Σχήμα 4.8: Κοινωνικά μοντέλα κινητικότητας

παθητικά μοντέλα κινητικότητας εφαρμόζονται κυρίως σε WSN όπου η κίνηση των αισθητήρων επιβάλλεται από κάποιο εξωτερικό παράγοντα. Στην κατηγορία παθητικών μοντέλων κινητικότητας διακρίνονται δύο υποκατηγορίες. Η πρώτη αφορά αισθητήρες που προσαρτώνται σε οντότητες, όπως άνθρωποι, ζώα, κινούμενα οχήματα κτλ. Στην περίπτωση αυτή, η κίνηση των αισθητήρων ταυτίζεται με αυτή των οντοτήτων. Παραδείγματα παθητικών μοντέλων κινητικότητας αυτής της υποκατηγορίας αποτελούν το Zebrant [5], το Whale [63] κ.α. Η δεύτερη υποκατηγορία παθητικών μοντέλων κινητικότητας αφορά αισθητήρες που κινούνται ελεύθερα υπό την επίρεια εξωτερικών δυνάμεων (π.χ. άνεμος, κυματισμοί ωκεανών κτλ). Στην περίπτωση αυτή, η κινητικότητα των αισθητήρων μπορεί να περιγραφεί μέσω της μαθηματικής διατύπωσης της εξωτερικής δύναμης και της επίδρασης αυτής στους αισθητήρες. Τα ενεργητικά μοντέλα κινητικότητας αφορούν δίκτυα όπου οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν τη χρονική στιγμή, τη ταχύτητα και τη διεύθυνση της κίνησής τους με βάση το στόχο που έχουν να επιτύχουν (βελτίωση της γεωγραφικής κάλυψης, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, παρακολούθηση στόχου κτλ). Αυτά τα μοντέλα κινητικότητας εντάσσονται στην ευρύτερη κατηγορία της ελεγχόμενης κίνησης που μελετάται σε επόμενη παράγραφο.

#### 4.4.4 Μοντέλα κινητικότητας για ευκαιριακά δίκτυα

Σε αντίθεση με τα μοντέλα κινητικότητας τυχαίας διαδρομής, τα οποία δεν επιτυγχάνουν την ακριβή μαθηματική περιγραφή της πραγματικής κίνησης των κόμβων σε ένα δίκτυο, οι ερευνητές έχουν στραφεί στη διατύπωση μοντέλων που περιγράφουν την πραγματική κίνηση των κόμβων. Οι προσπάθειες αυτές είναι αρκετά χρήσιμες για τη μελέτη ευκαιριακών δικτύων που εμφανίζουν κοινωνική συμπεριφορά, όπου η κίνηση των κόμβων παρουσιάζει χρονική και χωρική συσχέτιση. Σε αυτή την κατηγορία δικτύων ανήκουν τα δίκτυα τσέπης PSN (βλ. Κεφ. 2) αποτελούμενα από κόμβους-ανθρώπους που φέρουν φορητές συσκευές επικοινωνίας, όπως έξυπνα κινητά, ταμπλέτες, PDA, φορητούς υπολογιστές κτλ. Η περιγραφή της κίνησης των συσκευών επικοινωνίας ισοδυναμεί με τη περιγραφή της κίνησης των ανθρώπων που τις φέρουν, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η περιγραφή των χαρα-

κτηριστικών της ανθρώπινης κίνησης.

#### 4.4.4.1 Χαρακτηριστικά ανθρώπινης κίνησης

Καθημερινά, οι άνθρωποι συμμετέχουν σε μεγάλο αριθμό δραστηριοτήτων, όπως ηλεκτρονική επικοινωνία (αποστολή email, τηλεφωνικές κλήσεις), περιήγηση στο Διαδίκτυο, οικονομικές συναλλαγές ή ψυχαγωγικές και αθλητικές δραστηριότητες. Δεδομένου του πλήθους των παραγόντων που προσδιορίζουν τη χρονική στιγμή κάθε δραστηριότητας, όπως οι επαγγελματικές υποχρεώσεις, ο ύπνος ή η διαθεσιμότητα των πόρων, είναι σχεδόν αδύνατο να προβλεφθεί η ανθρώπινη κίνηση, πέρα από δραστηριότητες που εμφανίζουν περιοδικότητα. Ωστόσο, είναι γεγονός ότι η ανθρώπινη κίνηση εμφανίζει στιγμές εκρηκτικής δραστηριότητας όπως και μακρές περιόδους αδράνειας [64]. Αυτό υποδηλώνει ότι η ανθρώπινη κίνηση εμφανίζει χωρικές και χρονικές εξαρτήσεις.

Ακολουθώς, παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά της ανθρώπινης κίνησης [65], [66]:

- Χωρικά χαρακτηριστικά: Οι άνθρωποι τείνουν να διανύουν μικρές αποστάσεις συχνότερα σε σύγκριση με μεγάλες [67], σχηματίζοντας μικρές ομάδες γειτονικών σημείων επίσκεψης [66].
- Χρονικά χαρακτηριστικά: Οι άνθρωποι τείνουν να πραγματοποιούν περιοδικές επισκέψεις σε συγκεκριμένα μέρη λόγω επαναλαμβανόμενων δραστηριοτήτων. Επιπλέον, οι άνθρωποι τείνουν να επισκέπτονται συχνότερα τα περισσότερο δημοφιλή σημεία όπως και μέρη που έχουν ήδη επισκεφθεί. Στην πρώτη περίπτωση, η συχνότητα με την οποία κάποιος άνθρωπος επισκέπτεται το  $k$  συχνότερο σημείο επίσκεψής του,  $f_k$ , ακολουθεί το νόμο του Zipf (Zipf's law) [68], δηλαδή  $f_k \sim k^{-\zeta}$ , με παράμετρο  $\zeta \approx 1.2 \pm 0.1$ . Αυτό υποδηλώνει, επίσης, ότι η πιθανότητα ένας άνθρωπος να επισκεφθεί ένα σημείο με συχνότητα  $f$  (συχνότητα επισκεψιμότητας) ακολουθεί την  $P(f) \sim f^{-(1+1/\zeta)}$  [65], [69]-[70].
- Χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας: Οι άνθρωποι τείνουν να επισκέπτονται μέρη στα οποία συχνάζουν κοντινοί τους άνθρωποι [65], [71].

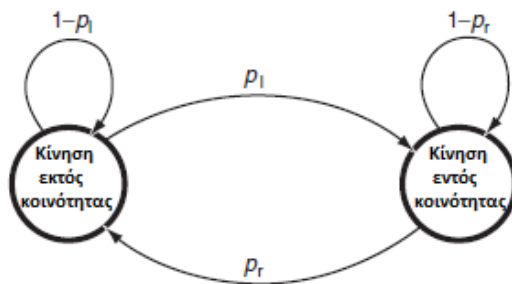
Αναλυτικότερη περιγραφή των ανθρώπινων κινητικών συνηθειών παρουσιάζεται στο [72].

#### 4.4.4.2 Σταθμισμένο RWP μοντέλο κινητικότητας

Το σταθμισμένο (weighted) RWP μοντέλο κινητικότητας [73] επικεντρώνεται στην περιγραφή της κινητικότητας πεζών ανθρώπων σε μια πανεπιστημιούπολη. Οι βασικές αρχές του μοντέλου αυτού είναι οι ακόλουθες:

- Η επιλογή του επόμενου κόμβου-προορισμού εξαρτάται από τη δημοτικότητά του: Όσο περισσότερο δημοφιλής είναι ένας προορισμός τόσο πιθανότερη είναι η επιλογή του στο επόμενο διάστημα κίνησης.





Σχήμα 4.9: Αλυσίδα Markov δύο καταστάσεων για το χρονικά μεταβαλλόμενο μοντέλο κινητικότητας

- Η δημοφιλία των σημείων στάσης είναι χρονικά μεταβαλλόμενη: κάποια σημεία στάσης είναι δημοφιλέστερα το πρωί, άλλα είναι δημοφιλέστερα κατά τη διάρκεια του μεσημβρινού γεύματος κτλ.
- Η διάρκεια της στάσης σε κάθε κόμβο-προορισμό είναι διαφορετική. Για παράδειγμα, η διάρκεια στάσης σε αίθουσες διδασκαλίας, τείνει να συμπίπτει με τη διάρκεια διδασκαλίας σε αντίθεση με τη διάρκεια στάσης σε καφετέριες που είναι περισσότερο κατανομημένη στη διάρκεια της ημέρας.

Καίτοι το σταθμισμένο RWP μοντέλο περιγράφει μαθηματικά κάποια από τα στοιχεία της ανθρώπινης κίνησης, εξακολουθεί μέσω της στοχαστικής διαδικασίας του RWP, να αντιμετωπίζει κάθε κόμβο χωρίς διακρίσεις. Η πανομοιότυπη αντιμετώπιση των κόμβων δεν ανταποκρίνεται σε πραγματική κίνηση, όπου διαφορετικοί κόμβοι ακολουθούν διαφορετικές στοχαστικές διαδικασίες κίνησης.

#### 4.4.4.3 Το χρονικά μεταβαλλόμενο μοντέλο κινητικότητας κοινότητας

Το χρονικά μεταβαλλόμενο μοντέλο κινητικότητας κοινότητας (time-variant community mobility model) [73] αναπτύχθηκε προκειμένου να περιγράψει μαθηματικά μεμονωμένες κινητικές ετερογενείς συνήθειες. Επίσης, το μοντέλο είναι σχεδιασμένο να περιγράψει μαθηματικά και άλλα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης κίνησης, όπως την power-law κατανομή των σημείων στάσης/προορισμού, τις χρονικά μεταβαλλόμενες κινητικές συνήθειες και την περιοδικότητα στην επίσκεψη των κόμβων στα ίδια μέρη.

Προκειμένου να περιγράψει μαθηματικά η self-similar κατανομή των σημείων επίσκεψης, το μοντέλο χρονικά μεταβλητής κινητικότητας αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο μια υποπεριοχή της περιοχής ανάπτυξης που ονομάζεται *κοινότητα*. Κάθε κόμβος τείνει να επισκέπτεται την κοινότητα του συχνότερα σε σχέση με άλλες περιοχές. Επίσης, η έννοια της κοινότητας είναι χρήσιμη για τη μαθηματική προσέγγιση της ετερογένειας των κινητικών συνθηκών των κόμβων: εφόσον οι κοινότητες επιλέγονται τυχαία και, γενικότερα, είναι διαφορετικές

για διαφορετικούς κόμβους, οι κόμβοι εμφανίζουν διαφορετικές μεταξύ τους στοχαστικές κινητικές συμπεριφορές.

Η μαθηματική περιγραφή των περιοδικών εμφανίσεων των κόμβων σε συγκεκριμένα σημεία της περιοχής ανάπτυξης υλοποιείται από το μοντέλο χρονικά μεταβλητής κινητικότητας με τη διάκριση του χρόνου σε δύο φάσεις, την κανονική περίοδο και την περίοδο συγκέντρωσης. Κατά τη διάρκεια της περιόδου συγκέντρωσης, οι κόμβοι τείνουν να κινούνται κοντά στην κοινότητα τους, χαρακτηριστικό που φανερώνει ότι οι κόμβοι επισκέπτονται την κοινότητά τους περιοδικά.

Η μαθηματική περιγραφή του μοντέλου χρονικά μεταβλητής κινητικότητας μπορεί να γίνει με τη χρήση μιας αλυσίδας Markov δύο καταστάσεων, με  $p_l$  την πιθανότητα μετάβασης στην κατάσταση της “κίνησης εντός κοινότητας” και  $p_r$  την πιθανότητα μετάβασης στην κατάσταση της “κίνησης εκτός κοινότητας” (βλ. Σχ. 4.9).

#### 4.4.4.4 Το περικομμένο Levy-Walk μοντέλο κινητικότητας

Το περικομμένο (truncated) Levy-Walk μοντέλο κινητικότητας (TLW) [74]- [75] βασίζεται σε πραγματικά ίχνη GPS τα οποία έχουν συλλεχθεί από πέντε περιοχές ανάπτυξης, δηλαδή, δύο πανεπιστημιούπολεις, τον κόσμο της Disney, μια δημόσια υπηρεσία και ένα μετρό πόλης. Αρχικά, οι κινητοί κόμβοι είναι διασπαρμένοι τυχαία στην περιοχή ανάπτυξης. Έπειτα, κάθε κόμβος μεταβαίνει σε κόμβους-προορισμούς σε τυχαίες κατευθύνσεις, με τις μεταβάσεις να ακολουθούν power-law κατανομή. Στον κόμβο-προορισμό οι κόμβοι ακινητοποιούνται για κάποιο χρονικό διάστημα, το οποίο ακολουθεί επίσης power-law κατανομή. Ενώ το TLW μοντέλο κινητικότητας περιγράφει κίνηση όπου οι χρόνοι μεταξύ δύο διαδοχικών επαφών, η απόσταση της κίνησης και η χρονική διάρκεια της στάσης ακολουθούν την περικομμένη power-law κατανομή, δεν επιτυγχάνει να περιγράψει την κίνηση που ανακύπτει σε πραγματικά δίκτυα, καθώς τα σημεία στάσης είναι κατανεμημένα στην περιοχή ανάπτυξης κατά τυχαίο τρόπο. Σύμφωνα με το TLW μοντέλο κινητικότητας, η μέση απόσταση κίνησης  $\delta t_f$  και η μέση χρονική διάρκεια στάσης  $\delta t_p$  δίνονται από:

$$\delta t_f = \begin{cases} \frac{\ln f_{max} - \ln f_{min}}{f_{min}^{-1} - f_{max}^{-1}} & \text{αν } \alpha = 1 \\ \frac{\alpha}{\alpha - 1} \cdot \frac{f_{min}^{1-\alpha} - f_{max}^{1-\alpha}}{f_{min}^{-\alpha} - f_{max}^{-\alpha}} & \text{άλλως} \end{cases} \quad (4.28)$$

$$\delta t_p = \begin{cases} \frac{\ln p_{max} - \ln p_{min}}{p_{min}^{-1} - p_{max}^{-1}} & \text{αν } \beta = 1 \\ \frac{\beta}{\beta - 1} \cdot \frac{p_{min}^{1-\beta} - p_{max}^{1-\beta}}{p_{min}^{-\beta} - p_{max}^{-\beta}} & \text{άλλως} \end{cases} \quad (4.29)$$

όπου  $\alpha$  και  $\beta$  είναι οι παράμετροι της περιορισμένης Pareto κατανομής του μήκους της απόστασης κίνησης και της χρονικής διάρκειας στάσης, αντίστοιχα,  $f_{min}$  και  $f_{max}$  η ελάχιστη και η μέγιστη διανυόμενη απόσταση κίνησης, αντίστοιχα, και  $p_{min}$  και  $p_{max}$  η ελάχιστη και η μέγιστη χρονική διάρκεια στάσης, αντίστοιχα.

#### 4.4.4.5 Το SWIM μοντέλο κινητικότητας

Το SWIM (Small World In Motion) μοντέλο κινητικότητας [76], [77] βασίζεται στις εξής αρχές: οι άνθρωποι-κόμβοι τείνουν να επισκέπτονται συχνότερα μέρη κοντινά στην κατοικία τους καθώς, επίσης, και μέρη όπου μπορούν να συναντήσουν αρκετούς ανθρώπους. Οι φάσεις που ακολουθεί το SWIM μοντέλο είναι τα ακόλουθα:

- Φάση έναρξης: Η περιοχή ανάπτυξης χωρίζεται σε τετράγωνα υποπεριοχές πλευράς  $r/\sqrt{2}$ , όπου  $r$  η εμβέλεια των κόμβων. Κατά τη φάση έναρξης καθορίζονται οι περιοχές κατοικίας και οι δημοφιλείς περιοχές του δικτύου. Κάθε κόμβος επιλέγει τυχαία την περιοχή κατοικίας και μέσα στην περιοχή αυτή τη θέση του.
- Επιλογή προορισμού: Ο προορισμός υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη δημοφιλία και την εγγύτητα προς το τρέχον σημείο στάσης. Συγκεκριμένα, η επιλογή στηρίζεται στη σταθμισμένη συνάρτηση:

$$w(C_{i,j}) = \alpha \cdot dist(pos(u), C_{i,j}) + (1 - \alpha) \cdot seen(C_{i,j}) \quad (4.30)$$

όπου  $dist(pos(u), C_{i,j})$  είναι μια συνάρτηση που φθίνει πολυωνμικά με την απόσταση μεταξύ της τρέχουσας περιοχής και του υποψήφιου προορισμού και  $seen(C_{i,j})$  είναι το πλήθος των κόμβων που συνάντησε ο κόμβος την τελευταία φορά που επισκέφθηκε τον κόμβο  $C_{i,j}$  και  $\alpha$  μια σταθερά με τιμές στο διάστημα  $[0, 1]$ .

- Επιλογή χρόνου στάσης: Η χρονική διάρκεια της στάσης σε συγκεκριμένο προορισμό ακολουθεί την power-law κατανομή με κλίση 1.45 και άνω όριο τις τέσσερις (4) ώρες.
- Φάση κίνησης: Πριν την εκκίνηση του επόμενου διαστήματος κίνησης, ο κόμβος καθορίζει την ταχύτητα κίνησής του, γνωρίζοντας τη χρονική διάρκεια  $k$  και την απόσταση  $d$  που διανύεται, μέσω του τύπου  $d/k$ . Ο κόμβος εκκινεί την κίνησή του σε ευθεία πορεία προς τον προορισμό.

Από την ανωτέρω ανάλυση γίνεται φανερό ότι η τιμή του  $\alpha$  έχει επίδραση στο μοντέλο κινητικότητας, ρυθμίζοντας αντίστοιχα τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της εγγύτητας και της δημοφιλίας του υποψήφιου επόμενου κόμβου-προορισμού. Το SWIM μοντέλο κίνησης επιτυγχάνει τόσο τη μαθηματική όσο και την πειραματική απόδειξη ότι ο χρόνος που παρεμβάλλεται μεταξύ διαδοχικών επαφών ακολουθεί την περικομμένη power-law κατανομή [77].

#### 4.4.4.6 Το SLAW μοντέλο κινητικότητας

Το SLAW (Self-Similar Least-Action Human Walk) [27] μοντέλο κινητικότητας επιδιώκει την προσομοίωση της ανθρώπινης κίνησης επιτυγχάνοντας τη μαθηματική περιγραφή με βάση τα πέντε χαρακτηριστικά που ακολουθούν:

- Το διάστημα κίνησης και η χρονική διάρκεια στάσης ακολουθούν heavy-tail κατανομή. Συγκεκριμένα, ο χρόνος παύσης ακολουθεί την περικομμένη power-law κατανομή.
- Οι περιοχές κινητικότητας των κόμβων είναι ετερογενώς οριοθετημένες. Οι κόμβοι που ανήκουν σε κοινωνικά δίκτυα συνηθίζουν να κινούνται σε μικρές αποστάσεις από τις γνωστές σε αυτούς περιοχές.
- Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών επαφών ακολουθεί την περικομμένη power-law κατανομή.
- Τα σημεία στάσης-προορισμού είναι αυτο-ομοιόμορφα διασπαρμένα στην περιοχή ανάπτυξης (self-similarity).
- Οι κόμβοι που ανήκουν σε κοινωνικά δίκτυα είναι πιθανότερο να μεταβούν σε προορισμούς που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από την τρέχουσα θέση στάσης, όταν επισκέπτονται πολλούς προορισμούς σε διαδοχή (Least-Action Trip Planning, LATP).

Κατά τη χρήση του SLAW μοντέλου κινητικότητας σε προσομοιώσεις απαιτείται ο ορισμός της Hurst παραμέτρου που καθορίζει την αυτο-ομοιομορφία των σημείων στάσης στην περιοχή προσομοίωσης, ο συντελεστής βαρύτητας που χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο LATP για τον προσδιορισμό του επόμενου κόμβου βάσει της απόστασης από την τρέχουσα θέση του κόμβου όταν ο κόμβος έχει στη διάθεση του πολλούς προορισμούς, η επιφάνεια της περιοχής ανάπτυξης και το πλήθος των κόμβων. Η Hurst παράμετρος λαμβάνει τιμές  $1/2 < H < 1$ , διάστημα το οποίο επιβεβαιώνει την αυτο-ομοιόμορφη διασπορά των σημείων στάσης στο χώρο.

#### 4.4.4.7 SMOOTH μοντέλο κινητικότητας

Το SMOOTH μοντέλο κινητικότητας [78] επιδιώκει την περιγραφή της ανθρώπινης κίνησης επιτυγχάνοντας τη μαθηματική περιγραφή οκτώ χαρακτηριστικών:

- Το χρονικό διάστημα κίνησης ακολουθεί την περικομμένη power-law κατανομή.
- Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών επαφών του ίδιου ζευγους κόμβων ακολουθεί την truncated power-law κατανομή.
- Το χρονικό διάστημα στάσης των κόμβων μεταξύ διαστημάτων κίνησης ακολουθεί την truncated power-law κατανομή.
- Οι κόμβοι του δικτύου επισκέπτονται συχνότερα τους δημοφιλείς προορισμούς.
- Κατά τη διάρκεια της κίνησής τους, οι κόμβοι τείνουν να επιλέγουν τους πλησιέστερους προορισμούς.

- Η διασπορά των κόμβων στην περιοχή ανάπτυξης δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη.
- Κόμβοι με κοινά ενδιαφέροντα σχηματίζουν κοινότητες και τείνουν να κινούνται σε κοντινή απόσταση από αυτές.
- Η διασπορά των σημείων στάσης στην επιφάνεια ανάπτυξης κατανέμεται αυτο-ομοιόμορφα.

Το SMOOTH μοντέλο κινητικότητας δημιουργεί κοινότητες με διαφορετικά επίπεδα δημοφιλίας. Ένας κόμβος που ακολουθεί το SMOOTH μοντέλο επισκέπτεται με μεγαλύτερη πιθανότητα τις δημοφιλέστερες κοινότητες και, συνεπώς, συναντά κάποια ομάδα κόμβων συχνότερα σε σχέση με άλλες. Επίσης, ένας κόμβος δεν κινείται τυχαία γύρω από την περιοχή ανάπτυξης. Αντιθέτως, κατά τη διάρκεια της κίνησης, ένας κόμβος είναι πιθανότερο να επισκεφθεί πλησιέστερες περιοχές.

#### 4.4.4.8 Περισσότερα μοντέλα κινητικότητας

Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας παρουσιάστηκαν τα βασικά μοντέλα κινητικότητας για ευκαιριακά δίκτυα. Ωστόσο, η βιβλιογραφία είναι αρκετά εκτενής στο συγκεκριμένο θέμα. Παραδείγματα άλλων μοντέλων κινητικότητας που προσομοιώνουν κίνηση με κάποια από τα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης κίνησης είναι το μοντέλο κινητικότητας κοινότητας (Community mobility model, CMM) [79], το Working Day μοντέλο κινητικότητας [80], το HCMM (Home-cell community mobility model) [71], το GeSoMo [81], το STEP [82], το COBRA [24], το Home-MEG (Home-Markovian Evolving Graph) [83], κ.α.

## 4.5 Ελεγχόμενη κινητικότητα

Στις προηγούμενες παραγράφους τονίστηκε η σημασία της κινητικότητας των κόμβων για τη μετάδοση πληροφορίας και παρουσιάστηκαν τα σημαντικότερα μοντέλα κινητικότητας που χρησιμοποιούνται στα DTN δίκτυα. Η υιοθέτηση από τους κόμβους ενός συγκεκριμένου μοντέλου κινητικότητας ερμηνεύεται ως τήρηση των προδιαγραφών του χωρίς παρέκκλιση. Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες έχουν επιχειρήσει να αξιοποιήσουν το υιοθετημένο μοντέλο κινητικότητας των κόμβων με στόχο τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης πληροφορίας [5, 63, 84–86]. Ωστόσο, η υιοθέτηση συγκεκριμένου μοντέλου κινητικότητας σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα με αυτόνομους κόμβους συνεπάγεται αρκετές φορές τη μη αξιοποίηση του συνόλου των οφελών που προσφέρει η δυνατότητα κίνησης των κόμβων.

Στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα με *ελεγχόμενη κινητικότητα* (controlled mobility), η κατάλληλη ρύθμιση της κίνησης των κόμβων ενισχύει την προσαρμοστικότητά τους στις δυναμικές αλλαγές της τοπολογίας, παρέχοντας τη δυνατότητα να ικανοποιηθούν συγκεκριμέ-

νες δικτυακές απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης και ανοχής σε σφάλματα μετάδοσης. Η ελεγχόμενη κινητικότητα αποτελεί ενεργή ερευνητική περιοχή στη ρομποτική, όπου, μέσω της κίνησής τους, οι κόμβοι επιτυγχάνουν την αυτοματοποιημένη προσαρμογή τους στις εκάστοτε απαιτήσεις. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, όπου οι κόμβοι καλούνται να ακολουθήσουν χωρίς παρέκκλιση τα υιοθετημένα πρωτόκολλα κίνησης, η ρύθμιση των κινητικών μοτίβων των κόμβων μπορεί να ωφελήσει την απόδοση του δικτύου στο οποίο ανήκουν, βελτιώνοντας την κατανάλωση ενέργειας, την κάλυψη του δικτύου, τη συνδεσιμότητα των κόμβων, την εξερεύνηση της περιοχής ανάπτυξης και τον εντοπισμό στόχου, την εξισορρόπηση φορτίου, το ρυθμό παράδοσης της πληροφορίας, την από άκρο-σε άκρο καθυστέρηση στο δίκτυο [87].

Στο πλαίσιο της ελεγχόμενης κινητικότητας, η [34] προτείνει ένα σχήμα στο οποίο αυτόνομοι κόμβοι αλλάζουν δυναμικά την τροχιά της κίνησής τους προκειμένου να ανταλλάξουν πληροφορία με τους υπόλοιπους κόμβους. Η [88] δείχνει ότι, ελέγχοντας την κίνηση των κόμβων, μπορεί να διευρυνθεί η κάλυψη δικτύου ενώ η [89] προτείνει ένα αυτο-προσαρμοζόμενο σχήμα στο οποίο οι κόμβοι καλούνται να λάβουν αυτόνομες αποφάσεις κίνησης προκειμένου να βρεθούν σε θέση τέτοια ώστε η συνολική κατανάλωση ενέργειας για μετάδοση πληροφορίας να ελαχιστοποιηθεί ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η συνδεσιμότητα των κόμβων. Στην [90] παρουσιάζεται μια ρομποτική πλατφόρμα που λειτουργεί ως κινητός κόμβος σε ένα δίκτυο κινητών αισθητήρων και διαπιστώνονται τα οφέλη της ενεργοποίησης της ελεγχόμενης κινητικότητας. Στις [91], [92] μελετάται το πρόβλημα επιλογής της διαδρομής ενός κινητού κόμβου που συλλέγει πληροφορία (data mule) κινούμενο με σταθερή ταχύτητα σε περιοχή ανάπτυξης όπου αισθητήρες παράγουν δεδομένα σε δεδομένο ρυθμό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, απαιτείται ο κινητός κόμβος να διέλθει από την ακριβή θέση κάθε αισθητήρα και να συλλέξει τα δεδομένα. Στο Message Ferrying έργο [93] εξετάστηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης της διαδρομής και της ταχύτητας ενός κινητού κόμβου συλλογής πληροφορίας σε περιοχή που περιλαμβάνει στατικούς κόμβους. Το έργο επεκτάθηκε ώστε να συμπεριλάβει κινητικά ελεγχόμενους κόμβους [94], την περίπτωση ύπαρξης πολλαπλών κινητών κόμβων συλλογής [95] και τυχαίων κινητών κόμβων στο δίκτυο [96]. Στο πλαίσιο της ελεγχόμενης κινητικότητας, υπάρχουν, επίσης, προσπάθειες συνδυασμού ύπαρξης κινητών κόμβων συλλογής πληροφορίας σε ένα DTN δίκτυο όπου εφαρμόζεται σενάριο προώθησης πληροφορίας πολλαπλών βημάτων [97]. Η [98] δείχνει ότι η ελεγχόμενη κινητικότητα βελτιώνει τη δρομολόγηση σε δίκτυα με κινητούς κόμβους. Στην [99] μελετήθηκε η περίπτωση ελέγχου της ταχύτητας κινητού κόμβου συλλογής πληροφορίας που κινείται περιοδικά στο εσωτερικό μιας περιοχής αισθητήρων επί σταθερής διαδρομής. Η ερευνητική προσπάθεια [100] ρυθμίζει την κίνηση αισθητήρων ώστε να μη δημιουργούνται κενά κάλυψης στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας Voronoi διαγράμματα για την απεικόνιση της εγγύτητας/γεινιάσης των κόμβων. Η εργασία [101] προτείνει την κατάλληλη μέσω κινητικότητας ρύθμιση της θέσης των κόμβων προκειμένου να εξουρευθεί η βέλτιστη διαδρομή από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμό και να ελαχιστοποιηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας λόγω μετάδοσης. Σε άλλες πε-

ριπτώσεις, τα προτεινόμενα σχήματα προσαρμόζουν μέσω της ελεγχόμενης κινητικότητας τη λειτουργία τους σε αλλαγές της χωρητικότητας ή του όγκου της διακινούμενης πληροφορίας [102].

Νεότερες ερευνητικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν την ελεγχόμενη κινητικότητα των κόμβων [103] είτε επεκτείνοντας τα προηγούμενα σχήματα είτε εφαρμόζοντάς τα σε άλλους τύπους δικτύων, όπως τα DTN [104]. Στην [105] παρουσιάζεται το πρωτόκολλο δρομολόγησης CoMNet ως ένας τοπικός μηχανισμός που τροποποιεί κατάλληλα τη δικτυακή τοπολογία προκειμένου να βελτιώσει την κατανάλωση ενέργειας λόγω δρομολόγησης διασφαλίζοντας τη συνδεσιμότητα των κόμβων του δικτύου. Το CoMNet αποτελεί το πρώτο πρωτόκολλο δρομολόγησης που λαμβάνει υπόψη την κατανάλωση ενέργειας λόγω της φυσικής κίνησης των κόμβων. Η [106] βασίζεται στην ιδέα του CoMNet, τροποποιώντας ελαφρώς το κριτήριο δρομολόγησης. Τέλος, στην [107] παρουσιάζεται ένα σχήμα εντοπισμού στόχου σε δίκτυα αισθητήρων με χρήση της ελεγχόμενης κινητικότητας.





## Κεφάλαιο 5

# Κωδικοποίηση δικτύου σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα

### 5.1 Εισαγωγή

Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης στα DTN ασχολούνται με τη δρομολόγηση την πληροφορία από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμό μέσω ενδιάμεσων κόμβων, οι οποίοι προωθούν τα δεδομένα στη διαδρομή προς τον κόμβο-προορισμό χωρίς να τα επεξεργάζονται. Αντιθέτως, η τεχνική κωδικοποίησης δικτύου (Network Coding, NC) (βλ. Ενότητα 2.6) βασίζεται στη δυνατότητα των ενδιάμεσων κόμβων να επεξεργάζονται τα εκάστοτε προς δρομολόγηση πακέτα και να προωθούν συνδυασμό τους στον επόμενο κόμβο της διαδρομής προς τον κόμβο-προορισμό. Συγκεκριμένα, όταν χρησιμοποιείται η γραμμική NC τεχνική (Random Linear Network Coding, RLNC) χρησιμοποιείται, τα πακέτα συνδυάζονται γραμμικά πριν την αποστολή τους. Αν και, αρχικά, η τεχνική NC προοριζόταν για ενσύρματα δίκτυα [108], η εφαρμογή της αργότερα στα ασύρματα δίκτυα απέφερε σημαντική βελτίωση στη ρυθμαπόδοση και την αξιοποίηση των πόρων, καθώς η τεχνική NC μπορεί να αξιοποιήσει αποτελεσματικά την εγγενή φύση ευρυεκπομπής των ασυρμάτων δικτύων. Οι προκλήσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής NC στα ασύρματα δίκτυα αφορούν κυρίως την αποδοτική διαχείριση της σχέσης ανταλλαγής μεταξύ της αυξημένης πολυπλοκότητας των κόμβων και της βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου.

Στη διατριβή, η NC τεχνική χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση της πληροφορίας από ένα κόμβο-πηγή σε ένα κόμβο-προορισμό σε DTN δίκτυο. Το προτεινόμενο σχήμα [109, 110] αποσκοπεί στη μείωση του πλεονασμού πληροφορίας αλλά και της διάχυσής της στο δίκτυο πληροφορίας, χρησιμοποιώντας ένα αποδοτικό αλγόριθμο διαχείρισης της μνήμης (Memory Management Algorithm, MMA) των κόμβων που βασίζεται στην NC τεχνική. Οι κόμβοι, αντί να περιμένουν μέχρι να λάβουν όλα τα πακέτα μιας γενεάς -η έννοια της οποίας ορίζεται στην επόμενη ενότητα-, όπως προτάθηκε στην [111], πραγματοποιούν αποκωδικοποίηση της αποθηκευμένης πληροφορίας εφόσον έχουν λάβει ικανό αριθμό γραμμικώς ανεξάρτητων

πακέτων. Δεδομένου ότι οι κόμβοι αποφασίζουν αυτόνομα για τις συνιστώσες που κωδικοποιούν την αποθηκευμένη πληροφορία όπως και για το ποια πακέτα θα αποθηκεύσουν, το προτεινόμενο σχήμα, αναφερόμενο εφεξής ως NC/MMA σχήμα, λειτουργεί κατά αποκεντρωμένο τρόπο. Κατ' αυτό τον τρόπο, οι κόμβοι-προορισμοί αποφασίζουν αυτόνομα πότε θα εκκινήσουν τη διαδικασία αποκωδικοποίησης, μειώνοντας την πρόσθετη καθυστέρηση παράδοσης της πληροφορίας που θα ανέκυπτε αν οι κόμβοι ανέμεναν να λάβουν όλα τα πακέτα μιας γενεάς.

Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες έχουν προσπαθήσει να εφαρμόσουν την NC τεχνική, κυρίως σε συνεδρίες (sessions) πολυεκπομπής ή ευρυεκπομπής όπου η πληροφορία προορίζεται προς πολλαπλούς παραλήπτες. Μικρό πλήθος ερευνητικών εργασιών εξετάζουν συνεδρίες μονοεκπομπής (unicasting), δηλαδή συνεδρίες όπου η πληροφορία απευθύνεται σε ένα μόνο κόμβο -προορισμό. Επίσης, αρκετά σχήματα που προτείνονται στη βιβλιογραφία υλοποιούν την NC τεχνική και κατακερματίζουν την τρέχουσα πληροφορία στον κόμβο-πηγή. Άλλες υλοποιούν την NC τεχνική στους ενδιάμεσους κόμβους και στον κόμβο-προορισμό. Στο Κεφ. 5 προτείνεται μέθοδος που εφαρμόζει την NC τεχνική σε συνεδρίες μονοεκπομπής, όπου οι κόμβοι κινούνται σε τυχαίες διευθύνσεις και με τυχαία ταχύτητα. Όπως περιγράφεται στην Ενότητα 5.3, μόνο οι κόμβοι-προορισμοί αποκωδικοποιούν την πληροφορία που λαμβάνουν, σε αντίθεση με τους ενδιάμεσους κόμβους που πραγματοποιούν μόνο NC κωδικοποίηση της πληροφορίας που λαμβάνουν. Η NC τεχνική εφαρμόζεται και στους κόμβους-πηγές οι οποίοι δεν χρειάζεται να κατακερματίσουν την προς αποστολή πληροφορία, καθώς αυτή θεωρείται μικρή. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων καταδεικνύουν ότι, με την εφαρμογή του NC προτεινόμενου σχήματος, το Epidemic πρωτόκολλο [112] και το PRoPHET [113] πρωτόκολλο δρομολόγησης βελτιώνουν την απόδοσή τους, επιτυγχάνοντας δραστική μείωση του πλεονασμού πληροφορίας. Ταυτόχρονα, η μέση πιθανότητα παράδοσης της πληροφορίας βελτιώνεται ενώ η μέση καθυστέρηση της παράδοσης της πληροφορίας επηρεάζεται ελάχιστα.

Το υπόλοιπο κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής: Η Ενότητα 5.2 περιγράφει σχετική βιβλιογραφία εφαρμογής της NC τεχνικής σε DTN δίκτυα. Η Ενότητα 5.3 παρουσιάζει το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα, αναλύοντας τις τρεις του συνιστώσες, δηλαδή τον αλγόριθμο διαχείρισης μνήμης MMA, τον αλγόριθμο NC κωδικοποίησης και τον αλγόριθμο αποκωδικοποίησης. Οι Ενότητες 5.4 και 5.5 παρουσιάζουν τα αριθμητικά αποτελέσματα για δύο ομάδες προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, ενώ η Ενότητα 5.6 ολοκληρώνει το κεφάλαιο.

## 5.2 Σχετική βιβλιογραφία

Η πρώτη εφαρμογή της NC τεχνικής σε δυναμικά περιβάλλοντα παρουσιάστηκε στην [114]. Μια αποκεντρωμένη RLNC προσπάθεια συγκρίθηκε με το Steiner ευριστικό αλγό-

ριθμο και οι σχετικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι η RLNC προσέγγιση αποδίδει καλύτερα όταν η συνδεσιμότητα μεταξύ κόμβων είναι δυναμική. Ο Widmer και ο Budec [115] έδειξαν ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός, που βασίζεται στην NC τεχνική, αποδίδει καλύτερα από την πιθανοτική δρομολόγηση στα ευκαιριακά δίκτυα όπου η συνδεσιμότητα των κόμβων δεν είναι εξασφαλισμένη. Στη συγκεκριμένη προσπάθεια, τα πακέτα πηγής ομαδοποιούνται σε γενεές ενώ οι γραμμικές NC λειτουργίες θεμελιώνονται σε ένα πεπερασμένο πεδίο  $F_2^8$ . Αποδείχθηκε ότι το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα αντιμετωπίζει καλύτερα την κινητικότητα των κόμβων σε σχέση με την πιθανοτική δρομολόγηση. Ακόμα και σε ακραίες συνθήκες, όπως στην περίπτωση αραιών δικτύων με υψηλό ποσοστό αποτυχίας μετάδοσης πακέτων και κόμβους που είναι αδρανείς επικοινωνιακά για μεγάλο χρονικό διάστημα, το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα απέδωσε σχετικά καλά, σε αντίθεση με την πιθανοτική δρομολόγηση που δεν μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί καθόλου.

Μια ακόμη ερευνητική προσπάθεια αναφέρεται στην εφαρμογή της RLNC τεχνικής στην Epidemic πρωτόκολλο δρομολόγησης για περιπτώσεις μονοεκπομπών σε DTN δίκτυα [111]. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην Ενότητα. 2.6 η τυχαία κωδικοποίηση (Randomized Coding) είναι αποκεντρωμένη τεχνική, επεκτάσιμη και εύκολα υλοποιήσιμη. Συνεπώς, είναι κατάλληλη για δυναμικά δίκτυα. Η συγκεκριμένη προσπάθεια [111] προσφέρει μια σύγκριση μεταξύ παραδοσιακών τεχνικών προώθησης που δεν χρησιμοποιούν την κωδικοποίηση και της RLNC τεχνικής. Αποδεικνύεται ότι για ασύγχρονες περιπτώσεις μονοεκπομπών, υπό το σενάριο των πολλαπλών πηγών/πολλαπλών προορισμών (Multiple Sources/Multiple Destinations, MS/MD), το RLNC προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει μεγαλύτερο όφελος σε σχέση με μη κωδικοποιημένο σχήμα αναφορικά με την καθυστέρηση παράδοσης μιας γενεάς πακέτων. Ωστόσο, υπό το ίδιο σενάριο, η συγκεκριμένη εργασία έδειξε ότι η RLNC τεχνική οδηγεί σε περισσότερες αποστολές πακέτων σε σχέση με τη μη χρήση κωδικοποίησης. Η [116] επέκτεινε την [111] εισάγοντας την έννοια της προτεραιότητας στην αποκωδικοποίηση των πακέτων στους κόμβους-προορισμούς, υπό την έννοια ότι τα πακέτα με υψηλότερη προτεραιότητα αποκωδικοποιούνται πριν από αυτά που έχουν χαμηλότερη προτεραιότητα. Αποδείχθηκε ότι το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει την ταχύτερη αποκωδικοποίηση των επειγόντων πακέτων πληροφορίας. Η ίδια ιδέα παρουσιάζεται στο [117] στο πλαίσιο ενός ευρύτερου αναλυτικού μαθηματικού υπόβραθρου. Στην [118], οι ίδιοι συγγραφείς διερευνούν την αναλογία μεταξύ της DTN δρομολόγησης και των κωδίκων διαγραφής (erasure coding), προτείνοντας ένα αποδοτικό πρωτόκολλο βασισμένο στην NC τεχνική (E-NCP) που μειώνει δραστικά το πλήθος των πόρων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση συγκεκριμένου πλήθους πακέτων με κόστος την ελάχιστη αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης. Η θεωρητική ανάλυση της ίδιας εργασίας καθιστά σαφή την υπεροχή της επίδοσης των σχημάτων που χρησιμοποιούν την NC τεχνική σε σύγκριση με αυτά που δεν την χρησιμοποιούν. Στην [119], η εφαρμογή της NC τεχνικής σε δίκτυα με δυναμική τοπολογία συγκρίνεται με αυτή των πρωτοκόλλων πλημμύρας. Στη συγκεκριμένη εργασία, αποδεικνύεται τόσο θεωρητικά όσο και

μέσω προσομοιώσεων ότι η NC τεχνική επιτυγχάνει ένα  $\log N$  όφελος στο συνολικό πλήθος μεταδόσεων υπό το σενάριο ευρυεκπομπών, όπου  $N$  το πλήθος των κόμβων του δικτύου.

Οι βασικές αρχές της NC τεχνικής διατυπώθηκαν στην Ενότητα. 2.6. Το προτεινόμενο σχήμα βασίζεται τόσο στην RLNC τεχνική όσο και στην αρχή των γενεών (generation principle) [120], θεωρώντας ότι  $K$  διαδοχικά πακέτα που δημιουργούνται από τον κόμβο-πηγή διαμορφώνουν μια γενεά. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το σχήμα διαπραγματεύεται ασύγχρονες μονοεκπομπές, ενδέχεται να συνυπάρχουν στο δίκτυο πακέτα που ανήκουν σε διαφορετικές γενεές. Ωστόσο, οι ενδιαμέσοι κόμβοι στη διαδρομή από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμό συνδυάζουν μόνο τα πακέτα που ανήκουν στην ίδια γενεά. Δεδομένου ότι οι κόμβοι-πηγή δημιουργούν κίνηση πληροφορίας που είναι συνήθως χρονικά συσχετισμένη, πακέτα που ανήκουν στην ίδια γενεά θεωρούνται χρονικά συσχετισμένα. Συνεπώς, η υιοθέτηση της αρχής των γενεών επηρεάζει θετικά την απόδοση του δικτύου.

Η αξιολόγηση του προτεινόμενου σχήματος πραγματοποιείται μέσω τριών βασικών μεγεθών, της μέσης καθυστέρησης παράδοσης της πληροφορίας (average delivery delay), του ρυθμού παράδοσης (delivery ratio) και του κόστους παράδοσης. Το τελευταίο μέγεθος αποτιμά τον πλεονασμό πακέτων που διακινούνται στο δίκτυο και αποτελεί μέτρο της αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων ενός DTN δικτύου. Συνεπώς, αποτελεί θεμελιώδες μέτρο αποτίμησης της απόδοσης του δικτύου.

### 5.3 Το προτεινόμενο σχήμα

Το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα προορίζεται για DTN δίκτυα που περιλαμβάνουν κόμβους με περιορισμένη αποθηκευτική ικανότητα. Η NC τεχνική και ο MMA αλγόριθμος υλοποιούνται σε κάθε κόμβο με σκοπό την αποδοτική αξιοποίηση του αποθηκευτικού χώρου των κόμβων. Το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει σημαντική μείωση της διακινούμενης πλεονάζουσας πληροφορίας ανά πακέτο κόμβο-πηγής, καθώς απαιτούνται λιγότερες μεταδόσεις προκειμένου να παραδοθεί το ίδιο πλήθος πακέτων προς τον κόμβο-προορισμό.

Με βάση τον MMA αλγόριθμο, οι κόμβοι επιλέγουν με συγκεκριμένα κριτήρια ποια πακέτα θα αποθηκεύσουν στους ενταμιευτές τους. Συγκεκριμένα, οι κόμβοι ελέγχουν αν το ληφθέν πακέτο ανήκει σε συγκεκριμένη γενεά και αν είναι γραμμικώς ανεξάρτητο από τα ήδη αποθηκευμένα πακέτα της ίδιας γενεάς. Επιπλέον, οι κόμβοι (i) πραγματοποιούν δημιουργία, αποθήκευση και παράδοση πακέτων, (ii) υλοποιούν την RLNC τεχνική και (iii) πραγματοποιούν αποκωδικοποίηση της αποθηκευμένης πληροφορίας. Η RLNC τεχνική θεμελιώνεται στο πεπερασμένο πεδίο  $F_2^8$  αποσκοπώντας να επιτύχει το γραμμικό συνδυασμό των αποθηκευμένων πακέτων της ίδιας γενεάς. Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για το γραμμικό συνδυασμό ενσωματώνονται στις επικεφαλίδες των πακέτων.

Το προτεινόμενο σχήμα δομείται με βάση τις ακόλουθες υποθέσεις:

Υποθέσεις σχετικά με τα πακέτα:

1. Τα πακέτα δημιουργούνται τυχαία στους κόμβους-πηγές, σε τυχαίες χρονικές στιγμές και προορίζονται για τυχαίους κόμβους ακολουθώντας σενάριο μονοεκπομπής.
2. Τα πακέτα που δημιουργούνται διαδοχικά εντός προδιαγεγραμμένων χρονικών παραθύρων ανήκουν στην ίδια γενεά. Κάθε γενεά περιλαμβάνει  $K$  διαδοχικά πακέτα σταθερού μεγέθους.
3. Τα διακινούμενα πακέτα στο δίκτυο ενδέχεται να είναι κωδικοποιημένα ή όχι.
4. Οι επικεφαλίδες των πακέτων περιέχουν την *ταυτότητα πακέτου*, την *ταυτότητα αντιγράφου πακέτου*, τη γενεά στην οποία ανήκει το πακέτο και τον κόμβο-προορισμό του.

Υποθέσεις σχετικά με τη λειτουργία των κόμβων:

1. Κάθε κόμβος ενδέχεται να είναι πηγή μιας συνεδρίας μονοεκπομπής, ενδιάμεσος κόμβος άλλης συνεδρίας μονοεκπομπής ή κόμβος-προορισμός για άλλη συνεδρία.
2. Για συγκεκριμένη συνεδρία, οι ενδιάμεσοι κόμβοι συνδυάζουν μόνο πακέτα που ανήκουν στην ίδια γενεά και προορίζονται για τον ίδιο κόμβο-προορισμό.
3. Για τον έλεγχο αν το κωδικοποιημένο πακέτο είναι *πρωτότυπο*<sup>1</sup> (innovative), δηλαδή γραμμικώς ανεξάρτητο των αποθηκευμένων πακέτων, χρησιμοποιείται η Gauss-Jordan μέθοδος. Εξ ορισμού τα πακέτα που δημιουργεί η πηγή αποτελούν τη βάση του  $F_2^8$  και είναι κατ' επέκταση γραμμικώς ανεξάρτητα από κάθε κωδικοποιημένο πακέτο.
4. Οι κόμβοι επιτρέπεται να αποκωδικοποιούν μόνο τα πακέτα που προορίζονται για τους ίδιους.
5. Η NC τεχνική πραγματοποιείται σε κάθε κόμβο.

Η καινοτομία του προτεινόμενου MMA αλγορίθμου βασίζεται στις ακόλουθες λειτουργίες. Αν  $p$  είναι ένα πακέτο που λήφθηκε από τον κόμβο και αποτελεί γραμμικό συνδυασμό  $Q$  αυθεντικών πακέτων<sup>2</sup>, οι υποθέσεις σχετικά με τη μνήμη των κόμβων είναι:

1. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορούν να αποθηκεύσουν μέχρι  $[Q/2]$  κωδικοποιημένα πακέτα. Το υπόλοιπο της μνήμης ενός κόμβου χρησιμοποιείται για την αποθήκευση αυθεντικών πακέτων που ικανοποιούν τις προδιαγραφές που αναλύονται στην Παρ. 5.1.
2. Οι κόμβοι-προορισμοί μπορούν να αποθηκεύσουν  $Q$  πακέτα που προορίζονται για τους ίδιους.  $Q$  είναι το άθροισμα των κωδικοποιημένων και αυθεντικών πακέτων που ανήκουν στην ίδια γενεά και ενδέχεται να είναι διαφορετικό ανά κόμβο. Όλα τα αυθεντικά πακέτα αποθηκεύονται στον κόμβο-προορισμό μέχρι την αποκωδικοποίηση  $Q$

<sup>1</sup>Ως καινοτόμο θεωρείται το πακέτο που είναι γραμμικώς ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα πακέτα μιας γενεάς

<sup>2</sup>Ως αυθεντικό πακέτο θεωρείται το πακέτο που δημιουργεί η πηγή και δεν είναι κωδικοποιημένο

πακέτων. Αν  $l$  είναι το πλήθος των αυθεντικών πακέτων που είναι αποθηκευμένα στον κόμβο-προορισμό, ο μέγιστος αριθμός καινοτόμων πακέτων που πρέπει να αποθηκευτούν πριν την εκκίνηση της διαδικασίας αποκωδικοποίησης για συγκεκριμένη συνεδρία μονοεκπομπής είναι ίσος με  $Q - l$ . Συνεπώς,  $Q - l$  κωδικοποιημένα πακέτα θα αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς για να προκύψουν τα αντίστοιχα αυθεντικά πακέτα.

Όλοι οι κόμβοι επιτρέπεται να δημιουργήσουν και μεταδώσουν πληροφορία. Δεδομένου ότι οι κόμβοι πραγματοποιούν προκαθορισμένες λειτουργίες, δεν απαιτείται κεντρικός έλεγχος. Αντί να περιμένουν να λάβουν τα  $K$  γραμμικώς ανεξάρτητα πακέτα μιας γενεάς, οι κόμβοι-προορισμοί μπορούν να εκκινήσουν τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης, εφόσον έχουν λάβει  $Q \leq K$  γραμμικώς ανεξάρτητα πακέτα που αποτελούν γραμμικό συνδυασμό  $Q$  αυθεντικών πακέτων. Το πλήθος  $Q$  ενδέχεται να είναι διαφορετικό για διαφορετικούς κόμβους καθώς η επιλογή του γίνεται τυχαία από τους κόμβους ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[1, K]$ . Καθώς οι κόμβοι αποφασίζουν αυτόνομα, το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα.

Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της απόδοσης του προτεινόμενου σχήματος είναι:

Ο ρυθμός παράδοσης της πληροφορίας

$$R_{del} = \frac{\text{Συνολικός αριθμός παραδομένων πακέτων}}{\text{Συνολικός αριθμός αυθεντικών πακέτων}} \quad (5.1)$$

Η μέση καθυστέρηση παράδοσης όλων των πακέτων που παραδίδονται

$$D_{av} = E[t_{end(1)} - t_{start(1)}, t_{end(2)} - t_{start(2)}, \dots, t_{end(Q)} - t_{start(Q)}] \quad (5.2)$$

όπου  $t_{end(p)}$  η χρονική στιγμή παράδοσης ενός πακέτου στον κόμβο-προορισμό και  $t_{start(p)}$  η χρονική στιγμή όπου εκκινεί η αποστολή το πακέτου από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμό.

Το κόστος παράδοσης

$$C_{del} = \frac{\text{Αριθμός μεταφερόμενων πακέτων-Αριθμός παραδομένων αυθεντικών πακέτων}}{\text{Αριθμός παραδομένων αυθεντικών πακέτων}} \quad (5.3)$$

που αποτιμά τον πλεονασμό πληροφορίας που δημιουργείται στο δίκτυο ανά αυθεντικό πακέτο. Το  $C_{del}$  αποτελεί κρίσιμο μέτρο επίδοσης του δικτύου καθώς συνδέεται απευθείας με το πώς αξιοποιούνται οι διαθέσιμοι πόροι. Χαμηλές τιμές του  $C_{del}$  υποδηλώνουν ότι το έυρος ζώνης, η ισχύς εκπομπής και η μνήμη των κόμβων αξιοποιείται αποδοτικά. Μείωση του  $C_{del}$  οδηγεί σε επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου καθώς ο ρυθμός εξάντλησης των πόρων μειώνεται. Όπως αποδεικνύουν τα αριθμητικά αποτελέσματα των Ενοτήτων 5.4 και 5.5, ο τρόπος με τον οποίο ο προτεινόμενος MMA αλγόριθμος επιλέγει τα πακέτα που θα

αποθηκευθούν στους κόμβους ενισχύει την απόδοση της NC τεχνικής που εφαρμόζεται.

Η αξιολόγηση της εφαρμογής του προτεινόμενου NC/MMA σχήματος γίνεται υπολογίζοντας την αντίστοιχη ποσοστιαία αλλαγή των ανωτέρων μεγεθών, δηλαδή:

$$X^{(\%)} = \frac{X_{noncoded} - X_{NC/MMA}}{X_{noncoded}} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

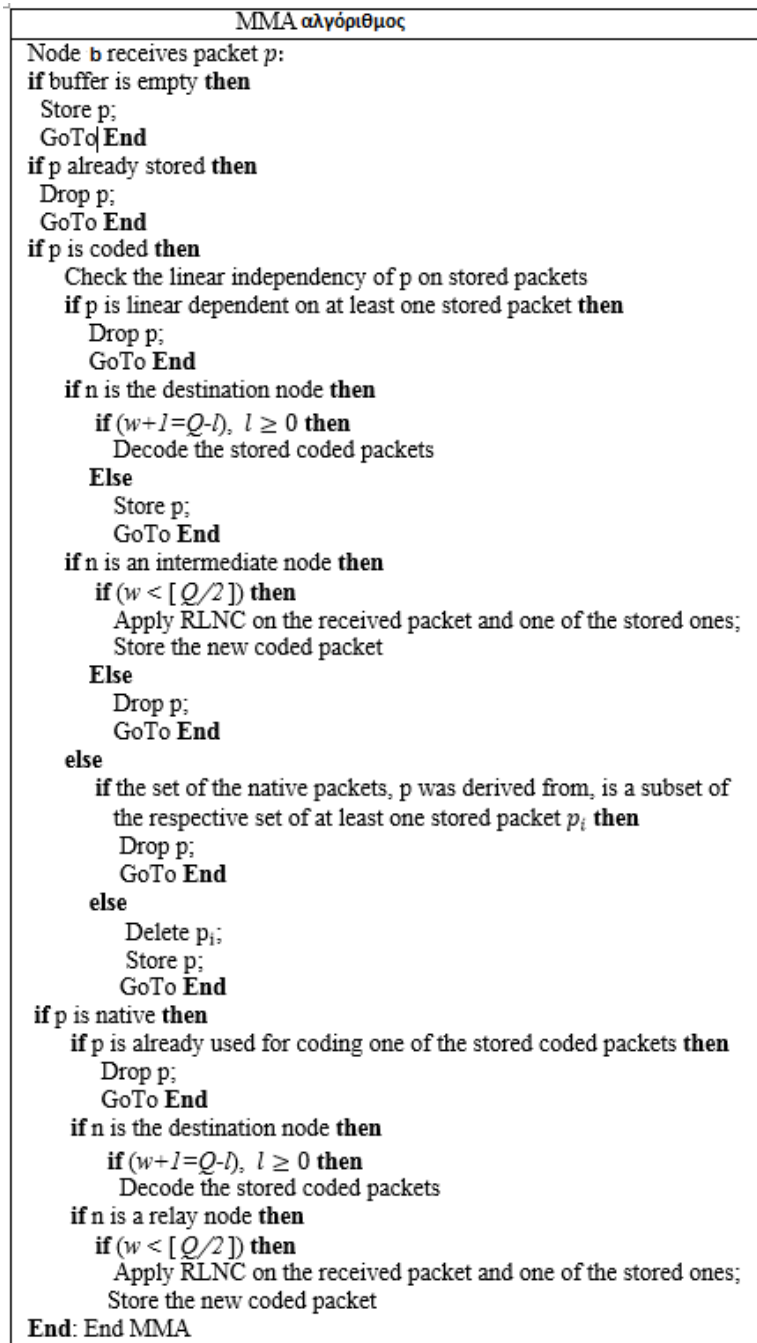
όπου  $X = R_{del}, D_{av}, C_{del}$  ενώ οι δείκτες  $NC$  και  $noncoded$  αντιστοιχούν στη χρήση ή όχι της NC τεχνικής, αντίστοιχα. Όπως επαληθεύεται από τις προσομοιώσεις, το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει δραστική μείωση της  $C_{del}$  χωρίς να επηρεάζονται αισθητά τα  $R_{del}$  και  $D_{av}$ . Για την ακρίβεια, στις περισσότερες περιπτώσεις τα δύο ποσοστιαία μεγέθη,  $R_{del}$  και  $D_{av}$ , βελτιώνονται επίσης.

Ένα πρόσθετο μέτρο που χρησιμοποιείται

### 5.3.1 Ο προτεινόμενος MMA αλγόριθμος

Η διαχείριση της μνήμης των κόμβων είναι κρίσιμη για τα DTN δίκτυα καθώς η αποθηκευτική ικανότητά τους είναι συνήθως περιορισμένη. Ένας αποδοτικός αλγόριθμος διαχείρισης της μνήμης μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου, εφόσον τα πακέτα που αποθηκεύονται στους κόμβους ικανοποιούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Ο MMA αλγόριθμος που εισάγεται με το προτεινόμενο σχήμα βελτιστοποιεί την αποδοτική χρήση της μνήμης των κόμβων, μειώνει τον πλεονασμό της διακινούμενης πληροφορίας και αποφεύγει την αποθήκευση γραμμικώς εξαρτημένων πακέτων (μη-καινοτόμων), καθώς θα οδηγούσαν σε μη επιλύσιμα γραμμικά συστήματα. Αν  $p$  ένα νεο-εισερχόμενο πακέτο στον κόμβο  $b$ , ο  $b$  ελέγχει αρχικά αν υπάρχουν άλλα αποθηκευμένα πακέτα στον ενταμιευτή του. Αν δεν υπάρχουν, το πακέτο  $p$  αποθηκεύεται χωρίς περαιτέρω ελέγχους. Αν υπάρχει τουλάχιστον ένα πακέτο αποθηκευμένο, ο  $b$  ελέγχει αν το πακέτο  $p$  είναι κωδικοποιημένο. Αντίστοιχα προς το αν το  $p$  είναι κωδικοποιημένο ή όχι, προκύπτουν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

1. Αν το  $p$  είναι αυθεντικό πακέτο και έχει χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία τουλάχιστον ενός από τα υπόλοιπα αποθηκευμένα κωδικοποιημένα πακέτα, ο κόμβος το απορρίπτει. Αν δεν έχει χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία άλλου πακέτου από τα αποθηκευμένα του κόμβου  $b$ , ο MMA αλγόριθμος τερματίζεται ενώ το πακέτο προωθείται στον αλγόριθμο κωδικοποίησης NC ή αποκωδικοποίησης, εφόσον ο κόμβος είναι ενδιάμεσος ή προορισμού, αντίστοιχα.
2. Αν το  $p$  είναι κωδικοποιημένο πακέτο, ο αλγόριθμος ελέγχει αν υπάρχουν αποθηκευμένα κωδικοποιημένα πακέτα στη μνήμη του κόμβου που είναι γραμμικώς εξαρτημένα από αυτό. Αν υπάρχουν, το πακέτο απορρίπτεται, άλλως, το  $p$  προωθείται στον αλγόριθμο κωδικοποίησης NC ή αποκωδικοποίησης, αντίστοιχα. Αν δεν υπάρχουν γραμμικώς εξαρτημένα αποθηκευμένα πακέτα του νέου πακέτου, γίνεται έλεγχος αν το σύν-



Σχήμα 5.1: Ο MMA αλγόριθμος.

ολο των αυθεντικών πακέτων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του νέου πακέτου είναι υποσύνολο αντίστοιχου συνόλου των αποθηκευμένων κωδικοποιημένων πακέτων και αντίστροφα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο κόμβος αποθηκεύει το πακέτο που αποτελεί γραμμικό συνδυασμό με το μεγαλύτερο πλήθος αυθεντικών πακέτων. Κατ' αυτό τον τρόπο, ο κόμβος εξασφαλίζει ότι αποθηκεύονται μόνο γραμμικώς ανεξάρτητα πακέτα. Αν το  $p$  αποδειχτεί γραμμικώς ανεξάρτητο, ελέγχεται αν ο  $b$  είναι ενδιάμεσος κόμβος ή ο κόμβος-προορισμός της συγκεκριμένης συνεδρίας μονοεκπομπής. Αν είναι ο κόμβος-προορισμός και ικανοποιείται η συνθήκη  $w + 1 = Q - l$ ,



εκκινεί η διαδικασία αποκωδικοποίησης των αποθηκευμένων πακέτων. Αν ο  $b$  είναι ενδιάμεσος κόμβος, ελέγχεται αν ο αριθμός των αποθηκευμένων κωδικοποιημένων πακέτων είναι μικρότερος του  $\lfloor Q/2 \rfloor$ . Αν είναι μικρότερος, πραγματοποιείται NC, αν όχι το πακέτο απορρίπτεται.

Οι περιορισμοί  $w + 1 = Q - l$  και  $w < \lfloor Q/2 \rfloor$  αποσκοπούν στη μείωση της διακινούμενης στο δίκτυο πληροφορίας. Το Σχ. 5.1 παρουσιάζει τον MMA αλγόριθμο.

### 5.3.2 Ο προτεινόμενος NC αλγόριθμος

Ο NC αλγόριθμος εφαρμόζεται από τον κόμβο-πηγή ή από κάποιο ενδιάμεσο κόμβο σε πακέτα που (i) ανήκουν στην ίδια γενεά και (ii) προορίζονται για τον ίδιο κόμβο-προορισμό. Οι διαδικασίες κωδικοποίησης υλοποιούνται στο πεδίο Galois ( $F_2^8$ ), οπότε οι συνιστώσες έχουν μήκος ενός byte. Το TTL μέγεθος δείχνει τη διάρκεια ζωής ενός πακέτου. Η κωδικοποίηση πακέτων που ανήκουν στην ίδια γενεά διευκολύνει το έργο του κόμβου-προορισμού, καθώς ο τελευταίος καλείται να αποκωδικοποιήσει συσχετισμένη πληροφορία προορισμένη για αυτόν. Αν το νέο πακέτο προκύπτει ως γραμμικός συνδυασμός του ίδιου πλήθους αυθεντικών πακέτων με κάποιο από τα αποθηκευμένα κωδικοποιημένα πακέτα και είναι γραμμικώς ανεξάρτητο από αυτά, τότε αποθηκεύεται. Άλλως, και ενώ έχουν προηγηθεί οι υπόλοιποι έλεγχοι, αποθηκεύεται ο γραμμικός συνδυασμός του νέου πακέτου με ένα τυχαίο αποθηκευμένο πακέτο. Το τυχαίο πακέτο αντικαθίσταται από το νέο κωδικοποιημένο πακέτο.

### 5.3.3 Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποκωδικοποίησης

Προκειμένου να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος αποκωδικοποίησης, οι κόμβοι-προορισμοί πρέπει να έχουν λάβει  $w + l = Q$  γραμμικώς ανεξάρτητα πακέτα. Όπως αναφέρθηκε, τα αυθεντικά πακέτα αποτελούν τη βάση του  $F_2^8$ , οπότε ένα αυθεντικό πακέτο μπορεί να εμπλακεί στη διαδικασία αποκωδικοποίησης. Η διαδικασία αποκωδικοποίησης χρησιμοποιεί την τεχνική Gauss-Jordan.

## 5.4 Αριθμητικά αποτελέσματα πρώτης ομάδας προσομοιώσεων

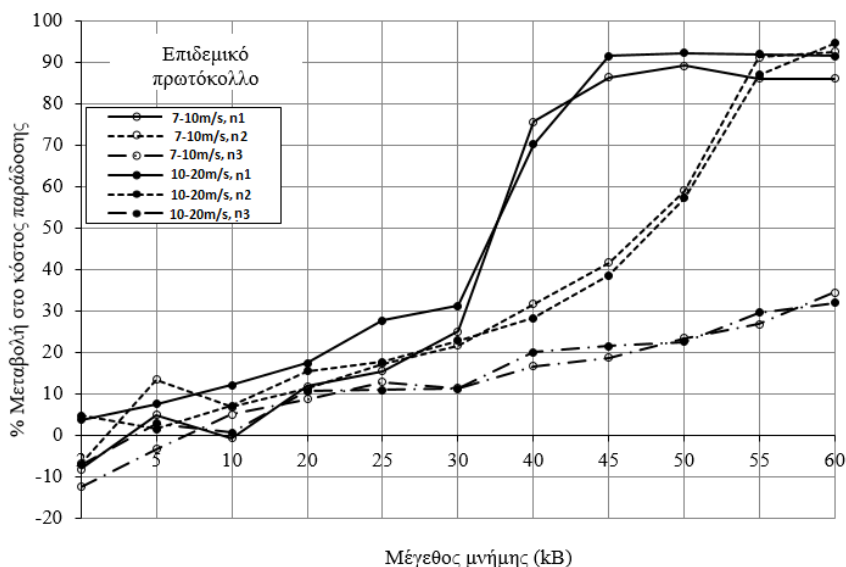
Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται και συζητούνται τα αριθμητικά αποτελέσματα της πρώτης ομάδας προσομοιώσεων σχετικά με την απόδοση του NC/MMA σχήματος. Οι προσομοιώσεις συγκρίνουν τη μη κωδικοποιημένη λειτουργία των ενδιάμεσων κόμβων, που αποτελεί σημείο αναφοράς για τις συγκρίσεις που θα ακολουθήσουν, με την κωδικοποιημένη λειτουργία εφαρμόζοντας το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις αποσκοπούν στην απόδειξη της δραστηκής μείωσης του πλεονασμού πληροφορίας που επιτυγχά-

Παράμετρος	Τιμή
Χρόνος αροσομοίωσης	9000 s (2.5h)
TTL	60min(1h)
Μέγεθος πακέτου	500bytes
Εύρος εκπομπής	200m
Περιοχή ανάπτυξης	$4500 \times 3400m^2 = 15.3km^2$
Ρυθμός μετάδοσης	2Mbps
Μοντέλο κινητικότητας	RWP

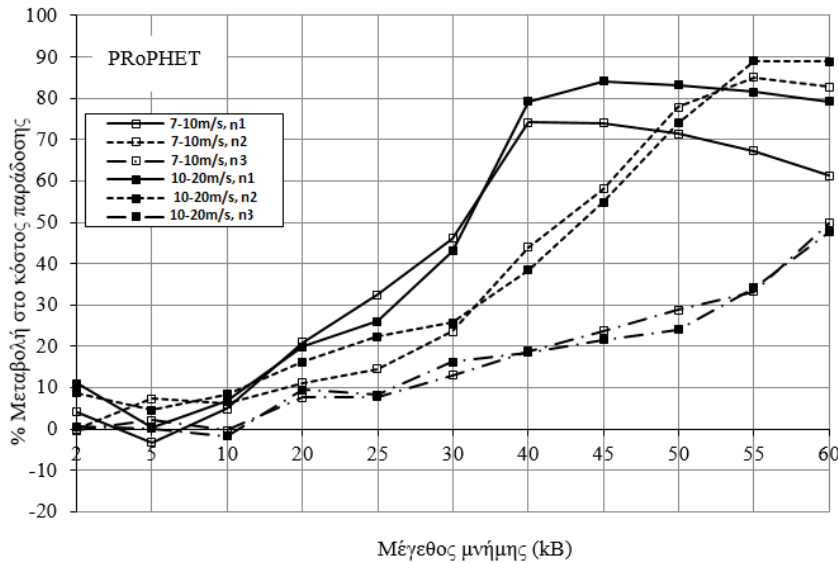
Πίνακας 5.1: Παράμετροι προσομοίωσης της πρώτης ομάδας προσομοιώσεων

νεται με την εφαρμογή του NC/MMA σχήματος σε δίκτυα που ακολουθούν το Epidemic ή το PRoPHET πρωτόκολλο δρομολόγησης. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής ONE, στον οποίο αναπτύχθηκε κώδικας για την υλοποίηση των τριών αλγορίθμων του προτεινόμενου σχήματος. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στον προσομοιωτή ONE για την πρώτη ομάδα προσομοιώσεων.

Στην πρώτη ομάδα προσομοιώσεων, οι κόμβοι χρησιμοποιούν το RWP μοντέλο κινητικότητας (βλ. Παρ. 4.4.1.2) ενώ το εύρος των ταχυτήτων κίνησης των κόμβων είναι ίσο με  $[7, 10]m/s$  (σχετικά χαμηλές ταχύτητες) ή  $[10, 20]m/s$  (σχετικά υψηλές ταχύτητες). Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας είτε το Epidemic είτε το PRoPHET πρωτόκολλο δρομολόγησης. Το μέγεθος της γενεάς τέθηκε ίσο με 50 πακέτα ( $K = 50$ ) ενώ η μνήμη των κόμβων δοκιμάστηκε στο εύρος  $M \in [2, 60]kB$ . Η επιφάνεια της περιοχής ανάπτυξης τέθηκε ίση με  $A = 15.3km^2$  ενώ για την πυκνότητα του δικτύου, όπως αυτή αποτιμά-



Σχήμα 5.2: Ποσοστιαία μεταβολή του κόστους παράδοσης της πληροφορίας  $C_{del}^{(\%)}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της μνήμης των κόμβων, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το Epidemic πρωτόκολλο.



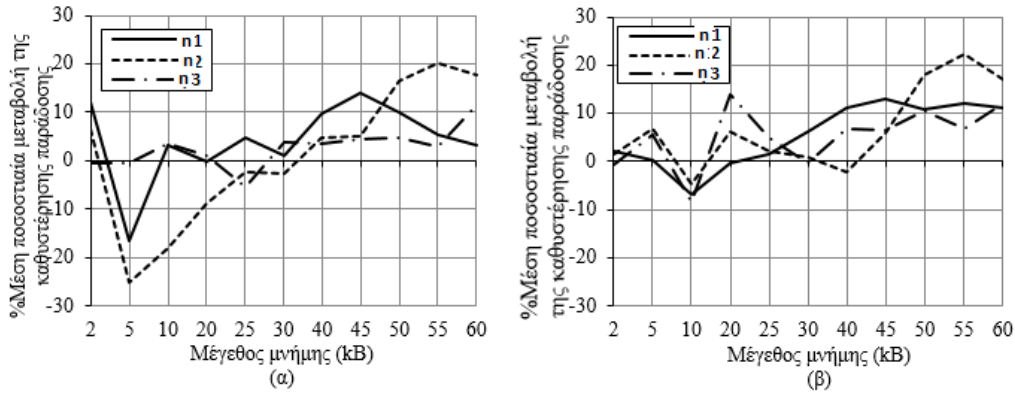
Σχήμα 5.3: Ποσοστιαία μεταβολή του κόστους παράδοσης της πληροφορίας  $C_{del}^{(\%)}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της μήμης των κόμβων για διάφορες τιμές της ταχύτητας των κόμβων και της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το PRoPHET πρωτόκολλο.

ται από το βαθμό των κόμβων  $n = \pi \cdot d \cdot r^2$ , χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές  $_1 = 0.24(N = 30)$ ,  $_2 = 0.41(N = 50)$  και  $_3 = 0.82(N = 100)$ .

Από τα Σχ. 5.2 και 5.3 που απεικονίζουν τη συμπεριφορά του  $C_{del}^{(\%)}$  όταν το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα συνδυάζεται με τα Epidemic και PRoPHET πρωτόκολλα δρομολόγησης, αντίστοιχα, είναι φανερό ότι η εφαρμογή του MMA αλγορίθμου προσφέρει σημαντική μείωση του πλεονασμού πληροφορίας που διακινείται στο δίκτυο. Επίσης, παρατηρείται ότι, για μικρά μεγέθη μήμης των κόμβων ( $M < 10kB$ ), η χρήση του NC/MMA σχήματος έχει μικρή επίδραση στο  $C_{del}^{(\%)}$ , της τάξης του  $\pm 10\%$ , ενώ για μεγαλύτερα μεγέθη μήμης ( $M > 20 - 25kB$ ), η εφαρμογή του προτεινόμενου NC/MMA σχήματος προσφέρει δραστική μείωση του πλεονασμού πληροφορίας που διακινείται στο DTN δίκτυο. Συγκεκριμένα, όπως αυτό αποτιμάται από την αύξηση του  $C_{del}^{(\%)}$ , η μείωση του πλεονασμού πληροφορίας κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15% (για αραιά DTN δίκτυα και  $M \simeq 25kB$ ) μέχρι 80 και 90% (για πολύ αραιά DTN δίκτυα και  $M \simeq 60kB$ ). Η γενική τάση του διαγράμματος  $C_{del}^{(\%)}$  είναι ότι η μείωση του πλεονασμού διακινούμενης πληροφορίας στο δίκτυο κυμαίνεται στο  $\pm 10\%$  για  $M < 10kB$ . Για μεγαλύτερες τιμές του  $M$ , η  $C_{del}^{(\%)}$  αυξάνεται απότομα, φθάνοντας τον κορεσμό όταν το μέγεθος της μήμης των DTN κόμβων υπερβαίνει τα 50 – 55kB.

Από τα Σχ. 5.2 και 5.3 εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

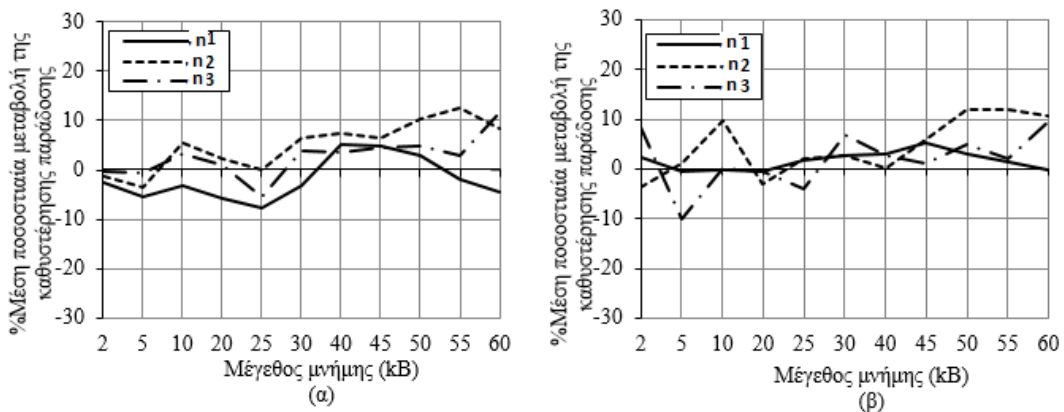
1. Τα πολύ αραιά DTN δίκτυα επωφελούνται περισσότερο από την εφαρμογή του προτεινόμενου NC/MMA σχήματος, ειδικά όταν αυτό συνδυάζεται με το Epidemic πρωτόκολλο δρομολόγησης.



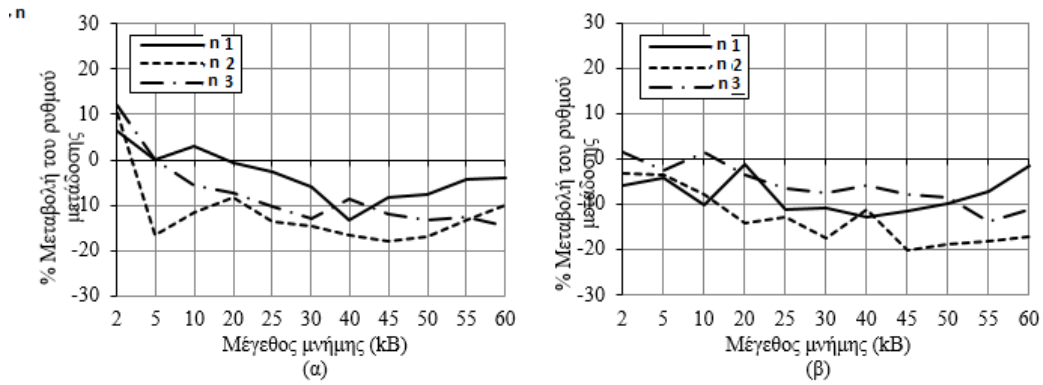
Σχήμα 5.4: Ποσοστιαία μεταβολή της καθυστέρησης παράδοσης της πληροφορίας  $D_{av}^{(\%)}$  ως προς το μέγεθος της μνήμης για διάφορες τιμές της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το Epidemic πρωτόκολλο δρομολόγησης για (α) χαμηλές τιμές ταχύτητας κόμβων (β) υψηλές τιμές ταχύτητας κόμβων.

2. Λιγότερο αραιά DTN δίκτυα επωφελούνται περισσότερο από την εφαρμογή του προτεινόμενου NC/MMA σχήματος σε DTN δίκτυα όταν χρησιμοποιούν το PRoPHET πρωτόκολλο δρομολόγησης, ειδικά όταν οι κόμβοι έχουν μνήμη με μέγεθος που υπερβαίνει τα  $45kB$  ( $M > 45kB$ ).
3. Η ταχύτητα των DTN κόμβων δεν επηρεάζει σημαντικά το όφελος του NC/MMA σχήματος, τόσο όταν συνδυάζεται με το Epidemic όσο και με το PRoPHET πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Το προτεινόμενο σχήμα βασίζεται στο [111], στο οποίο λαμβάνονται υπόψη τα σενάρια ένας κόμβος - πηγή/έναν κόμβο-προορισμός (Single Source/Single Destination, SS/MD), ένας



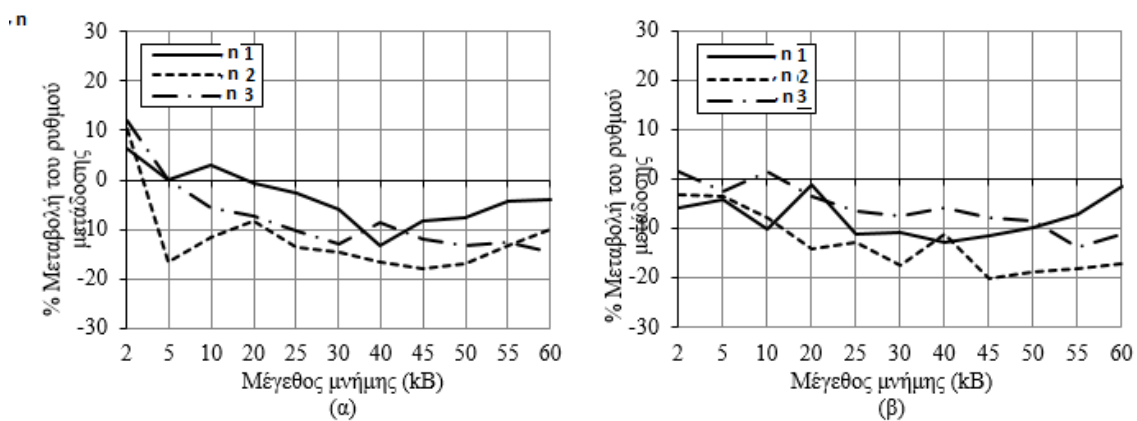
Σχήμα 5.5: Ποσοστιαία μεταβολή της καθυστέρησης παράδοσης της πληροφορίας  $D_{av}^{(\%)}$  ως προς το μέγεθος της μνήμης για διάφορες τιμές της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το PRoPHET πρωτόκολλο για (α) χαμηλές τιμές ταχύτητας κόμβων (β) υψηλές τιμές ταχύτητας κόμβων.



Σχήμα 5.6: Ποσοστιαία μεταβολή του ρυθμού της πληροφορίας  $R_{del}^{(\%)}$  ως προς το μέγεθος της μνήμης για διάφορες τιμές της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το Epidemic πρωτόκολλο για (α) χαμηλές τιμές ταχύτητας κόμβων (β) υψηλές τιμές ταχύτητας κόμβων.

κόμβος-πηγή/πολλοί κόμβοι-προορισμός (Single Source/Multiple Destinations, SS/MD) και πολλοί κόμβοι-πηγή/πολλοί κόμβοι-προορισμός (Multiple Sources / Multiple Destinations, MS / MD), η ύπαρξη τόσο μιας όσο και περισσότερων γενεών στο δίκτυο και η καθυστέρηση παράδοσης της πληροφορίας ως μόνου μεγέθους αποτίμησης του προτεινόμενου σχήματος. Σε αντίθεση με την εργασία [111] όπου υποστηρίζεται ότι το RLNC σχήμα απαιτεί περισσότερες μεταδόσεις από ένα μη κωδικοποιημένο σχήμα, τα Σχ. 5.2 και 5.3 αποδεικνύουν ότι, υπό το MS/MD σενάριο και ίδιους περιορισμούς, η εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος και συγκεκριμένα του MMA αλγορίθμου μειώνει δραστικά τον πλεονασμό της διακινούμενης πληροφορίας.

Από τα Σχ. 5.4 και 5.5 είναι φανερό ότι το  $D_{av}^{(\%)}$  κυμαίνεται μεταξύ  $-10$  και  $10\%$  όταν το προτεινόμενο σχήμα συνδυάζεται με το PRoPHET πρωτόκολλο και μεταξύ  $-15$  και  $20\%$



Σχήμα 5.7: Ποσοστιαία μεταβολή του ρυθμού της πληροφορίας της πληροφορίας  $R_{del}^{(\%)}$  ως προς το μέγεθος της μνήμης για διάφορες τιμές της πυκνότητας δικτύου, όταν εφαρμόζεται το NC/MMA σχήμα σε συνδυασμό με το PRoPHET πρωτόκολλο για (α) χαμηλές τιμές ταχύτητας κόμβων (β) υψηλές τιμές ταχύτητας κόμβων.

Παράμετρος	Bluetooth	Zigbee	WiFi
Εύρος εκπομπής	10m	50m	200m
Ρυθμός μετάδοσης	2Mbps	2Mbps	10Mbps
Ενέργεια μετάδοσης	57mA	24.7mA	219mA
Ενέργεια σάρωσης	35mA	14.8mA	131.4mA
Απάντηση σε σήμα σάρωσης	9mA	3.7mA	33mA

Πίνακας 5.2: Παράμετροι προσομοίωσης των πρωτοκόλλων επικοινωνίας στη δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων

όταν το προτεινόμενο σχήμα συνδυάζεται με το Epidemic πρωτόκολλο και  $M > 5kB$ . Καθώς το  $D_{av}^{(\%)}$  έχει μικρό εύρος διακύμανσης, από τα σχήματα δεν τεκμαίρεται σαφής τάση. Σε κάθε περίπτωση, το  $D_{av}$  επηρεάζεται ελάχιστα όταν το NC/MMA σχήμα συνδυάζεται με το PROPHET πρωτόκολλο ενώ είναι περισσότερο αποτελεσματικό όταν συνδυάζεται με το Epidemic πρωτόκολλο.

Τα Σχ. 5.6 και 5.7 δείχνουν ότι, ενώ για μικρές τιμές μεγέθους μήμης ( $M < 10kB$ ) το  $R_{del}^{(\%)}$  εμφανίζει μικρή διακύμανση ( $\pm 10\%$ ), για μεγαλύτερες τιμές μεγέθους μήμης ( $M > 10 - 15kB$ ) το προτεινόμενο σχήμα προσφέρει βελτίωση της τάξης του 5 – 20% για το  $R_{del}$ , όπως αυτό αποτιμάται από την αντίστοιχη μείωση του  $R_{del}^{(\%)}$ . Καίτοι τα διαγράμματα της  $R_{del}^{(\%)}$  δεν εμφανίζουν σαφή τάση, τα Σχ. 5.6 και 5.7 δείχνουν ότι και τα δύο πρωτόκολλα δρομολόγησης επηρεάζονται θετικά όταν συνδυάζονται με το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα, ειδικά για  $M > 30kB$  και για πολύ αραιά DTN δίκτυα.

Τα γενικότερα συμπεράσματα από την εφαρμογή του προτεινόμενου NC/MMA σχήματος είναι:

1. Ο πλεονασμός διακινούμενης πληροφορίας σε DTN δίκτυα μειώνεται δραστικά, ειδικά σε πολύ αραιά DTN όταν ακολουθούν το Epidemic πρωτόκολλο δρομολόγησης.
2. Η σημαντική μείωση του πλεονασμού πληροφορίας επιτυγχάνεται χωρίς σημαντικό κόστος ως προς τη μέση καθυστέρηση παράδοσης της πληροφορίας ή το ρυθμό παράδοσης. Συγκεκριμένα, για τιμές μεγέθους μήμης μεγαλύτερες από 10 – 15kB, και τα δύο μεγέθη επηρεάζονται θετικά.
3. Η απόδοση του προτεινόμενου NC/MMA σχήματος δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την ταχύτητα των κόμβων.

## 5.5 Αριθμητικά αποτελέσματα δεύτερης ομάδας προσομοιώσεων

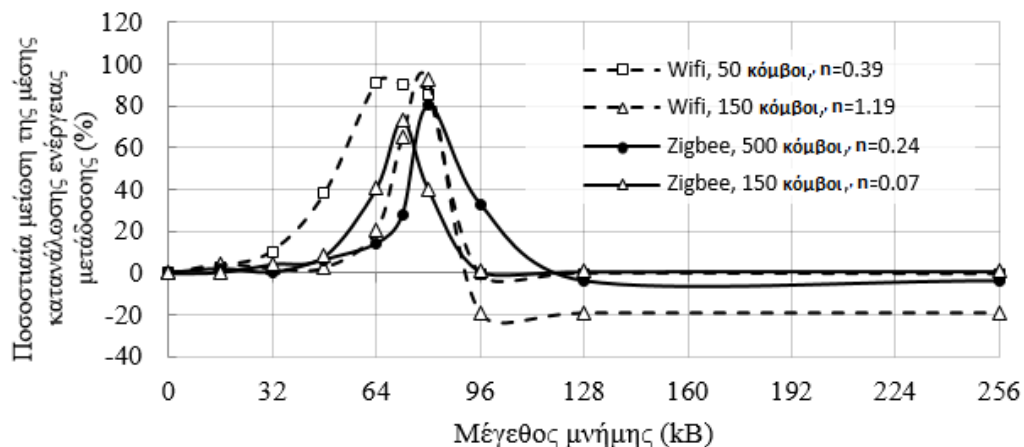
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και συζητούνται τα αριθμητικά αποτελέσματα της δεύτερης ομάδας προσομοιώσεων σχετικά με την απόδοση του NC/MMA σχήματος. Οι Πίν.

Παράμετρος	Τιμή
Χρόνος Προσομοίωσης	9000s(2.5h)
TTL	60min(1h)
Μέγεθος πακέτου	512bytes
Περιοχή Ανάπτυξης	$4500 \times 3400m^2 = 15.3km^2$
Μοντέλο κινητικότητας	RWP
Μέγεθος γενεάς	50 πακέτα
Διάστημα μεταξύ σαρώσεων	1s
Αρχική Ενέργεια κόμβων	1200mAh

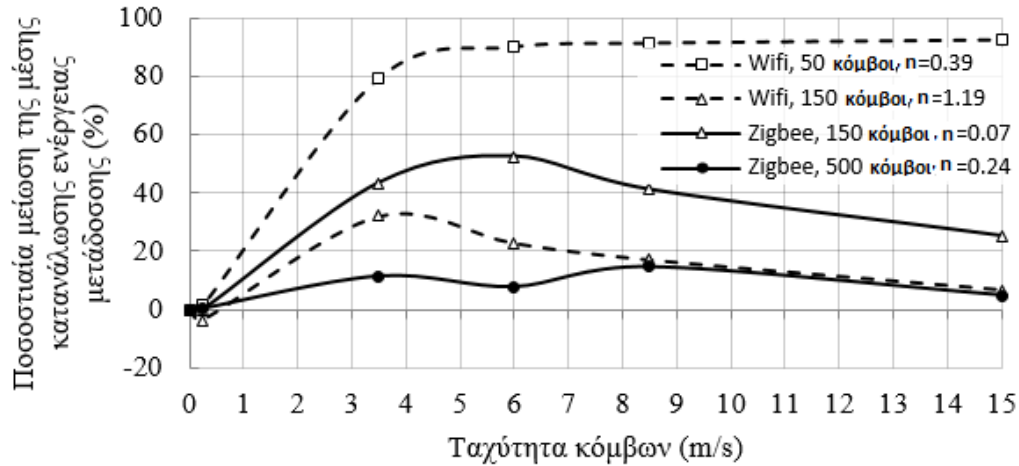
Πίνακας 5.3: Παράμετροι προσομοίωσης της δεύτερης ομάδας προσομοιώσεων

5.2 και 5.3 αναφέρουν τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στη δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων. Σε σύγκριση με τις προσομοιώσεις της πρώτης ομάδας, η δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων χρησιμοποίησε το πρόσθετο ενεργειακό πακέτο προσομοίωσης του ONE προσομοιωτή. Για το λόγο αυτό, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν που διαθέτουν διεπαφές επικοινωνίας Bluetooth, Zigbee και WiFi. Οι ενεργειακές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αντλήθηκαν από τις πηγές [33, 121, 122].

Συγκεκριμένα, στη δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων οι κόμβοι κινούνται ακολουθώντας το RWP μοντέλο κινητικότητας και ακινητοποιούνται για 0 – 120s μεταξύ διαδοχικών διαστημάτων κίνησης. Ένα νέο πακέτο δημιουργείται κάθε 15 με 20s. Πενήντα (50) διαδοχικά πακέτα σχηματίζουν μια γενεά ( $K = 50$ ). Η διάρκεια λειτουργίας του DTN δικτύου λήφθηκε ίση με 9000s(2.5h). Το μέγεθος της μνήμης των κόμβων τέθηκε ίσο με 64kB, καθώς από το Σχ. 5.8 προκύπτει ότι για εύρος τιμών 32 – 96kB το ενεργειακό όφελος μεγιστοποιείται. Από το Σχ. 5.9, είναι φανερό ότι η απόδοση του NC/MMA σχήματος εμφανίζει σταδιακή βελτίωση επί όσο αυξάνεται η ταχύτητα των κόμβων μέχρι την τιμή  $u = 3m/s$  και ύστερα



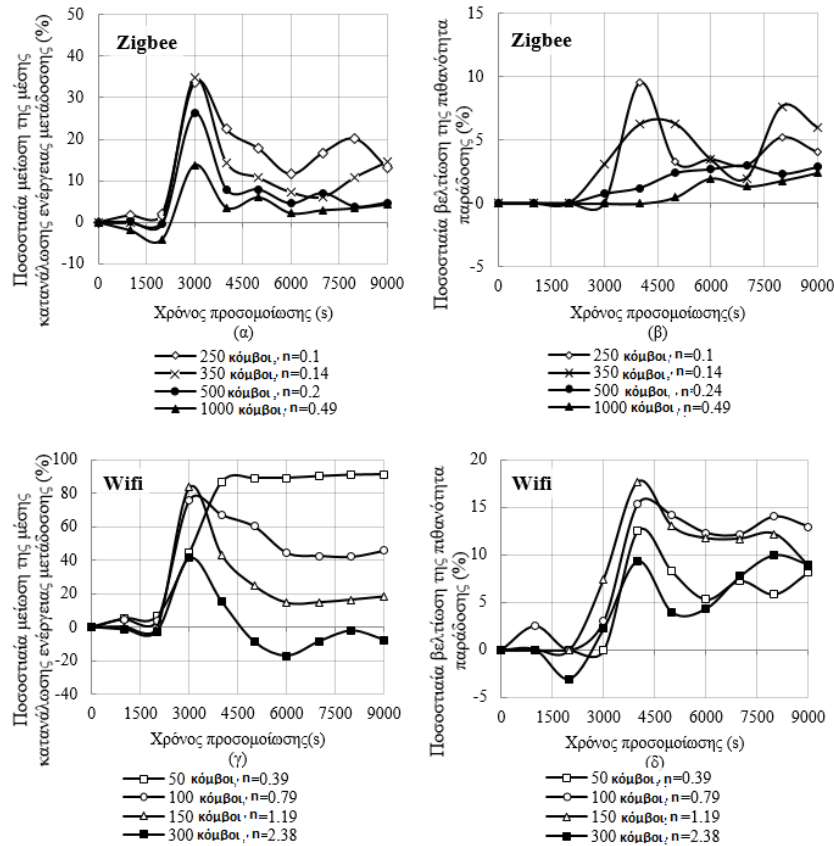
Σχήμα 5.8: Η ποσοστιαία μείωση του  $E_C^{(\%)}$  ως προς το μέγεθος της μνήμης των κόμβων για το NC/MMA σχήμα (Epidemic πρωτόκολλο, χρόνος προσομοίωσης 9000s, ταχύτητα κόμβων 7 – 10m/s).



Σχήμα 5.9: Η ποσοστιαία μείωση του  $E_C^{(\%)}$  ως προς την ταχύτητα των κόμβων για το NC/MMA σχήμα (Epidemic πρωτόκολλο, χρόνος προσομοίωσης 9000s, μέγεθος μνήμης 64kB).

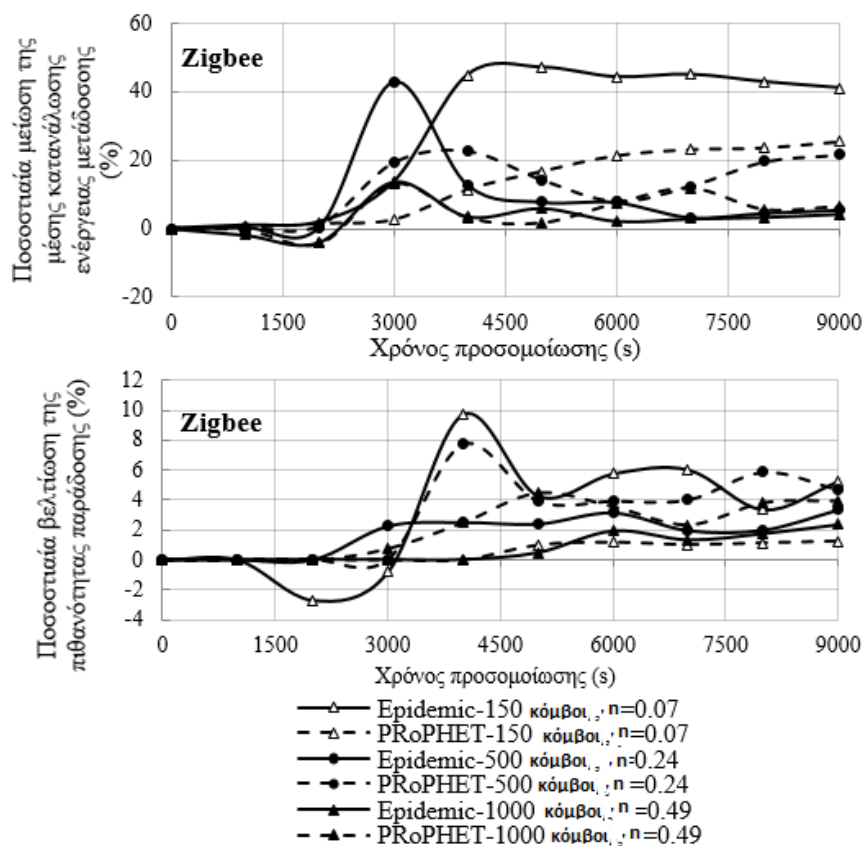
σταθεροποιείται, όντας μεγαλύτερη για αραιά DTN δίκτυα.

Για τη δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων το μέγεθος  $R_{del}^{(\%)}$  είναι αντίθετο του αντίστοιχου



Σχήμα 5.10: Απόδοση του NC/MMA σχήματος ( $E_C^{(\%)}$ ,  $R_{del}^{(\%)}$ ) ως προς το βαθμό των κόμβων (Epidemic πρωτόκολλο, μέγεθος μνήμης 64kB, ταχύτητα κόμβων 7 – 10m/s).





Σχήμα 5.11: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ NC/MMA σχήματος-Epidemic πρωτόκολλο και NC/MA σχήματος-PRoPHET πρωτόκολλο για Zigbee διεπαφή επικοινωνίας (μέγεθος μνήμης 64kB, ταχύτητα κόμβων 7 – 10m/s).

μεγέθους της πρώτης ομάδας προσομοιώσεων. Αν  $E$  η ενέργεια ανά μετάδοση πακέτου, τότε η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο προκύπτει

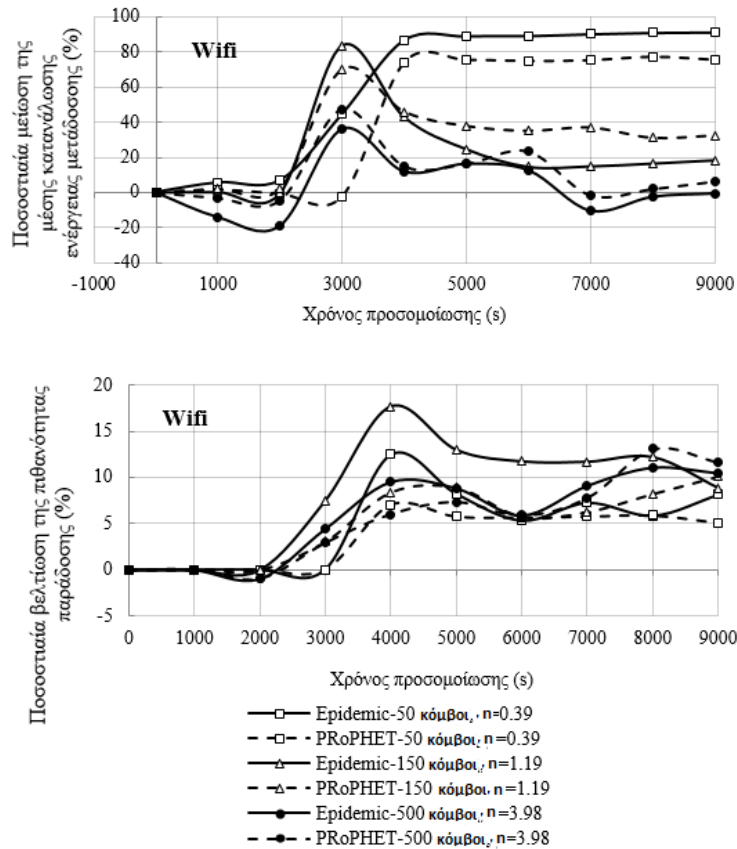
$$E_C = \text{Πλήθος μεταφερόμενων πακέτων} \cdot E \quad (5.5)$$

Η ποσοστιαία μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας  $E_C^{(\%)}$  ορίζεται μέσω της σχέσης

$$E_C^{(\%)} = \frac{E_{C_{noncoded}} - E_{C_{NC/MMA}}}{E_{C_{noncoded}}} \cdot 100\% \quad (5.6)$$

Ειδικά για αραιά DTN δίκτυα που χρησιμοποιούν το WiFi πρωτόκολλο, η αύξηση του  $E_C^{(\%)}$  που προσφέρεται από το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα είναι δραστική. Το διάστημα διακύμανσης της ταχύτητας 7 – 10m/s υιοθετήθηκε και για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις της δεύτερης ομάδας.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της δεύτερης ομάδας προσομοιώσεων φανερώνουν στο σύνολό τους ότι το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα αποδίδει τα ευεργετικά του αποτελέσματα μετά την παρέλευση ενός αρχικού διαστήματος λειτουργίας του δικτύου, δηλαδή μετά



Σχήμα 5.12: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ NC/MMA σχήματος-Epidemic πρωτόκολλο και NC/MA σχήματος-PRoPHET πρωτόκολλο για Zigbee διεπαφή επικοινωνίας (64kB μέγεθος μνήμης, 7 – 10m/s ταχύτητα κόμβων).

τα πρώτα 2000 – 3000s λειτουργίας. Οι προσομοιώσεις δείχνουν, επίσης, ότι το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα αποδίδει καλύτερα σε αραιότερα δίκτυα, για τα οποία οι τιμές του βαθμού των κόμβων είναι της τάξης του 0.1. Επιπλέον, από τα σχήματα είναι φανερό ότι το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα προσφέρει περισσότερο ευεργετικά αποτελέσματα όταν συνδυάζεται με το WiFi πρωτόκολλο επικοινωνίας σε σχέση με το Zigbee ή το Bluetooth. Για το Bluetooth πρωτόκολλο, οι προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι για μεγάλο πλήθος DTN κόμβων (1000 κόμβοι), το NC/MMA σχήμα δεν επηρεάζει τα μεγέθη  $E_C^{(\%)}$  και  $R_{del}^{(\%)}$ . Αυτό οφείλεται στο ότι ακόμα και στην περίπτωση των 1000 κόμβων, ο αντίστοιχος βαθμός των κόμβων παραμένει μικρότερος από 0.01, καθιστώντας το DTN δίκτυο αρκετά αραιό ώστε να μπορεί να επωφεληθεί από την εφαρμογή του NC/MMA σχήματος. Το Σχ. 5.10 δείχνει ότι, όταν το NC/MMA σχήμα συνδυάζεται με το Epidemic πρωτόκολλο, το  $E_C^{(\%)}$  βελτιώνεται αισθητά τόσο για Zigbee όσο και για WiFi, ειδικά για μικρό πλήθος DTN κόμβων. Το  $R_{del}^{(\%)}$  επηρεάζεται θετικά από την εφαρμογή του NC/MMA σχήματος με εύρος διακύμανσης από 10 μέχρι 15%, τόσο για το Zigbee όσο και για το WiFi.

Τα Σχ. 5.11 και 5.12 εμφανίζουν παρόμοια εικόνα όταν το NC/MMA σχήμα συνδυάζεται με το PRoPHET και για τα δύο πρωτόκολλα επικοινωνίας, δηλαδή τόσο για Zigbee όσο

και για WiFi. Συγκεκριμένα, για πολύ αραιά DTN δίκτυα, το NC/MMA σχήμα φαίνεται να μειώνει περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας όταν συνδυάζεται με το Epidemic πρωτόκολλο, καθώς το PRoPHET περιορίζει το πλεονασμό διακινούμενης πληροφορίας μέσω του αλγορίθμου στον οποίο βασίζεται η λειτουργία του. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται το πλήθος των κόμβων του δικτύου, το NC/MMA σχήμα εμφανίζει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά όταν συνδυάζεται με το PRoPHET.

## 5.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό της διατριβής προτάθηκε ένα αυτόνομο σχήμα βασισμένο στην κωδικοποίηση δικτύου, συνδυασμένο με ένα αλγόριθμο διαχείρισης της μνήμης των κόμβων που μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα που περιλαμβάνουν ενεργειακά περιορισμένους κόμβους με μικρή αποθηκευτική ικανότητα. Το προτεινόμενο NC/MMA σχήμα επιτυγχάνει δραστική μείωση της πλεονάζουσας πληροφορίας που διακινείται στο δίκτυο και της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας μετάδοσης δεδομένων του δικτύου με ταυτόχρονη μικρή βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης. Η μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας αντιστοιχεί σε επιμήκυνση της διάρκειας ζωής τους δικτύου, επίπτωση που είναι εξαιρετικά κρίσιμη σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα.



## Κεφάλαιο 6

# Παίγνιο για τη διαχείριση της κινητικότητας στα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα

### 6.1 Εισαγωγή

Τα DTN δίκτυα είναι εξ ορισμού αραιά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που υπόκεινται σε διαλείπουσα συνδεσιμότητα των κόμβων και σε καθυστέρηση παράδοσης δεδομένων στον κόμβο-προορισμό. Τα DTN δίκτυα αποτελούνται από κόμβους με περιορισμένα αποθέματα ενέργειας που αποβλέπουν στον εντοπισμό γειτονικών κόμβων προκειμένου να ανταλλάξουν δεδομένα. Όταν η πυκνότητα των κόμβων του DTN δικτύου είναι χαμηλή, όπως στα αραιά δίκτυα αισθητήρων ή στα ευκαιριακά, κινητά ad hoc δίκτυα, οι κόμβοι παρακινούνται στην ευκαιριακή αξιοποίηση των επαφών μικρής διάρκειας που προκύπτουν. Στο πλαίσιο αυτό, με τις αλλαγές που επιφέρει στην τοπολογία του δικτύου, η κινητικότητα των κόμβων αυξάνει το δυνητικό πλήθος επαφών, καθιστώντας την επικοινωνία των κόμβων με άλλους κόμβους του δικτύου πιθανότερη.

Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες έχουν επιχειρήσει να αξιοποιήσουν τα υπάρχοντα μοντέλα κινητικότητας που υιοθετούν οι κόμβοι ενός δικτύου στην προσπάθεια βελτιστοποίησης της μετάδοσης δεδομένων από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμό. Άλλες προσπάθειες επιχειρούν μέσω της ελεγχόμενης κινητικότητας να ρυθμίσουν την κίνηση των κόμβων σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα (wireless self-organizing DTNs) προκειμένου να βελτιστοποιήσουν την επίδοση του δικτύου ως προς αρκετές παραμέτρους της (βλ. Ενότητα 4.5). Η κατηγορία αυτών των δικτύων αποτελείται από αυτόνομους κόμβους που διαθέτουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν αποφάσεις κατά αποκεντρωμένο τρόπο βάσει της κατάστασής τους, όπως αυτή αποτιμάται από τοπικές παραμέτρους. Η ελεγχόμενη κινητικότητα αποτελεί ενεργό και αρκετά ενδιαφέρον ερευνητικό θέμα που καταδεικνύει τις μελλοντικές τάσεις των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Αν και η κινητικότητα μπορεί να αποβεί ευεργετική για τη λειτουργία των αυτο-οργανούμενων DTN δικτύων, συνοδεύεται από αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Η κατανάλωση

ενέργειας οφείλεται τόσο στη φυσική κίνηση των κόμβων όσο και στην αυξημένη συχνότητα με την οποία οι κόμβοι ανιχνεύουν το δίκτυο λόγω της κίνησής τους [87, 89, 99]. Σε κάθε περίπτωση, η κίνηση των κόμβων συνοδεύεται από ενεργειακό κόστος, που θα αναφέρεται εφεξής ως *κόστος κίνησης*.

Η ύπαρξη κόστους κίνησης εγείρει το εξής δίλημμα: Να κινηθεί ένας DTN κόμβος προκειμένου να αυξήσει την πιθανότητα συνάντησης με κάποιο άλλο κόμβο του δικτύου ή να μείνει ακίνητος περιμένοντας ότι κάποιος άλλος κόμβος του δικτύου θα κινηθεί; Το δίλημμα αυτό σε συνδυασμό με την αντίστοιχη σχέση ανταλλαγής μεταξύ του κόστους κίνησης και της πιθανότητας συνάντησης ενός κόμβου του δικτύου αντιμετωπίζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Η μαθηματική διατύπωση του σχετικού προβλήματος διαχείρισης της κινητικότητας DTN κόμβων πραγματοποιείται με χρήση της θεωρίας παιγνίων που αποτελεί το κατεξοχήν εργαλείο μαθηματικής διατύπωσης σχέσεων ανταλλαγής.

Το αυτόνομο σχήμα ρύθμισης της κινητικότητας των κόμβων που προτείνεται στο κεφάλαιο αυτό [123], παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης της σχέσης ανταλλαγής μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της απόδοσης του δικτύου, όπως αυτή αποτιμάται από το κόστος κίνησης και την πιθανότητα συνάντησης των κόμβων του δικτύου. Η λειτουργία των κόμβων θεωρείται ότι πραγματοποιείται σε χρονοσχιστές διάρκειας  $T$  και στη βασική μορφή του προτεινόμενου σχήματος θεωρείται πλήρως συγχρονισμένη. Η περίπτωση έλλειψης συγχρονισμού των κόμβων μελετάται σε ξεχωριστή ενότητα. Στην αρχή κάθε χρονοσχιστής, κάθε κόμβος προσδιορίζει το κόστος κίνησης, το συγκρίνει με το ήδη προδιορισμένο ενεργειακό του κατώφλιο και αντίστοιχα δεσμεύεται είτε στην κανονική φάση (standard phase) είτε στην φάση παιγνίου (game phase). Κατά την κανονική φάση, οι κόμβοι ακολουθούν συγκεκριμένο μοντέλο κινητικότητας. Στο υπόλοιπο του Κεφ. 6 ως στάση θεωρείται η μη κίνηση του κόμβου στο πλαίσιο του μοντέλου κινητικότητας και ακινητοποίηση η αυτόνομη απόφαση του κόμβου να μην κινηθεί στο πλαίσιο του παιγνίου. Κατά τη φάση παιγνίου, οι κόμβοι αποφασίζουν πιθανοτικά αν θα κινηθούν ακολουθώντας το συγκεκριμένο μοντέλο κινητικότητας ή αν θα μείνουν ακίνητοι. Και οι δύο αποφάσεις συσχετίζονται με οφέλη εκφρασμένα σε όρους κόστους κίνησης και πιθανότητας συνάντησης. Το προτεινόμενο παίγνιο DTN κινητικότητας είναι ένα μη συνεργατικό, δύο στρατηγικών, συμμετρικό παίγνιο που μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτο-οργανούμενα DTN με ελεγχόμενη κινητικότητα.

Το υπόλοιπο του Κεφ. 6 οργανώνεται ως εξής: Η Ενότητα 6.2 αναλύει την κινητικότητα στα DTN δίκτυα. Στην Ενότητα 6.3 διατυπώνεται το παίγνιο  $N$ -κόμβων/παικτών σε συγχρονισμένα DTN δίκτυα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της έλλειψης συγχρονισμού σε ξεχωριστή παράγραφο. Η Ενότητα 6.4 παρουσιάζει το προτεινόμενο αυτόνομο σχήμα που τροποποιεί γνωστά μοντέλα κινητικότητας στην προσπάθεια ρύθμισης της κινητικότητας αυτο-οργανούμενων DTN δικτύων. Τέλος, η Ενότητα 6.6 παρουσιάζει τα συμπεράσματα του Κεφ. 6.

## **6.2 Κινητικότητα στα αυτο-οργανούμενα DTN**

### **6.2.1 Ενεργειακό κόστος κινητικότητας**

Η κινητικότητα στα ασύρματα αυτο-οργανούμενα DTN συνοδεύεται από ενεργειακό κόστος λόγω (i) της φυσικής κίνησης και (ii) της αυξημένης εκπομπής σημάτων ανίχνευσης. Στο κεφάλαιο αυτό, η ελεγχόμενη κινητικότητα ερευνάται στο πλαίσιο της τροποποίησης υπάρχοντων μοντέλων κινητικότητας για DTN αποσκοπώντας στη βέλτιστη αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων με στόχο την επέκταση της διάρκειας ζωής (lifetime) του δικτύου. Θεωρώντας ότι η DTN λειτουργία δομείται σε χρονοσχιμές, στην αρχή κάθε κύκλου, οι αυτόνομοι DTN κόμβοι αποφασίζουν αν θα κινηθούν ακολουθώντας συγκεκριμένο μοντέλο κινητικότητας ή αν θα μείνουν ακίνητοι. Η μείωση την κατανάλωσης ενέργειας μέσω της αποφυγής άκαρπων -υπό την έννοια της αδυναμίας εύρεσης γειτονικού κόμβου- προσπαθειών κίνησης και η ταυτόχρονη εξασφάλιση ότι η πιθανότητα συνάντησης διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα αποτελούν τα βασικά κίνητρα του προτεινόμενου σχήματος.

#### **6.2.1.1 Ενεργειακό κόστος φυσικής κίνησης**

Στο πλαίσιο της λειτουργίας των αυτο-οργανούμενων δικτύων, οι κόμβοι αποφασίζουν αυτόνομα αν θα κινηθούν ή όχι λαμβάνοντας υπόψη το ενεργειακό κόστος της κίνησης. Δεδομένου ότι η φυσική κίνηση των κόμβων εισάγει ένα υψηλό ενεργειακό κόστος, αυτό πρέπει να συνυπολογιστεί στην απόφαση των κόμβων.

#### **6.2.1.2 Ενεργειακό κόστος ανίχνευσης δικτύου λόγω κίνησης**

Μια θεμελιώδης έννοια στα αραιά DTN δίκτυα είναι η ευκαιριακή ανταλλαγή δεδομένων με κόμβους που βρίσκονται εντός εμβέλειας. Προκειμένου να αξιοποιηθούν οι ευκαιρίες επαφών, οι DTN κόμβοι πρέπει να ανιχνεύουν το δίκτυο συχνά προκειμένου να εντοπίζουν γειτονικούς κόμβους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα αραιά DTN δίκτυα ο χρόνος που παρεμβάλλεται μεταξύ διαδοχικών επαφών είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τη χρονική διάρκεια των επαφών. Επιπλέον, η βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι μεγάλο ποσοστό της ενέργειας των κόμβων καταναλώνεται κατά την ανίχνευση του δικτύου για εντοπισμό γειτονικών κόμβων.

Όπως αναφέρεται στο Παράρτημα Α, έχουν γίνει αρκετές ερευνητικές προσπάθειες προκειμένου να ρυθμιστεί η κατανάλωση ενέργειας λόγω ανίχνευσης του δικτύου, είτε με σχήματα παθητικής ανίχνευσης είτε με σχήματα ενεργητικής ανίχνευσης. Βάσει των [124–126], η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα κίνησης των κόμβων. Αυτό σημαίνει ότι κινούμενοι κόμβοι ανιχνεύουν το δίκτυο συχνότερα σε σχέση με την κατάσταση ακινησίας. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό έχει ληφθεί υπόψη στη διατριβή για τον υπολογισμό του κόστους κίνησης.

## 6.2.2 Μοντέλα κινητικότητας και βασικά μεγέθη

Τα μοντέλα κινητικότητας είναι ιδιαίτερος χρήσιμα για τη μελέτη των αυτο-οργανούμενων DTN δικτύων. Οι DTN κόμβοι αποθηκεύουν στους ενταμειυτές τους δεδομένα, πιθανώς για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, μέχρι να συναντήσουν άλλους κόμβους και ανταλλάξουν την αποθηκευμένη πληροφορία. Δεδομένου ότι τα αποθηκευμένα δεδομένα μπορούν να ανταλλαγούν μόνο μεταξύ κόμβων που βρίσκονται σε επαφή, τα στατιστικά μεγέθη που περιγράφουν τη διαδικασία των επαφών είναι μεγάλης σημασίας. Στη διατριβή, η διαδικασία σύναψης επαφών θεωρείται ότι ακολουθεί την ομογενή Poisson κατανομή. Σύμφωνα με το Κεφ. 4, η ομογενής Poisson διαδικασία οδηγεί σε εκθετικά κατανομημένες inter-hitting και inter-meeting χρονικές διάρκειες με ρυθμούς  $\lambda_h$  και  $\lambda_m$ , αντίστοιχα. Βασιζόμενοι στη ιδιότητα της “έλλειψης μνήμης” που χαρακτηρίζει την εκθετική κατανομή, η inter-any-contact διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση ομογενών Poisson διαδικασιών, έκαστη των οποίων ακολουθεί την εκθετική κατανομή με ρυθμό ανά ζεύγος ίσο είτε με  $\lambda_h$  είτε με  $\lambda_m$ . Επομένως, η inter-any-contact χρονική διάρκεια κατανέμεται εκθετικά με ρυθμό ίσο με το άθροισμα των ρυθμών των επιμέρους Poisson διαδικασιών από τις οποίες συντίθεται.

Αν  $T$  η διάρκεια χρονοσχισμής ενός DTN δικτύου με  $N$  κόμβους και  $\alpha$  η πιθανότητα κάποιος κόμβος να βρίσκεται σε κίνηση, αποκαλούμενη εφεξής παράμετρος κινητικότητας, τότε

$$T = \tau + T_p \quad (6.1)$$

όπου  $\tau = \alpha \cdot T$  -παράμετρος γνωστή και ως χρονική διάρκεια κίνησης- και  $T_p = (1 - \alpha) \cdot T$  -παράμετρος γνωστή και ως χρονική διάρκεια στάσης- οι χρονικές περίοδοι κατά τις οποίες ένας DTN κόμβος κινείται ή είναι ακίνητος, αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια μια χρονοσχισμής, η πιθανότητα ένας κινούμενος κόμβος να συναντήσει τουλάχιστον ένα από τους υπόλοιπους  $N - 1$  κινούμενους κόμβους συμβολίζεται ως  $p_N^{(meet)}$ . Θεωρώντας συγχρονισμένη λειτουργία των κόμβων που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια αυτο-οργανούμενη τεχνική συγχρονισμού [127] και ότι οι διαδικασίες επαφών ακολουθούν κατάλληλα ορισμένες ομογενείς Poisson κατανομές, η πιθανότητα κάποιος κόμβος να συναντήσει τουλάχιστον ένα από τους υπόλοιπους  $N - 1$  κόμβους του DTN δικτύου κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής είναι ίση με

$$p_{enc} = P_N^{(meet)} = 1 - e^{-(N-1) \cdot \lambda_m \cdot \alpha \cdot T} \quad (6.2)$$

όπου η παράμετρος  $\lambda_m$  εξαρτάται από το Poisson μοντέλο κινητικότητας που ακολουθείται.

Αν  $p_0$  η μέση αύξηση της ισχύος εκπομπής λόγω ανίχνευσης ανά μονάδα χρόνου και  $e_0$  η μέση αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα απόστασης, η μέση αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής λόγω κινητικότητας είναι ίση με

$$\Delta E = e_0 \cdot E[L] + p_0 \cdot \alpha \cdot T \quad (6.3)$$



όπου  $E[L]$  η μέση απόσταση κίνησης εξαρτώμενη από το σχήμα της περιοχής ανάπτυξης.

Αν  $E$  η εναπομένουσα ενέργεια ενός DTN κόμβου, το κανονικοποιημένο ενεργειακό κόστος κίνησης, λόγω τόσο της φυσικής κίνησης όσο και της αυξημένης ανίχνευσης, είναι

$$x = \Delta E/E \quad (6.4)$$

### 6.3 Διατύπωση του παιγνίου κινητικότητας στα DTN δίκτυα

Έστω ένα αραιό DTN με συγχρονισμένους κόμβους που αποσκοπούν στην ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ τους. Οι δικτυακές παράμετροι, όπως η χρονική διάρκεια κάθε κύκλου  $T$ , το ενεργειακό κόστος κίνησης  $\Delta E$ , η επιφάνεια της περιοχής ανάπτυξης  $A(m^2)$ , η εμβέλεια των κόμβων  $r(m)$  και το πλήθος των DTN κόμβων  $N$ , όπως και οι παράμετροι του ομογενούς Poisson μοντέλου κινητικότητας, όπως η παράμετρος κίνησης  $\alpha$  και η μέση ταχύτητα των κόμβων  $u(m/s)$  είναι εξ αρχής γνωστά. Σύμφωνα με την Ενότητα 6.5, οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση των  $\lambda_h$  και  $\lambda_m$  και του κατωφλίου του κόστους κίνησης το οποίο, με βάση το προτεινόμενο σχήμα, ρυθμίζει τη λειτουργία των κόμβων. Κατά τη διάρκεια της DTN λειτουργίας, οι κόμβοι πρέπει να μετρούν μόνο την εναπομένουσα στην αρχή κάθε κύκλου ενέργειά τους. Η διατύπωση του παιγνίου της DTN κίνησης βασίζεται στη λογική ότι, προκειμένου να αυξηθεί η πιθανότητα συνάντησης, οι DTN κόμβοι ενδέχεται να αποφασίσουν να κινηθούν. Από την άλλη πλευρά, προκειμένου να αποφύγουν το ενεργειακό κόστος που συνοδεύει την κίνησή τους, οι κόμβοι ενδέχεται να παραμείνουν ακίνητοι. Στο υπό διατύπωση DTN παίγνιο, το όφελος της κίνησης προκειμένου να αυξηθεί η πιθανότητα συνάντησης αντισταθμίζεται από το κόστος κίνησης. Το υπό διατύπωση παίγνιο είναι ένα μη συνεργατικό, δύο στρατηγικών, συμμετρικό παίγνιο το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί στα αυτο-οργανούμενα DTN με ελεγχόμενη κινητικότητα.

#### 6.3.1 Παίγνιο δύο κόμβων/παικτών

Με αναφορά στο παίγνιο της DTN κινητικότητας δύο κόμβων/παικτών, ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει τα οφέλη δύο συγχρονισμένων DTN κόμβων/παικτών που βρίσκονται εντός εμβέλειας, προκειμένου να ανταλλάξουν αποθηκευμένη πληροφορία. Έστω  $x = \Delta E/E$ ,  $1 < x \leq 1$  το κανονικοποιημένο κόστος κίνησης (βλ. (6.3) και (6.4)). Ο Πίν. 6.1 αντανακλά το σκεπτικό ότι, προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια, ένας κόμβος δεν θα κινηθεί αν πιστεύει ότι ο άλλος κόμβος θα κινηθεί.

Συγκεκριμένα, όταν και οι δύο κόμβοι αποφασίσουν να κινηθούν, το όφελός τους είναι

		Παίκτης 2	
		κινούμαι ( $1 - p_s$ )	μένω ακίνητος ( $p_s$ )
Παίκτης 1	κινούμαι ( $1 - p_s$ )	$[(1 - x) \cdot p^{(meet)}, (1 - x) \cdot p^{(meet)}]$	$[(1 - x) \cdot p^{(hit)}, p^{(hit)}]$
	μένω ακίνητος ( $p_s$ )	$[p^{(hit)}, (1 - x) \cdot p^{(hit)}]$	(0, 0)

Πίνακας 6.1: Τα οφέλη των κόμβων/παικτών  $n_1$  και  $n_2$  στον παίγνιο DTN κινητικότητας δύο κόμβων/παικτών.

ίσο με  $(1 - x) \cdot p^{(meet)}$ , όπου

$$p^{(meet)} = 1 - e^{-\lambda_m} \cdot \alpha \cdot T \quad (6.5)$$

η πιθανότητα να συναντηθούν δύο κινούμενοι κόμβοι κατά τη φάση κίνησης τους. Όταν ο ένας κόμβος αποφασίσει να μείνει ακίνητος και ο άλλος αποφασίσει να κινηθεί, ο ακίνητος κόμβος έχει όφελος ίσο με  $1 \cdot p^{(hit)}$ , όπου

$$p^{(hit)} = 1 - e^{-\lambda_h} \cdot \alpha \cdot T \quad (6.6)$$

η πιθανότητα ένας ακίνητος κόμβος να συναντήσει ένα κινούμενο κατά τη φάση κίνησής του. Από την άλλη πλευρά, το όφελος του κινούμενου κόμβου μειώνεται κατά το κανονικοποιημένο κόστος κίνησης και γίνεται  $(1 - x) \cdot p^{(hit)}$ . Όταν και οι δύο κόμβοι αποφασίσουν να μείνουν ακίνητοι, η πιθανότητα συνάντησής τους τείνει στο μηδέν. Προκειμένου να δοθεί έμφαση στη σημασία της κίνησης, το παίγνιο μηδενίζει το όφελος στην περίπτωση αυτή. Στον Πίνακα 6.1,  $p_s$  είναι η πιθανότητα που έχει αντιστοιχηθεί στην απόφαση του κόμβου να μείνει ακίνητος η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μικτής NE στρατηγικής. Η ύπαρξη αμιγούς και μικτής NE στρατηγικής πραγματοποιείται στο Παράρτημα Γ.1.

### 6.3.2 Παίγνιο $N$ κόμβων/παικτών

Η διατύπωση του παιγνίου  $N$  κόμβων/παικτών βασίζεται και αυτή στο σκεπτικό ότι κάποιος κόμβος προτιμά να μείνει ακίνητος αν πιστεύει ότι άλλοι κόμβοι θα κινηθούν. Το παίγνιο παίζεται από κάθε κόμβο  $n_i$  του DTN δικτύου έναντι των υπόλοιπων  $N - 1$  κόμβων, οι οποίοι συγκροτούν κάθε φορά το σύνολο  $\mathbf{n}_{-i} = \{n_1, n_2, \dots, n_{i-1}, n_{i+1}, \dots, n_N\}$  που αποτελείται από όλους τους DTN κόμβους του δικτύου εκτός από τον  $n_i$ . Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κεντρικός συντονισμός των αυτόνομων κόμβων του δικτύου, για το υπό διατύπωση παίγνιο  $N$  παικτών αναζητείται η ύπαρξη μικτής NE στρατηγικής [128]. Στο πλαίσιο αυτό, έστω  $p_s$  η πιθανότητα κάποιος κόμβος, έστω  $n_i$ , να αποφασίσει να μείνει ακίνητος. Η πιθανότητα οι κόμβοι που ανήκουν στο  $\mathbf{n}_{-i}$  να μείνουν ακίνητοι είναι ίση με  $p_s^{N-1}$ , ενώ η πιθανότητα

		$\mathbf{s}_{-i}$	
		$k$ κόμβοι από τους $n_{-i}$ κινούνται ( $1 - p_s^{N-1}$ )	Όλοι οι κόμβοι στο $n_{-i}$ μένουν ακίνητοι ( $p_s^{N-1}$ )
$\mathbf{s}_i$	ο $n_i$ κινείται ( $1 - p_s$ )	$(1 - x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)}) \cdot (1 - p_s^{N-1})$	$(1 - x) \cdot p_N^{(hit)} \cdot p_s^{N-1}$
	ο $n_i$ μένει ακίνητος ( $p_s$ )	$1 \cdot \hat{P}_N^{(hit)} \cdot (1 - p_s^{N-1})$	0

Πίνακας 6.2: Τα οφέλη του κόμβου/παίκτη  $n_i$  στον παίγνιο DTN κινητικότητας  $N$  κόμβων/παικτών.

τουλάχιστον ένας από αυτούς να κινηθεί είναι ίση με  $1 - p_s^{N-1}$ .

Το παίγνιο DTN κινητικότητας  $N$  κόμβων/παικτών δομείται σε κύκλους λειτουργίας που συμπίπτουν με τους κύκλους/χρονοσχισμές της DTN λειτουργίας. Το σύνολο των δράσεων κάθε κόμβου  $n_i$ ,  $n_i \in \mathbf{N}$  είναι  $\{\text{κινούμαι, μένω ακίνητος}\}$ . Αυτό συνεπάγεται ότι στην αρχή κάθε κύκλου του παιγνίου, ο κόμβος αποφασίζει αν θα κινηθεί ακολουθώντας το συγκεκριμένο μοντέλο κινητικότητας ή αν θα μείνει ακίνητος. Όπως και στο παίγνιο των δύο κόμβων/παικτών, στην περίπτωση κατά την οποία όλοι οι κόμβοι είναι ακίνητοι, η πιθανότητα συνάντησης μεταξύ κόμβων τείνει στο 0. Αυτό λαμβάνεται υπόψη κατά τη διατύπωση του παιγνίου, μηδενίζοντας τα αντίστοιχα οφέλη των κόμβων.

Πριν διατυπωθεί το παίγνιο  $N$  κόμβων/παικτών, πρέπει να οριστούν οι ακόλουθες πιθανότητες :

- Η πιθανότητα ώστε ο  $n_i$ , ενώ έχει αποφασίσει να κινηθεί, να συναντήσει κατά τη διάρκεια της κίνησής του τουλάχιστον ένα από τους υπόλοιπους  $N - 1$  ακίνητους κόμβους του DTN δικτύου. Η πιθανότητα αυτή είναι ίση με

$$p_N^{(hit)} = 1 - e^{-(N-1) \cdot \lambda_h \cdot a \cdot T} \quad (6.7)$$

- Η πιθανότητα ώστε ο  $n_i$ , ενώ έχει αποφασίσει να κινηθεί, να συναντήσει κατά τη διάρκεια της κίνησής του τουλάχιστον ένα από  $k$  κινούμενους κόμβους του DTN δικτύου. Η πιθανότητα αυτή είναι ίση με

$$p_k^{(meet)} = 1 - e^{-k \cdot \lambda_m \cdot a \cdot T} \quad (6.8)$$

- Η πιθανότητα ώστε ο  $n_i$ , ενώ έχει αποφασίσει να κινηθεί, να συναντήσει κατά τη διάρκεια της κίνησής του τουλάχιστον ένα από  $N - 1 - k$  ακίνητους κόμβους του DTN δικτύου. Η πιθανότητα αυτή είναι ίση με

$$p_{N-1-k}^{(hit)} = 1 - e^{-(N-1-k) \cdot \lambda_h \cdot a \cdot T} \quad (6.9)$$

- Η πιθανότητα ώστε ο  $n_i$ , ενώ έχει αποφασίσει να μείνει ακίνητος, να συναντήσει τουλάχιστον ένα από  $k$  κινούμενους κόμβους του DTN κατά τη διάρκεια της κίνησής τους ισούται με

$$p_k^{(hit)} = 1 - e^{-k \cdot \lambda_n \cdot a \cdot T} \quad (6.10)$$

Δεδομένου ότι οι  $N$  κόμβοι δρουν αυτόνομα, το πλήθος  $k$  των κόμβων που βρίσκονται στη διάρκεια της κίνησής τους θεωρείται τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα  $[1, N - 1]$ . Συνεπώς, οι μέσες τιμές των πιθανοτήτων (6.8), (6.9) και (6.10) είναι ίσες με

$$P_N^{(meet)} = \sum_{k=1}^{N-1} p_k^{(meet)} / (N - 1) \quad (6.11)$$

$$P_N^{(hit)} = \sum_{k=1}^{N-1} p_{N-1-k}^{(hit)} / (N - 1) \quad (6.12)$$

$$\hat{P}_N^{(hit)} = \sum_{k=1}^{N-1} p_k^{(hit)} / (N - 1) \quad (6.13)$$

Στη διατύπωση του παιγνίου που ακολουθεί, οι πιθανότητες  $P_N^{(meet)}$  και  $P_N^{(hit)}$  αντιπροσωπεύουν τις μέσες πιθανότητες ένας κόμβος, έστω  $n_i$ , που συμμετέχει στο παίγνιο DTN κίνησης  $N$  κόμβων/παικτών και έχει αποφασίσει να κινηθεί, να συναντήσει κατά τη διάρκεια της κίνησής του ένα κινούμενο κόμβο ή ένα ακίνητο κόμβο από τους  $\mathbf{n}_{-i}$ , αντίστοιχα.

Στο ίδιο πλαίσιο, η  $\hat{P}_N^{(hit)}$  αντιπροσωπεύει τη μέση πιθανότητα ο  $n_i$  -ενώ έχει αποφασίσει να μείνει ακίνητος για όλη τη διάρκεια του κύκλου, να έλθει σε επαφή με τουλάχιστον ένα κινούμενο κόμβο από τους  $\mathbf{n}_{-i}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τους προηγούμενους ορισμούς και συλλογισμούς, τα οφέλη ενός κόμβου  $n_i$  που συμμετέχει στον παίγνιο DTN κίνησης  $N$  κόμβων/παικτών προκύπτουν ως ακολούθως:

- Αν όλοι οι κόμβοι αποφασίσουν να μείνουν ακίνητοι, τα οφέλη τους μηδενίζονται ώστε να δοθεί έμφαση στη σημασία της κινητικότητας των κόμβων.
- Αν ο  $n_i$  αποφασίσει να κινηθεί, το όφελος του είναι ίσο με

$$(1 - x) \cdot p_N^{(hit)} \cdot p_s^{(N-1)}$$

αν οι υπόλοιποι  $N - 1$  κόμβοι έχουν αποφασίσει όλοι να μείνουν ακίνητοι, ή

$$(1 - x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)}) \cdot (1 - p_s^{N-1})$$

αν τουλάχιστον ένα από τους υπόλοιπους  $N - 1$  κόμβους έχει αποφασίσει να κινηθεί.

- Αν ο  $n_i$  αποφασίσει να μείνει ακίνητος, το όφελος του είναι ίσο με

$$1 \cdot \hat{P}_N^{(hit)} \cdot (1 - p_s^{(N-1)})$$

όπου  $\hat{P}_N^{(hit)}$  η μέση πιθανότητα ο  $n_i$  να συναντήσει κάποιον από τους υπόλοιπους  $N - 1$  κόμβους του δικτύου.

Ο Πίνακας 6.2 απεικονίζει τα οφέλη του  $n_i$  λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των στατηγικών προφίλ  $\mathbf{s}_{-i}$  που ακολουθούνται από τους υπόλοιπους  $N - 1$  κόμβους.

Σε κατάσταση ισορροπίας, για τους κόμβους είναι αδιάφορο αν θα κινηθούν ή αν θα μείνουν ακίνητοι. Εξισώνοντας τα αντίστοιχα οφέλη

$$u_i(\text{ο } n_i \text{ κινείται, } \mathbf{s}_{-i}) = u_i(\text{ο } n_i \text{ μένει ακίνητος, } \mathbf{s}_{-i})$$

προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση

$$(1 - x) \cdot p_N^{(hit)} \cdot p_s^{N-1} + (1 - x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)}) \cdot (1 - p_s^{N-1}) = 0 \cdot p_s^{N-1} + 1 \cdot \hat{P}_N^{(hit)} \cdot (1 - p_s^{N-1}) \quad (6.14)$$

Όπως αποδεικνύεται στο Παράρτημα Γ.2.1, για το ανωτέρω παίγνιο  $N$  κόμβων/παικτών, υπάρχει NE μικτής στρατηγικής όταν

$$x > E_{th} \quad (6.15)$$

όπου

$$E_{th} = 1 - \frac{\hat{P}_N^{(hit)}}{P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)}} \quad (6.16)$$

το κανονικοποιημένο ενεργειακό κατώφλιο, υπέρβαση του οποίου δίνει έναυσμα για το παίγνιο κινητικότητας των DTN κόμβων. Στην ισορροπία, η πιθανότητα κάποιος κόμβος να παραμείνει ακίνητος είναι ίση με

$$p_s(x) = \left( \frac{\hat{P}_N^{(hit)} - (1 - x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)})}{\hat{P}_N^{(hit)} - (1 - x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)} - p_N^{(hit)})} \right)^{\frac{1}{N-1}} \quad (6.17)$$

Ενώσω το κανονικοποιημένο κόστος κίνησης  $x$  είναι μικρότερο του  $E_{th}$ , οι DTN κόμβοι ακολουθούν το Poisson μοντέλο κινητικότητας που είναι κατάλληλο για τη συγκεκριμένη DTN λειτουργία και δεν εμπλέκονται στο παίγνιο. Η πιθανότητα συνάντησης στην κανονική αυτή φάση λειτουργίας προκύπτει από την (6.2).

Όταν το  $x$  υπερβεί το  $E_{th}$ , το κανονικοποιημένο κόστος κίνησης καθίσταται σημαντικό, ωθώντας τους DTN κόμβους να εμπλακούν στη φάση παιγνίου, κατά την οποία οι κόμβοι αποφασίζουν πιθανοτικά αν θα κινηθούν, ακολουθώντας το συγκεκριμένο Poisson μοντέλο κινητικότητας, ή αν θα μείνουν ακίνητοι. Στο πλαίσιο αυτό, ένας DTN κόμβος αποφασίζει

να κινηθεί με πιθανότητα

$$p_{move}(x) = 1 - p_s(x) \quad (6.18)$$

Η πιθανότητα συνάντησης κατά τη φάση παιγνίου είναι ίση με

$$p_{enc}^*(x) = p_{move}(x) \cdot [p_N^{(hit)} \cdot p_s^{N-1} + (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)}) \cdot (1 - p_s^{N-1})] + (1 - p_{move}(x)) \cdot \hat{P}_N^{(hit)} \cdot (1 - p_s^{N-1}) \quad (6.19)$$

### 6.3.3 Μη συγχρονισμένα DTN δίκτυα

Τα πλήρως συγχρονισμένα δίκτυα ξεκινούν τη λειτουργία τους ταυτόχρονα και οι κόμβοι τους ακολουθούν κατά συγχρονισμένο τρόπο το Poisson μοντέλο κινητικότητας που έχει υιοθετηθεί για συγκεκριμένη DTN λειτουργία. Όταν τα δίκτυα δεν είναι πλήρως συγχρονισμένα, οι χρονοσχισμές των κόμβων δεν είναι πλήρως συγχρονισμένες. Επομένως, κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής, το πλήθος των κόμβων που βρίσκονται στη φάση κίνησης του μοντέλου κινητικότητας που ακολουθείται αποτελεί τυχαία διαδικασία, έστω  $k(t)$ . Υπό την υπόθεση ότι η  $k(t)$  είναι εργοδική, οι μέσες πιθανότητες που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν την πιθανότητα συνάντησης κατά την κανονική φάση όπως και τα οφέλη κατά τη φάση παιγνίου υπολογίζονται λαμβάνοντας τις αντίστοιχες μέσες στατιστικές τιμές, θεωρώντας ότι η  $k(t)$  είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα  $[1, N - 1]$ .

Κατά την κανονική φάση, η πιθανότητα ένας κόμβος να συναντήσει τουλάχιστον ένα άλλο κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής  $T$  είναι ίσο με

$$p'_{enc} = P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)} + Q_N^{(hit)} \quad (6.20)$$

όπου

$$Q_N^{(hit)} = \sum_{k=1}^{N-1} q_k^{(hit)} / (N - 1) \quad (6.21)$$

και

$$q_k^{(hit)} = 1 - e^{-k \cdot \lambda_h \cdot (1-a) \cdot T} \quad (6.22)$$

είναι η πιθανότητα ένας κόμβος, κατά τη διάρκεια της στάσης του, να συναντήσει τουλάχιστον ένα από  $k$  κινούμενους κόμβους. Ο τελευταίος όρος της (6.20) αντανακλά την επίδραση έλλειψης συγχρονισμού κατά την κανονική φάση.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η έλλειψη συγχρονισμού και τη φάση παιγνίου του προτεινόμενου αυτόνομου σχήματος που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα, πρέπει να προσδιοριστούν τα αντίστοιχα οφέλη ενός κόμβου, έστω  $n_i$ . Συγκεκριμένα, έστω  $p'_s$  η πιθανότητα που ανατίθεται στην αμιγή στρατηγική “μένω ακίνητος” και αντιστοιχεί στην πιθανότητα  $p_s$  των πλήρως συγχρονισμένων DTN δικτύων. Τότε:

- Όπως και στα πλήρως συγχρονισμένα DTN, αν όλοι οι κόμβοι αποφασίσουν να μεί-

νων ακίνητοι, τα οφέλη τους μηδενίζονται ώστε να δοθεί έμφαση στη σημασία της κινητικότητας.

- Αν ο  $n_i$  αποφασίσει να κινηθεί, το όφελός του είναι ίσο με

$$(1 - x) \cdot p_N^{(hit)} \cdot p_s'^{N-1}$$

αν οι υπόλοιποι  $N - 1$  κόμβοι αποφασίσουν να μείνουν ακίνητοι, ή

$$(1 - x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)} + Q_N^{(hit)}) \cdot (1 - p_s'^{N-1})$$

αν  $k$  από τους  $N - 1$  DTN κόμβους κινούνται και οι υπόλοιποι  $N - 1 - k$  δεν κινούνται (βλ. (6.11), (6.12) και (6.13))

- Αν ο  $n_i$  αποφασίσει να μείνει ακίνητος, το όφελός του είναι ίσο με

$$1 \cdot \tilde{Q}_N^{(hit)} \cdot (1 - p_s'^{N-1})$$

όπου

$$\tilde{Q}_N^{(hit)} = \sum_{k=1}^{N-1} \tilde{q}_k^{(hit)} / (N - 1) \quad (6.23)$$

είναι η πιθανότητα ο  $n_i$  να συναντήσει τουλάχιστον ένα από  $k$  κινούμενους κόμβους και

$$\tilde{q}_k^{(hit)} = 1 - e^{-k \cdot \lambda_n \cdot T} \quad (6.24)$$

Η ερμηνεία του  $\tilde{q}_k^{(hit)}$  υποδηλώνει ότι κατά τη διάρκεια ενός κύκλου του παιχνιδιού βρίσκονται σε κίνηση  $k$  κόμβοι.

Όπως αποδεικνύεται στο Παράρτημα Γ.2.2, υπάρχει μικτή NE στατηγική για το υπό μελέτη DTN παιχνίδι κινητικότητας υπό έλλειψη πλήρους συγχρονισμού υπάρχει εφόσον

$$x > E'_{th} \quad (6.25)$$

όπου

$$E'_{th} = 1 - \frac{\tilde{Q}_N^{(hit)}}{P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)} + Q_N^{(hit)}} \quad (6.26)$$

Η πιθανότητα ένας κόμβος να αποφασίσει να μείνει ακίνητος σε κατάσταση ισορροπίας προκύπτει

$$p'_s(x)^{(N-1)} = \frac{\tilde{Q}_N^{(hit)} - (1 - x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)} + Q_N^{(hit)})}{\tilde{Q}_N^{(hit)} - (1 - x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)} + Q_N^{(hit)} - p_N^{(hit)})} \quad (6.27)$$

Επομένως, η πιθανότητα ένας DTN κόμβος να αποφασίσει να κινηθεί σε κατάσταση ισοροπίας είναι

$$p'_{move}(x) = 1 - p'_s(x) \quad (6.28)$$

Τέλος, στη φάση παιγνίου του DTN παιγνίου κινητικότητας υπό έλλειψη πλήρους συγχρονισμού, η πιθανότητα συνάντησης προκύπτει

$$p *'_{enc}(x) = p'_{move}(x) \cdot [p_N^{(hit)} \cdot p_s'^{N-1} + (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)} + Q_N^{(hit)}) \cdot (1 - p_s'^{N-1})] + (1 - p'_{move}(x)) \cdot \tilde{Q}_N^{(hit)} \cdot (1 - p_s'^{N-1}) \quad (6.29)$$

## 6.4 Το προτεινόμενο αυτόνομο σχήμα ρύθμισης της κινητικότητας σε DTN δίκτυα

Το προτεινόμενο αυτόνομο σχήμα τροποποιεί τα Poisson μοντέλα κινητικότητας, ρυθμίζοντας την κίνηση των κόμβων με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας που οφείλεται τόσο στη φυσική κίνηση όσο και στην αυξημένη συχνότητα ανίχνευσης δικτύου. Για να υλοποιηθεί το προτεινόμενο σχήμα, η DTN λειτουργία οργανώνεται σε δύο φάσεις: την κανονική φάση και τη φάση παιγνίου. Κατά τη διάρκεια της κανονικής φάσης, οι κόμβοι ακολουθούν το μοντέλο κινητικότητας που έχει υιοθετηθεί για τη DTN λειτουργία. Κατά τη φάση παιγνίου, η απόφαση ενός κόμβου για το αν θα κινηθεί ακολουθώντας το συγκεκριμένο μοντέλο κινητικότητας ή αν θα μείνει ακίνητος βασίζεται στο πάγνιο κινητικότητας  $N$  παικτών που διατυπώθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Πριν την εκκίνηση της DTN λειτουργίας, το ενεργειακό κατώφλιο του κόστους κίνησης προσδιορίζεται βάσει των παραμέτρων του δικτύου και του μοντέλου κινητικότητας που υιοθετείται. Στην αρχή κάθε χρονοσχισμός/κύκλου οι κόμβοι αποτιμούν το κανονικοποιημένο κόστος κίνησης  $x = \Delta E/E$ , το συγκρίνουν με το ενεργειακό κατώφλιο  $E_{th}$  και εμπλέκονται είτε στην κανονική φάση ( $x \leq E_{th}$ ) είτε στη φάση παιγνίου ( $x > E_{th}$ ).

Ενώσω  $x < E_{th}$ , το κανονικοποιημένο κόστος κίνησης είναι χαμηλό, οπότε ο κόμβος βρίσκεται στην κανονική φάση, κατά τη διάρκεια της οποίας ακολουθεί συγκεκριμένο Poisson μοντέλο κινητικότητας, δηλαδή αυτό που θεωρείται κατάλληλο για τη συγκεκριμένη DTN λειτουργία. Έστω ότι τη χρονική στιγμή  $t = t_0$  το κανονικοποιημένο κόστος κίνησης  $x$  φθάνει την τιμή του κατωφλίου  $E_{th}$ . Εφεξής, το κόστος κίνησης καθίσταται σημαντικό, ενεργοποιώντας τη φάση παιγνίου του σχήματος, κατά την οποία, στην εκκίνηση των διαδοχικών κύκλων, οι κόμβοι αποφασίζουν πιθανοτικά, βάσει της (6.18), αν θα κινηθούν ακολουθώντας το συγκεκριμένο μοντέλο κινητικότητας ή αν θα μείνουν ακίνητοι. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της φάσης παιγνίου, πραγματοποιείται η ακόλουθη επαναλαμβανόμενη διαδικασία:

1. Οι χρονικές στιγμές  $t = t_0 = q \cdot T, q = 0, 1, 2, \dots$ , σηματοδοτούν νέους κύκλους της φάσης παιγνίου. Σε αυτές τις χρονικές στιγμές και έχοντας υπερβεί το κανονικο-



ποιημένο ενεργειακό κατάφλιο, οι κόμβοι συμμετέχουν στο παίγνιο κινητικότητας  $N$  κόμβων/παικτών που αναλύεται στην Παρ. 6.3.2, σύμφωνα με το οποίο αποφασίζουν πιθανοτικά αν θα κινηθούν ακολουθώντας το συγκεκριμένο Poisson μοντέλο κινητικότητας ή αν θα μείνουν ακίνητοι.

2. Η φάση παιγνίου συνεχίζεται μέχρις εξάντλησης της ενέργειας των κόμβων, δηλαδή μέχρι  $x = 1$ .

Η μέση κατανάλωση ενέργειας ανά κύκλο όταν οι κόμβοι ακολουθούν το προτεινόμενο παίγνιο DTN κινητικότητας είναι ίση με

$$C_{E,G}(x) = \begin{cases} \Delta E & 0 \leq x \leq E_{th} \\ p_{move}(x) \cdot \Delta E & E_{th} < x < 1 \end{cases} \quad (6.30)$$

Η αντίστοιχη πιθανότητα συνάντησης  $P_{enc,G}$  είναι ίση με

$$P_{enc,G}(x) = \begin{cases} p_{enc} & 0 \leq x \leq E_{th} \\ p_{enc}^*(x) \cdot \Delta E & E_{th} < x < 1 \end{cases} \quad (6.31)$$

όπου  $p_{enc}$  δίνεται από την (6.2).

Υπό έλλειψη πλήρους συγχρονισμού, τα αντίστοιχα μεγέθη  $C'_{E,G}(x)$  και  $P'_{enc,G}(x)$  προσδιορίζονται από τις (6.30), (6.31) αντικαθιστώντας τις  $p_{move}(x)$ ,  $p_{enc}$  και  $p_{enc}^*(x)$  με τις αντίστοιχες ποσότητες  $p'_{move}(x)$ ,  $p'_{enc}$  και  $p_{enc}^{*'}(x)$  που σχετίζονται με τη λειτουργία υπό ελλιπή συγχρονισμό.

#### 6.4.1 Μεγέθη αποτίμησης της επίδοσης του προτεινομενου σχήματος

Με βάση τις (6.30) and (6.31), ορίζονται ως κατάλληλα τα ακόλουθα μέτρα επίδοσης, η ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανά κύκλο

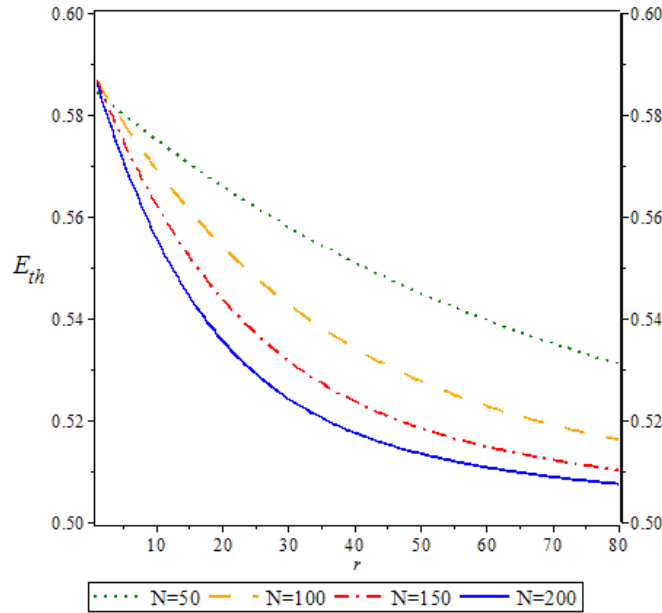
$$\Delta C^{(\%)} = 100\% \cdot \int_{E_{th}}^1 \left( \frac{\Delta E - C_{E,G}(x)}{\Delta E} \right) dx = 100\% \int_{E_{th}}^1 p_s(x) dx \quad (6.32)$$

και η ποσοστιαία μείωση της πιθανότητας συνάντησης

$$\Delta P^{(\%)} = 100\% \cdot \int_{E_{th}}^1 \frac{p_{enc} - P_{enc,G}(x)}{p_{enc}} dx = 100\% \cdot \int_{E_{th}}^1 \left( 1 - \frac{P_{enc,G}(x)}{p_{enc}} \right) dx \quad (6.33)$$

### 6.5 Αριθμητικά αποτελέσματα

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν αποσκοπούν στην αξιολόγηση του κατά πόσο το προτεινόμενο σχήμα διαχειρίζεται αποδοτικά τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της μείω-



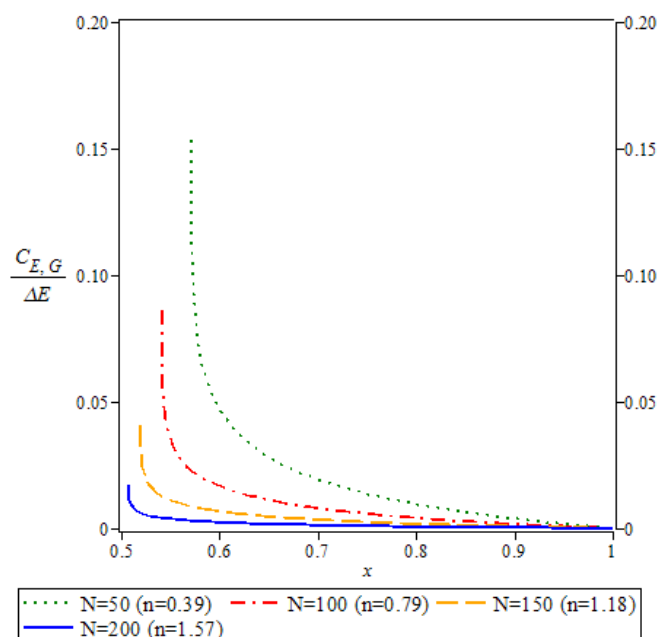
Σχήμα 6.1: Εξάρτηση του κανονικοποιημένου ενεργειακού κατωφλίου  $E_{th}$  ως προς το  $N$ , ( $r = 50m$ ,  $a = 0.75$ ,  $u = 1m/s$ ).

σης της κατανάλωσης ενέργειας και της μείωσης της πιθανότητας συνάντησης. Η προσομοίωση πραγματοποιείται για ένα DTN δίκτυο σε περιοχή ανάπτυξης με επιφάνεια  $A = (1000 \times 1000)m^2$  αποτελούμενο από κινητούς DTN κόμβους που ακολουθούν το RWP μοντέλο κινητικότητας. Στο πλαίσιο του RWP,  $\lambda_h = (8 \cdot r \cdot u \cdot w) / (\pi \cdot A)$  και  $\lambda_m = \alpha \cdot 1.75 + 2 \cdot (1 - \alpha)$ , όπου  $w = 1.3683$ . Αν  $d = N/A$  η πυκνότητα των κόμβων και  $r$  η εμβέλεια εκπομπής, η τιμή του βαθμού των κόμβων,  $n = \pi \cdot d \cdot r^2$ , οφείλει να είναι μικρότερη της  $n_t = 4.5$ , προκειμένου να προσομοιωθούν ρεαλιστικά DTN σενάρια. Οι τιμές των  $u$  και  $r$  που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις είναι τυπικές τιμές που εμφανίζονται στα αυτο-οργανούμενα δίκτυα και κυμαίνονται μεταξύ  $1 - 15m/s$  και  $10 - 15m$ , αντίστοιχα [129, 130].

Θεωρώντας ότι η ταχύτητα  $u$  είναι σταθερή καθ'όλη τη DTN λειτουργία, η χρονική διάρκεια της κίνησης για το RWP μοντέλο κινητικότητας είναι ίση με  $\tau = E[L]/u$ . Τυπικές τιμές του  $E[L]$  προσεγγίζονται μέσω της σχέσης  $0.53 \cdot \sqrt{A} / (\alpha \cdot u)$  [39, 59, 60].

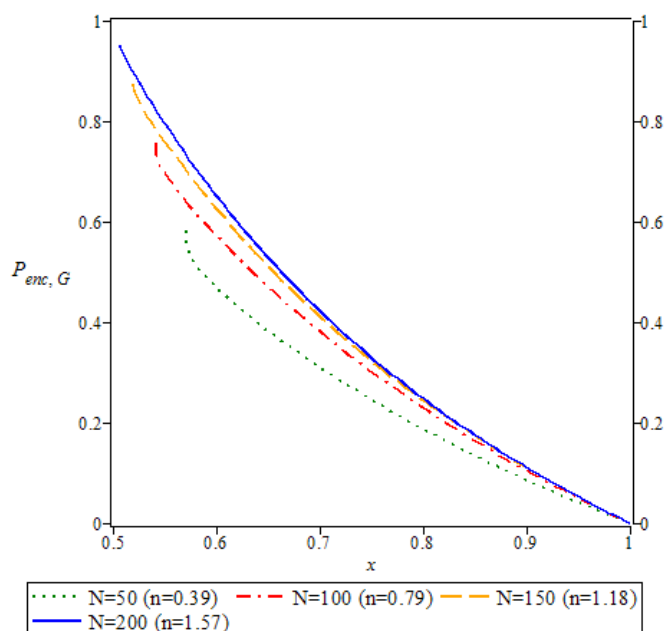
Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν θεωρώντας ότι οι DTN κόμβοι ακολουθούν το RD μοντέλο κινητικότητας εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά με αυτά που προέκυψαν για το RWP. Επομένως, οι προσομοιώσεις για το RD παραλείπονται. Επιπλέον, η ταχύτητα  $u$  τίθεται ίση με  $1m/s$ , καθώς τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι επηρεάζονται ελάχιστα από τις μεταβολές της.

Το Σχ. 6.1 απεικονίζει την εξάρτηση του κανονικοποιημένου ενεργειακού κατωφλίου  $E_{th}$  από το  $r$  για διάφορες τιμές του  $N$ . Από το σχήμα αυτό γίνεται φανερό ότι, όταν οι τιμές του  $E_{th}$  είναι χαμηλές, η φάση παιγνίου αρχίζει νωρίτερα σε πυκνά DTN. Όπως ήταν αναμενόμενο, η ίδια τάση παρατηρείται από γραφήματα του  $E_{th}$  ως προς το  $N$  για διάφορες τιμές του  $r$ .

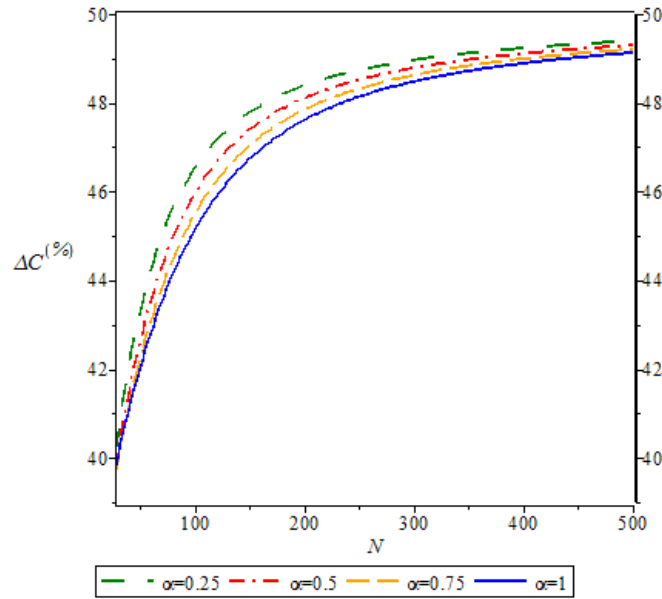


Σχήμα 6.2: Κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας στη φάση παιγνίου ως συνάρτηση του  $x$  για διάφορες τιμές του  $N$  ( $r = 50m$ ,  $a = 0.75$ ,  $u = 1m/s$ ).

Στο Σχ. 6.2 η κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας ανά κύκλο  $C_{E,G}(x)/\Delta E$  απεικονίζεται ως συνάρτηση του κανονικοποιημένου κόστους κίνησης  $x$  κατά τη διάρκεια της φάσης παιγνίου ( $E_{th} < x < 1$ ) για διάφορες τιμές του  $N$ . Είναι φανερό ότι όταν το κόστος κίνησης  $\Delta E$  είναι μεγάλο συγκριτικά με την εναπομένουσα ενέργεια, οι κόμβοι προτιμούν



Σχήμα 6.3: Η πιθανότητα συνάντησης στη φάση παιγνίου ως συνάρτηση του  $x$  για διάφορες τιμές του  $N$  ( $r = 50m$ ,  $a = 0.75$ ,  $u = 1m/s$ ).

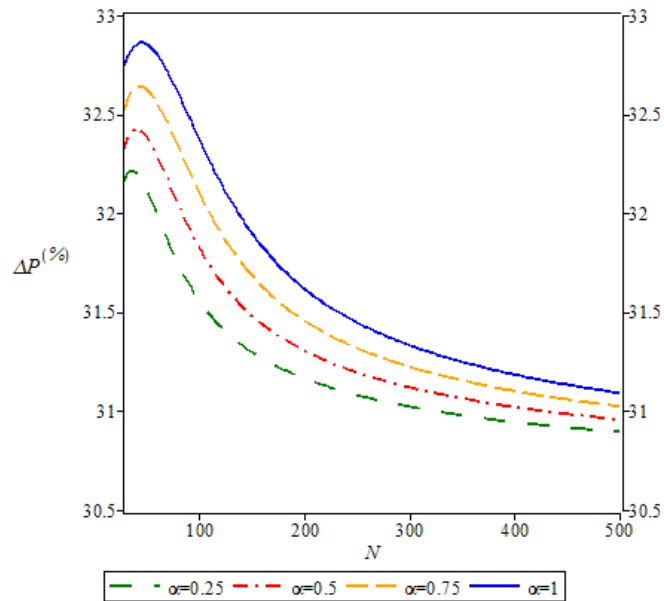


Σχήμα 6.4: Ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων  $N$  για διάφορες τιμές της παραμέτρου κίνησης  $\alpha$  ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ).

να μένουν ακίνητοι. Η ίδια τάση παρατηρείται από τα διαγράμματα του  $C_{E,G}(x)/\Delta E$  ως προς το  $x$  για διάφορες τιμές του  $r$  που αποκαλύπτουν ότι η μείωση στην κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή το ενεργειακό όφελος που προσφέρει το προτεινόμενο σχήμα, είναι μεγαλύτερη σε πυκνά DTN δίκτυα (στα οποία είτε το  $r$  είτε το  $N$  είναι υψηλά), καθώς η φάση παιγνίου εκκινεί σχετικά νωρίτερα.

Το Σχ. 6.3 απεικονίζει την εξάρτηση της πιθανότητας συνάντησης  $P_{enc,G}(x)$  από το κανονικοποιημένο κόστος κίνησης  $x$  κατά τη διάρκεια της φάσης παιγνίου του προτεινόμενου σχήματος. Είναι φανερό ότι η συμπεριφορά του μεγέθους  $P_{enc,G}(x)$  είναι αντίθετη της αντίστοιχης συμπεριφοράς του μεγέθους  $C_{E,G}(x)/\Delta E$ . Στην πραγματικότητα, η μείωση του  $P_{enc,G}(x)$  όσο αυξάνεται το  $x$ , δηλαδή το κόστος που επιφέρει το προτεινόμενο σχήμα είναι αισθητά μεγαλύτερο σε αραιά DTN δίκτυα. Η αντίθετη συμπεριφορά του κόστους (μείωση του  $P_{enc,G}(x)$ ) και του οφέλους (μείωση του  $C_{E,G}(x)/\Delta E$ ) όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων αντικατοπτρίζεται στα αθροιστικά μεγέθη που μελετώνται ακολούθως.

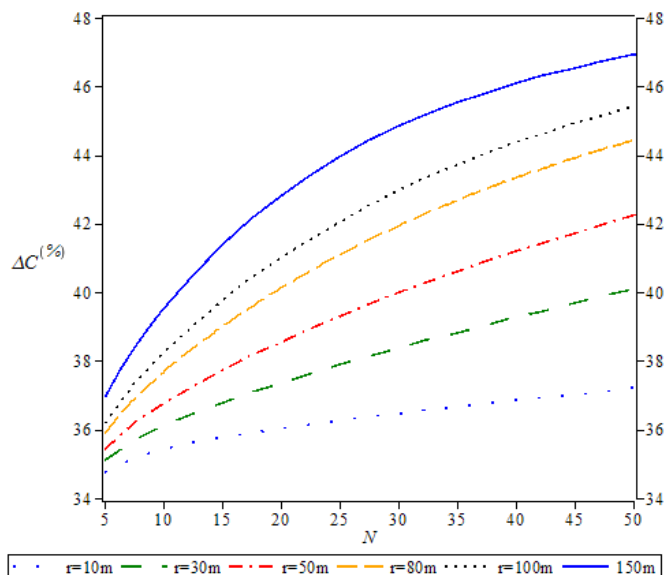
Στα Σχ. 6.4 και 6.5 χαράσσονται ως συνάρτηση του  $N$  για διάφορες τιμές της παραμέτρου κίνησης  $\alpha$  ( $r = 50m$ ). Καθώς οι τιμές του βαθμού των κόμβων μεταβάλλονται από  $n = 0.23$  (για  $N = 30$ ) μέχρι  $n = 3.93$  ( $N = 500$ ), εξετάζονται τόσο αραιά όσο και πυκνά δίκτυα. Η σχέση ανταλλαγής μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της πιθανότητας συνάντησης είναι σαφής. Όπως είναι αναμενόμενο, η σχέση αυτή γίνεται περισσότερο εμφανής καθώς το  $N$  γίνεται μεγαλύτερο αφού, τότε, το DTN δίκτυο γίνεται πυκνότερο και η πιθανότητα συνάντησης μεγαλύτερη. Επομένως, οι DTN κόμβοι έχουν την τάση να μένουν ακίνητοι περιμένοντας ότι κάποιοι άλλοι κόμβοι θα κινηθούν. Είναι πρόδηλο ότι το προτεινόμενο αυτόνομο σχήμα προσφέρει μια μείωση στο  $\Delta C^{(\%)}$  που κυμαίνεται από 40%, για



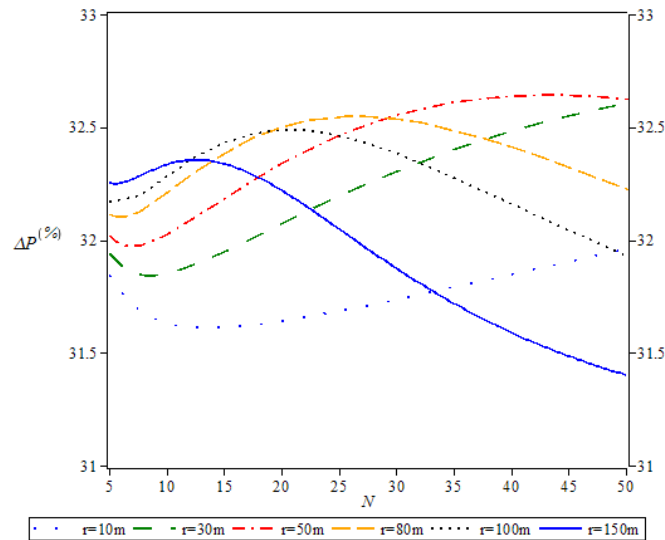
Σχήμα 6.5: Ποσοστιαία μείωση της πιθανότητας συνάντησης ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων  $N$  για διάφορες τιμές της παραμέτρου κίνησης  $\alpha$  ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ).

αραιά DTN δίκτυα, μέχρι 49%, για πυκνότερα DTN δίκτυα. Από την άλλη πλευρά, η μείωση στο  $\Delta P^{(\%)}$  κυμαίνεται από 31% μέχρι 33% ενώ η επίδραση της πυκνότητας του δικτύου είναι πολύ μικρή. Επίσης, τα Σχ. 6.4 και 6.5 αποκαλύπτουν ότι τόσο το  $\Delta C^{(\%)}$  όσο και το  $\Delta P^{(\%)}$  επηρεάζονται ελάχιστα από την παράμετρο κίνησης  $\alpha$ .

Τα Σχ. 6.6 και 6.7 απεικονίζουν τα ποσοστιαία μέτρα επίδοσης  $\Delta C^{(\%)}$  και  $\Delta P^{(\%)}$  ως συνάρτηση του  $N$  για διάφορες τιμές του  $r$  ( $\alpha = 0.75$ ). Και πάλι, είναι φανερό ότι μεγαλύ-



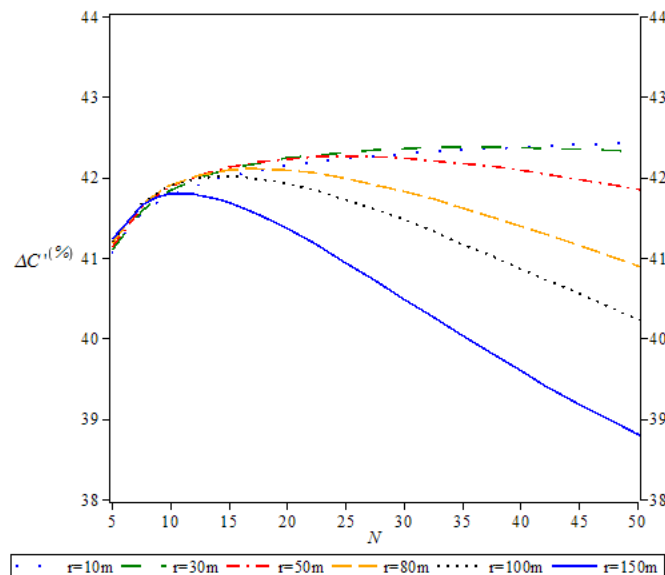
Σχήμα 6.6: Ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων  $N$  για διάφορες τιμές της εμβέλειας  $r$  ( $\alpha = 0.75$ ,  $u = 1m/s$ ).



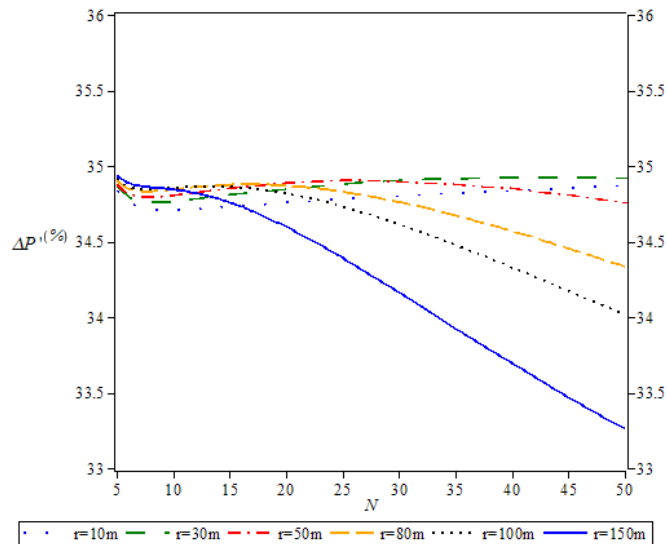
Σχήμα 6.7: Ποσοστιαία μείωση της πιθανότητας συνάντησης ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων  $N$  για διάφορες τιμές της εμβέλειας  $r$  ( $a = 0.75$ ,  $u = 1m/s$ ).

τερες τιμές του  $r$  οδηγούν σε σημαντικότερη αύξηση του  $\Delta C^{(\%)}$ , φθάνοντας το 45%, όταν  $r = 150m$  και  $N = 50m$  ( $n = 3.53$ ). Παρατηρώντας ότι η μείωση του  $\Delta P^{(\%)}$  κυμαίνεται από 31 ως 32.6 %, γίνεται αντιληπτό ότι η πυκνότητα του δικτύου πολύ λίγο επηρεάζει τη μείωση της πιθανότητας συνάντησης.

Τα μέτρα επίδοσης  $\Delta C^{(\%)}$  και  $\Delta P^{(\%)}$  που αφορούν την περίπτωση της έλλειψης συγχρονισμού στα DTN είναι της ίδιας μορφής με αυτά των περιπτώσεων που απεικονίζονται στα Σχ. 6.6 και 6.7 και απεικονίζονται στα Σχ. 6.8 και 6.9. Συγκρίνοντας τα Σχ. 6.6 και 6.7 με



Σχήμα 6.8: Ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων  $N$  για διάφορες τιμές της εμβέλειας  $r$  υπό το σενάριο ελλιπούς συγχρονισμού ( $a = 0.75$ ,  $u = 1m/s$ )



Σχήμα 6.9: Ποσοστιαία μείωση της πιθανότητας συνάντησης ως συνάρτηση του πλήθους των κόμβων  $N$  για διάφορες τιμές της εμβέλειας  $r$  υπό το σενάριο ελλιπούς συγχρονισμού ( $a = 0.75$ ,  $u = 1m/s$ ).

τα αντίστοιχα Σχ. 6.8 και 6.9 είναι φανερό ότι ενδεχόμενη απόκλιση από την επίτευξη πλήρους συγχρονισμού ελάχιστα μειώνει την απόδοση του προτεινόμενου σχήματος στο πλαίσιο της διαχείρισης της σχέσης ανταλλαγής μεταξύ των  $\Delta C'(\%)$  και  $\Delta P'(\%)$ . Συγκεκριμένα, το  $\Delta C'(\%)$  κυμαίνεται μεταξύ 39 και 42.5% έναντι των 35 και 47% υπό το σενάριο πλήρους συγχρονισμού, ενώ το  $\Delta P'(\%)$  κυμαίνεται μεταξύ 33 και 35% έναντι των 31.5 και 32.5% στα πλήρως συγχρονισμένα DTN.

Συνοψίζοντας, το προτεινόμενο αυτόνομο σχήμα κινητικότητας προσφέρει ένα υψηλό ενεργειακό πλεονέκτημα με κόστος μια σχετικά μικρότερη μείωση της πιθανότητας συνάντησης. Είναι πρόδηλο ότι το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας λόγω κίνησης των κόμβων και της πιθανότητας συνάντησης. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτο-οργανούμενα DTN με ενεργειακά περιορισμένους κόμβους. Είναι, επίσης, εμφανές από τις προσομοιώσεις ότι το ενεργειακό όφελος υπό το RWP μοντέλο κινητικότητας κυμαίνεται μεταξύ 35 και 50% με ένα μικρότερο σχετικά κόστος μείωσης της πιθανότητας συνάντησης, που κυμαίνεται μεταξύ 31 και 33%. Η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική επέκταση της διάρκειας ζωής που αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για ορισμένα DTN δίκτυα ανεκτικά σε μείωση της πιθανότητας συνάντησης. Το προτεινόμενο σχήμα ελάχιστα επηρεάζεται από την παράμετρο κίνησης  $a$  και την ταχύτητα κίνησης των κόμβων  $u$ . Όταν η DTN λειτουργία δεν είναι πλήρως συγχρονισμένη, παρατηρείται μικρή μείωση του οφέλους που προσφέρει η διαχείριση της σχέσης ανταλλαγής μέσω του προτεινόμενου σχήματος.

## 6.6 Συμπεράσματα

Προτάθηκε ένα αυτόνομο σχήμα κινητικότητας προοριζόμενο για αυτο-οργανούμενα DTN με ενεργειακά περιορισμένους κόμβους. Το προτεινόμενο σχήμα τροποποιεί γνωστά μοντέλα κινητικότητας, όπως το RWP και το RD, αποσκοπώντας στη ρύθμιση της κίνησης των κόμβων. Ακολουθώντας το προτεινόμενο DTN παίγνιο κινητικότητας  $N$  κόμβων/ παικτών, στην αρχή κάθε χρονοσχιμής, οι κόμβοι αποφασίζουν αυτόνομα αν θα κινηθούν ή αν θα μείνουν ακίνητοι, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την εναπομένουσα ενέργειά τους. Το προτεινόμενο σχήμα διαχειρίζεται τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της πιθανότητας συνάντησης των κόμβων προσφέροντας σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τη σχετικά μικρότερη μείωση στην πιθανότητα συνάντησης. Σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα με ανοχή σε μικρή μείωση της πιθανότητας συνάντησης, το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να προσφέρει σημαντική επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου.



## Κεφάλαιο 7

# Παίγνιο ενεργητικής ανίχνευση δικτύου σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα

### 7.1 Εισαγωγή

Η ανίχνευση δικτύου σε αραιά DTN δίκτυα αποτελούμενα από ενεργειακά περιορισμένους κινητούς κόμβους είναι η βασική διαδικασία για σύναψη επικοινωνίας μεταξύ γειτονικών DTN κόμβων. Ωστόσο, αν η διαδικασία αυτή δεν σχεδιαστεί σωστά μπορεί να οδηγήσει είτε σε άσκοπη κατανάλωση ενέργειας είτε σε απώλεια ευκαιριών συνδεσιμότητας γειτονικών κόμβων. Η δυναμική φύση των DTN δικτύων ευνοεί αποκεντρωμένες προσπάθειες που βασίζονται σε τοπικές αποφάσεις αυτόνομων κόμβων σχετικά με την εκπομπή σημάτων ανίχνευσης.

Ερευνητικές μελέτες έχουν δείξει ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται από τους κόμβους των DTN δικτύων αφορά τη διαδικασία ανίχνευσης του δικτύου. Η διαδικασία ανίχνευσης δικτύου διακρίνεται στη βιβλιογραφία σε παθητική και ενεργητική. Η παθητική διαδικασία ανίχνευσης πραγματοποιείται κατά την κατάσταση αδρανούς ακρόασης του δικτύου, κατά την οποία οι κόμβοι έχουν ενεργοποιημένη τη διεπαφή επικοινωνίας τους αναμένοντας τη λήψη σήματος ανίχνευσης από κάποιο γειτονικό κόμβο. Η ενεργητική διαδικασία ανίχνευσης δικτύου πραγματοποιείται με αποστολή σημάτων ανίχνευσης από τους κόμβους με σκοπό τον εντοπισμό γειτονικών κόμβων που ακροώνται την περιοχή εμβέλειάς τους για πιθανή επαφή.

Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες έχουν αντιμετωπίσει το θέμα της ρύθμισης της διαδικασίας ανίχνευσης σε αυτο-οργανούμενα DTN, προτείνοντας σχήματα που επικεντρώνονται άλλοτε στην παθητική εκδοχή της, άλλοτε στην ενεργητική και άλλοτε σε συνδυασμό τους (βλ. Παράρτημα Α). Τα σχήματα που επικεντρώνονται στην παθητική εκδοχή της διαδικασίας ανίχνευσης αποσκοπούν στην ελεγχόμενη ενεργοποίηση της διεπαφής επικοινωνίας των κόμβων, αντίστοιχα προς το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται, το πλήθος των διαθέσιμων διεπαφών και τις τοπικές δικτυακές συνθήκες. Τα σχήματα που επι-

κεντρώνονται στην ενεργητική εκδοχή της διαδικασίας ανίχνευσης αποσκοπούν στην ελεγχόμενη αποστολή σημάτων ανίχνευσης, ρυθμίζοντας κατάλληλα τη συχνότητα αποστολής βάσει τοπικών συνθηκών του δικτύου και του μοντέλου κινητικότητας που ακολουθείται. Τέλος, τα σχήματα που επικεντρώνονται στο συνδυασμό παθητικής και ενεργητικής ανίχνευσης δικτύου αποσκοπούν στη ρύθμιση όλης της διαδικασίας ανίχνευσης, τόσο της παθητικής ακρόασης όσο και την ενεργητικής αποστολής σημάτων ανίχνευσης από τους αυτόνομους κόμβους. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την ενεργητική ανίχνευση δικτύου σε αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα, που απαρτίζονται από αυτόνομους κόμβους ικανούς να αποφασίσουν για τη χρονική στιγμή που θα αποστείλουν σήματα ανίχνευσης.

Η εργασία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό της διατριβής [131] βασίζεται σε πλήθος ερευνητικών προσπαθειών ενεργητικής ανίχνευσης, αρκετές από τις οποίες λαμβάνουν υπόψη την κατανάλωση ενέργειας λόγω αποστολής σημάτων ανίχνευσης και την πιθανότητα απώλειας της ευκαιρίας σύναψης επικοινωνίας με κάποιο γειτονικό κόμβο. Η πιθανότητα αυτή, γνωστή και ως *πιθανότητα μη σύναψης επικοινωνίας* (contact missing probability, CMP), είναι η πιθανότητα ώστε η εκπομπή σήματος ανίχνευσης από κάποιο κόμβο να αποτύχει να εντοπίσει κάποιο γειτονικό κόμβο. Στο πλαίσιο αυτό, η [124] προσδιορίζει τη βέλτιστη συχνότητα αποστολής σημάτων ανίχνευσης, επιλύοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπόψη (i) το ρυθμό επαφών, δηλαδή το ρυθμό με τον οποίο δύο κόμβοι έρχονται εντός εμβέλειας, (ii) τη CMP και (iii) τη μέση κατανάλωση ενέργειας για κάθε αποστολή σήματος. Στο [132], για τον προσδιορισμό του βέλτιστου χρονικού διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών επαφών λαμβάνεται υπόψη η διάρκεια της επικοινωνίας δύο κόμβων. Στην [125] προτείνεται ένα βέλτιστο διάστημα μεταξύ διαδοχικών αποστολών σημάτων ανίχνευσης για κόμβους που χρησιμοποιούν τη διεπαφή WiFi ως μέσο επικοινωνίας με τους γειτονικούς κόμβους, που βασίζεται στο Markov μοντέλο, ενώ στην [133] προτείνεται ένα βέλτιστος αλγόριθμος ανίχνευσης WiFi σημείων πρόσβασης ελαχιστοποιώντας συνάρτηση κόστους που ενσωματώνει την κατανάλωση ενέργειας και τη CMP. Τέλος, η [133] επεκτείνει την [124] λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική διάρκεια της αποστολής σημάτων ανίχνευσης.

Στη διατριβή, για τη μαθηματική διατύπωση της εγγενούς σχέσης ανταλλαγής μεταξύ, από τη μια πλευρά, της κατανάλωσης ενέργειας λόγω αποστολής σήματος ανίχνευσης και, από την άλλη πλευρά, της πιθανότητας σύναψης επικοινωνίας με οποιοδήποτε γειτονικό κόμβο, χρησιμοποιείται η θεωρία παιγνίων. Η λειτουργία του δικτύου οργανώνεται σε χρονοσχισμές διάρκειας  $T$ , χωρίς οι κόμβοι να έχουν απαραίτητα συγχρονισμένες χρονοσχισμές, γεγονός που συνάδει με την ασύγχρονη και αποκεντρωμένη φύση των DTN. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες σχετικές ερευνητικές προσπάθειες της βιβλιογραφίας, η πιθανότητα σύναψης επικοινωνίας -που αποτελεί βασικό μέγεθος επίδοσης στην παρούσα εργασία και που εφεξής θα αναφέρεται ως *πιθανότητα επικοινωνίας*- λαμβάνει υπόψη τις προσπάθειες ενεργητικής ανίχνευσης και των δύο κόμβων που βρίσκονται εντός εμβέλειας. Επομένως, πέραν της εξάρτησης της πιθανότητας επικοινωνίας από την πιθανότητα

συνάντησης, δηλαδή την πιθανότητα να βρεθούν δύο κόμβοι εντός εμβέλειας, η πιθανότητα επικοινωνίας εξαρτάται, επίσης, και από τη CMP και τη *κατά ζεύγος CMP* (pairwise CMP), δηλαδή την πιθανότητα να χαθεί η ευκαιρία σύναψης επικοινωνίας μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων, όταν και οι δύο εκπέμπουν σήμα ανίχνευσης δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό, διατυπώνεται ένα παίγνιο μεταξύ δύο τυχαίων κόμβων/παικτών του δικτύου, σύμφωνα με το οποίο κάθε κόμβος αποφασίζει αν θα στείλει σήμα ανίχνευσης ή όχι στην αρχή κάθε χρονοσχιsmής του. Το προτεινόμενο παίγνιο είναι ένα μη συνεργατικό, συμμετρικό παίγνιο δύο παικτών και δύο στρατηγικών. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ερευνητικές προσπάθειες, στο κεφάλαιο αυτό της διατριβής περιγράφεται η πλήρης λειτουργία ενός DTN κόμβου, από την εκκίνηση της λειτουργίας του συστήματος μέχρι και την εξάντληση των ενεργειακών του πόρων.

Η προτεινόμενη προσέγγιση της ενεργητικής ανίχνευσης δικτύου αποσκοπεί στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω εκπομπής σημάτων ανίχνευσης, διατηρώντας ταυτόχρονα ένα ελάχιστο επιτρεπτό επίπεδο της πιθανότητας σύναψης επικοινωνίας μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων. Στην αρχή κάθε χρονοσχιsmής, ή άλλως κύκλου της DTN λειτουργίας, οι κόμβοι προσδιορίζουν το κανονικοποιημένο ενεργειακό κόστος εκπομπής σήματος ανίχνευσης -εφεξής ονομαζόμενο ως *κόστος ανίχνευσης*- δηλαδή το λόγο του κόστους αποστολής σήματος  $\Delta E$  προς την εκάστοτε εναπομένουσα ενέργεια του κόμβου  $E$ , και το συγκρίνουν με δύο ενεργειακά κατώφλια. Ενόσω το κόστος ανίχνευσης είναι μικρότερο από το πρώτο κατώφλιο, οι κόμβοι εμπλέκονται στην κανονική φάση λειτουργίας τους και εκπέμπουν σήμα ανίχνευσης στην αρχή κάθε χρονοσχιsmής. Όταν το κόστος ανίχνευσης υπερβεί το πρώτο κατώφλιο και για όσο βρίσκεται κάτω από το δεύτερο, οι κόμβοι εμπλέκονται στη φάση παιγνίου. Κατά τη φάση αυτή, οι κόμβοι αποφασίζουν πιθανοτικά αν θα εκπέμπουν σήμα ανίχνευσης ή όχι, ρυθμίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις εκπομπές σημάτων με κριτήριο την κατανάλωση ενέργειας ανά εκπομπή. Όταν το κόστος ανίχνευσης υπερβεί το δεύτερο κατώφλιο, οι κόμβοι εισέρχονται στη φάση σταθεροποίησης, κατά την οποία εκπέμπουν πιθανοτικά σήμα ανίχνευσης στην αρχή κάθε χρονοσχιsmής με πιθανότητα που εξασφαλίζει ότι η πιθανότητα επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων δεν γίνεται μικρότερη από ένα ανεκτό επίπεδο που επιβάλλουν οι προδιαγραφές ποιότητας υπηρεσίας QoS του DTN δικτύου. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω κατάλληλης ρύθμισης των εκπομπών σημάτων ανίχνευσης οδηγεί σε σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής του DTN δικτύου, που ενδέχεται να είναι κρίσιμη σε συγκεκριμένα αυτο-οργανούμενα δίκτυα που εμφανίζουν ανοχή σε μείωση της πιθανότητας σύναψης επαφής.

Το υπόλοιπο του Κεφ. 7 οργανώνεται ως εξής: Η Ενότητα 7.2 παρουσιάζει τα μεγέθη που υπεισέρχονται στη διατύπωση του προτεινόμενου σχήματος ενεργητική ανίχνευσης. Στην Ενότητα 7.3 παρουσιάζεται το παίγνιο δύο κόμβων/παικτών ενώ στην Ενότητα 7.4 παρουσιάζεται το προτεινόμενο αυτόνομο σχήμα που επιτυγχάνει τη ρύθμιση της διαδικασίας ενεργητικής ανίχνευσης σε αυτο-οργανούμενα DTN. Στην Ενότητα 7.5 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τέλος, η Ενότητα 7.6

ολοκληρώνει το Κεφ. 7.

## 7.2 Ανίχνευση DTN δικτύων

Έστω DTN δίκτυο αποτελούμενο από  $N$  ενεργειακά περιορισμένους κινητούς κόμβους που αποσκοπούν στη σύναψη επικοινωνίας με γειτονικούς κόμβους στην προσπάθεια ανταλλαγής πληροφορίας και εκκινούν τη λειτουργία τους ταυτόχρονα. Στο πλαίσιο αυτό, δύο κόμβοι είναι σε επαφή όταν ο ένας είναι στην εμβέλεια του άλλου ακόμα και αν δεν έχουν συνάψει επικοινωνία μεταξύ τους. Θεωρείται ότι αποκαθίσταται ζεύξη επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων που είναι σε επαφή όταν οι δύο κόμβοι έχουν εντοπίσει ο ένας τον άλλο.

Οι δικτυακές παράμετροι, όπως η διάρκεια χρονοσχισμής  $T$ , το ενεργειακό κόστος ανίχνευσης  $\Delta E$ , η επιφάνεια κάλυψης  $A$ , η εμβέλεια των κόμβων  $r$  και το πλήθος των κόμβων  $N$ , θεωρούνται γνωστές πριν την εκκίνηση της DTN λειτουργίας. Κρίσιμη παράμετρος για τη DTN λειτουργία είναι το μοντέλο κινητικότητας που ακολουθείται από τους κόμβους. Έχει αποδειχθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις κοινωνικών DTN δικτύων οι κόμβοι ακολουθούν αυτο-ομοιόμορφα (self-similar) μοντέλα κινητικότητας που εμφανίζουν συγκεκριμένες χωρικές και χρονικές εξαρτήσεις. Ωστόσο, η μαθηματική διατύπωση των στατιστικών μεγεθών που περιγράφουν τα αυτο-ομοιόμορφα μοντέλα κινητικότητας είναι σε αρκετά πρώιμο στάδιο ώστε να είναι αξιοποιήσιμα σε σχήματα που τα υιοθετούν. Αντίθετα, τα μοντέλα κινητικότητας που βασίζονται στη χρονικά και χωρικά στατική Poisson διαδικασία δημιουργίας επαφών έχουν μελετηθεί διεξοδικά καθιστώντας εύκολη τη μαθηματική διατύπωση των στατιστικών μεγεθών που τα περιγράφουν. Άλλωστε, η υιοθέτηση αυτού του είδους μοντέλων κινητικότητας επιβεβαιώνεται σε αρκετές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία (βλεπε Κεφ. 4).

Στο πλαίσιο της διατριβής, θεωρείται ότι οι κόμβοι ακολουθούν ομογενή Poisson μοντέλα κινητικότητας με παραμέτρους όπως ο ρυθμός επαφών  $\lambda$ , χρονικά και χωρικά ανεξάρτητες. Δεδομένου ότι η πιθανότητα συνάντησης  $p_{enc}(T)$  εξαρτάται από το  $\lambda$ , τόσο το  $\lambda$  όσο και η  $p_{enc}(T)$  προσδιορίζονται πριν την εκκίνηση της DTN λειτουργίας. Δεδομένης της στατιστικής κατανομής που ακολουθούν οι χρονικές διάρκειες των επαφών μεταξύ τυχαίων κόμβων που βρίσκονται εντός εμβέλειας, η CMP και η κατά ζεύγος CMP μπορούν επίσης να προσδιοριστούν πριν την εκκίνηση της DTN λειτουργίας.

Στο πλαίσιο αυτό, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους και στην αρχή κάθε χρονοσχισμής, οι κόμβοι πρέπει να μετρούν μόνο την εναπομένουσα ενέργεια τους  $E$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι, καίτοι η διατριβή δεν εξετάζει την κατανάλωση ενέργειας λόγω ανταλλαγής δεδομένων ή παθητικής ακρόασης του δικτύου, η εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων στην αρχή κάθε χρονοσχισμής εμπεριέχει αυτή την πληροφορία. Στην Ενότητα 7.3, όπου παρουσιάζεται το παίγνιο στο οποίο βασίζεται το προτεινόμενο σχήμα, η  $p_{enc}(T)$ , η CMP και η κατά ζεύγος CMP χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των οφελών των κόμβων. Επομένως, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός αυτών των πιθανοτήτων που ακολουθεί.

### 7.2.1 Προσδιορισμός της πιθανότητας $p_{enc}(T)$

Υποθέτοντας ότι οι κόμβοι του δικτύου ακολουθούν το Poisson μοντέλο κινητικότητας, η πιθανότητα κάποιος κόμβος να συναντήσει τουλάχιστον ένα από τους υπόλοιπους  $N - 1$  κόμβους του δικτύου κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής  $T$  είναι ίση με

$$p_{enc}(T) = 1 - e^{-\lambda \cdot T} \quad (7.1)$$

όπου

$$\lambda = (N - 1) \cdot \lambda_p \quad (7.2)$$

ο ρυθμός επαφών και  $\lambda_p$  ο ρυθμός επαφών για ένα ζεύγος κόμβων.

Μια κρίσιμη παράμετρος για τα DTN που οργανώνονται σε χρονοσχισμές είναι η διάρκεια αυτής  $T$ . Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάρκεια της χρονοσχισμής οφείλει να προσαρμόζεται στο δικτυακό προφίλ και το μοντέλο κινητικότητας που ακολουθούν οι κόμβοι, η διάρκεια της χρονοσχισμής υπολογίζεται μέσω σχέσης της μορφής

$$\lambda \cdot T = c \quad (7.3)$$

όπου  $c$  κατάλληλη σταθερά.

Από την (7.3) είναι φανερό ότι, για τον τύπο δικτύων που μελετώνται στο πλαίσιο της διατριβής, η διάρκεια της χρονοσχισμής παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια της DTN λειτουργίας.

### 7.2.2 Προσδιορισμός της CMP και της κατά ζεύγος CMP

Η CMP, που θα συμβολίζεται εφεξής ως  $P_m(T)$ , σχετίζεται με την πιθανότητα να μη συναφθεί επικοινωνία μεταξύ γειτονικών κόμβων κατά τη διάρκεια  $T$  καιτοι ένας μόνο εκ των δύο έχει εκπέμψει σήμα ανίχνευσης. Η μέση τιμή της πιθανότητας αυτής είναι ίση με [124]

$$P_m(T) = \frac{1}{T} \int_0^T F_D(z) dz \quad (7.4)$$

όπου  $F_D(z)$  η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cumulative distribution function, cdf) που περιγράφει τη διάρκεια επαφής των κόμβων.

Η κατά ζεύγος CMP σχετίζεται με την πιθανότητα να μη συναφθεί επικοινωνία μεταξύ γειτονικών κόμβων κατά τη διάρκεια  $T$  όταν και οι δύο έχουν εκπέμψει σήματα ανίχνευσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι κόμβοι λειτουργούν κατά βάση ασύγχρονα, οι χρονικές στιγμές εκπομπής των σημάτων ανίχνευσης εκ μέρους των δύο κόμβων ενδέχεται να διαφέρουν. Η χρονική διαφορά μεταξύ των στιγμών εκπομπής των δύο κόμβων, έστω  $y$ , θεωρείται ότι κατανέμεται ομοιόμορφα στο διάστημα  $(0, T/2)$ . Επομένως, η μέση τιμή της CMP, εφεξής

συμβολιζόμενη ως  $P_{m,p}(T)$ , είναι ίση με [124]

$$P_{m,p}(T) = \frac{2}{T^2} \int_0^T \int_0^y F_D(z) dz dy \quad (7.5)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη μαθηματική απόδειξη που έχει δοθεί στο [124] ισχύει

$$0 \leq P_{m,p}(T) \leq P_m(T) \quad (7.6)$$

όπως, άλλωστε, αναμένεται διαισθητικά.

### 7.3 Διατύπωση του παιγνίου ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα

Το υπό διατύπωση παίγνιο παίζεται μεταξύ δύο τυχαίων DTN κόμβων, έστω  $n_1$  και  $n_2$ . Το παίγνιο ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα οργανώνεται σε κύκλους που συμπίπτουν με τους κύκλους της DTN λειτουργίας. Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ενεργητική ανίχνευση δικτύου, το σύνολο των δράσεων που είναι διαθέσιμες στους κόμβους κόμβοι είναι  $\mathbf{S} = \{\text{εκπέμπω σήμα, δεν εκπέμπω}\}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη χρονική στιγμή όπου οι κόμβοι αποφασίζουν αν θα εκπέμψουν ή όχι σήμα ανίχνευσης δεν γνωρίζουν την απόφαση του άλλου κόμβου. Στο πλαίσιο αυτό, δύο κόμβοι συνάπτουν επικοινωνία αν βρίσκονται σε επαφή και τουλάχιστον ένας από αυτούς εκπέμπει σήμα ανίχνευσης. Άλλως, η ευκαιρία σύναψης επικοινωνίας χάνεται. Γίνεται, επίσης, η παραδοχή ότι ένας κόμβος ακροάται το δίκτυο όταν ο γειτονικός του εκπέμπει σήμα ανίχνευσης. Αυτό συνεπάγεται ότι η εκπομπή σήματος ανίχνευσης εκ μέρους τουλάχιστον ενός από τους δύο κόμβους δεν αποτυγχάνει ποτέ να εντοπίσει το γειτονικό κόμβο. Προκειμένου να αποφευχθεί η κατανάλωση ενέργειας από τη συνεχή ακρόαση των κόμβων, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με πρόσθετη διεπαφή επικοινωνίας χαμηλής ενέργειας (βλ. Κεφ. Α).

Το υπό διατύπωση παίγνιο είναι ένα μη συνεργατικό, συμμετρικό παίγνιο δύο παικτών και δύο στρατηγικών. Οι δύο αντικρουόμενοι παράγοντες, δηλαδή η πιθανότητα επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων, συμβολιζόμενη ως  $P_c(T)$ , και η κατανάλωση ενέργειας λόγω εκπομπής σήματος ανίχνευσης, πρέπει να ληφθούν συνδυαστικά υπόψη. Η μαθηματική διατύπωση του παιγνίου ενεργητικής ανίχνευσης βασίζεται στην ιδέα ότι, προκειμένου να αυξήσουν την πιθανότητα σύναψης επαφής και να ανταλλάξουν τα αποθηκευμένα δεδομένα, οι κόμβοι ενδέχεται να αποφασίσουν να εκπέμψουν σήμα ανίχνευσης. Αντιθέτα, προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια, οι κόμβοι ενδέχεται να αποφασίσουν να μην εκπέμψουν σήμα ανίχνευσης. Στο υπό διατύπωση παίγνιο ενεργητικής ανίχνευσης DTN, το όφελος λόγω της μείωσης κατανάλωσης ενέργειας αντισταθμίζεται από το κόστος μείωσης της πιθανότητας σύναψης επικοινωνίας.

Στο πλαίσιο του προσδιορισμού της  $P_c(T)$ , προκύπτουν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

1. Κανένας από τους δύο κόμβους δεν εκπέμπει σήμα ανίχνευσης

Στην περίπτωση αυτή, κάθε ευκαιρία σύναψης επικοινωνίας χάνεται. Συνεπώς,

$$P_c(T) = P_c^{(0)}(T) = 0 \quad (7.7)$$

2. Τουλάχιστον ένας από τους κόμβους εκπέμπει σήμα ανίχνευσης

Στην περίπτωση αυτή, σύναψη επικοινωνίας επιτυγχάνεται όταν οι κόμβοι βρίσκονται σε επαφή. Επομένως, για τον υπολογισμό της πιθανότητας σύναψης επικοινωνίας, πρέπει να ληφθεί υπόψη η πιθανότητα επικοινωνίας  $p_{enc}(T)$ , η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

$$P_c(T) = P_c^{(1)}(T) = p_{enc}(T) \cdot (1 - P_m(T)) \quad (7.8)$$

αν ένας μόνο κόμβος εκπέμπει σήμα ανίχνευσης και

$$P_c(T) = P_c^{(2)}(T) = p_{enc}(T) \cdot (1 - P_{m,p}(T)) \quad (7.9)$$

αν και οι δύο κόμβοι εκπέμπουν σήμα ανίχνευσης.

Ορίζοντας το κανονικοποιημένο κόστος ανίχνευσης

$$x = \Delta E/E, \quad 0 < x \leq 1 \quad (7.10)$$

τα οφέλη του  $n_1$ , συμβολιζόμενα ως  $u_1(\mathbf{s}_i)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , αντιστοιχούν στα τέσσερα πιθανά στρατηγικά προφίλ των δύο παικτών και υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την κατά περίπτωση αντίστοιχη πιθανότητα επικοινωνίας  $P_c(T)$  με την κανονικοποιημένη εναπομένουσα ενέργεια του  $n_1$ . Η τελευταία είναι ίση με  $(1 - x)$ , όταν ο  $n_1$  εκπέμπει σήμα ανίχνευσης, ή ίση με 1, όταν δεν εκπέμπει.

Βάσει των ανωτέρω συλλογισμών, τα οφέλη του  $n_1$  υπολογίζονται ακολούθως:

1. Κανένας από τους κόμβους δεν εκπέμπει σήμα ανίχνευσης

$$u_1(\mathbf{s}_1) = P_c^{(0)}(T) \cdot 1 = 0 \quad (7.11)$$

2. Μόνο ο  $n_2$  εκπέμπει σήμα ανίχνευσης

$$u_1(\mathbf{s}_2) = P_c^{(1)}(T) \cdot 1 = p_{enc}(T) \cdot (1 - P_m(T)) \quad (7.12)$$

3. Μόνο ο  $n_1$  εκπέμπει σήμα ανίχνευσης

		Παίκτης 2	
		δεν εκπέμπω σήμα ( $p_s$ )	εκπέμπω σήμα ( $1 - p_s$ )
Παίκτης 1	δεν εκπέμπω σήμα ( $p_s$ )	0	$p_{enc}(T) \cdot (1 - P_m(T))$
	εκπέμπω σήμα ( $1 - p_s$ )	$p_{enc}(T) \cdot (1 - P_m(T))$ $\cdot (1 - x)$	$p_{enc}(T) \cdot (1 - P_{m,p}(T))$ $\cdot (1 - x)$

Πίνακας 7.1: Τα οφέλη των κόμβων/παικτών  $n_1$  και  $n_2$  στον παίγνιο DTN ενεργητικής ανίχνευσης.

$$u_1(\mathbf{s}_3) = P_c^{(1)}(T) \cdot (1 - x) = p_{enc}(T) \cdot (1 - P_m(T)) \cdot (1 - x) \quad (7.13)$$

4. Και οι δύο κόμβοι εκπέμπουν σήμα ανίχνευσης

$$u_1(\mathbf{s}_4) = P_c^{(2)}(T) \cdot (1 - x) = p_{enc}(T) \cdot (1 - P_{m,p}(T)) \cdot (1 - x) \quad (7.14)$$

Η ίδια συλλογιστική με τα αντίστοιχα αποτελέσματα ισχύουν και για τον κόμβο  $n_2$ . Όπως ήταν αναμενόμενο, το υπό διατύπωση παίγνιο δύο παικτών και δύο στρατηγικών είναι συμμετρικό, αφού τα οφέλη εξαρτώνται αποκλειστικά από τις στρατηγικές που ακολουθούνται. Τα οφέλη αυτά παρουσιάζονται στον Πίν. 7.1 όπου κάθε εγγραφή αντιπροσωπεύει τα  $u_1(\mathbf{s}_i)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  των τεσσάρων στατηγικών προφίλ του παιγνίου δύο παικτών. Η ύπαρξη της αμιγούς NE στρατηγικής διερευνάται στο Παράρτημα Δ.

### 7.3.1 Μικτή NE στρατηγική

Για τη διατύπωση του προτεινόμενου σχήματος ενεργητικής ανίχνευσης DTN δικτύων, διερευνάται η ύπαρξη μικτής NE στρατηγικής του παιγνίου δύο παικτών που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 7.3.

Έστω  $p_{np}$  η πιθανότητα που αντιστοιχείται στην αμιγή στρατηγική “δεν εκπέμπω σήμα ανίχνευσης”. Σε κατάσταση ισορροπίας, οι κόμβοι είναι αδιάφοροι αν θα εκπέμψουν σήμα ανίχνευσης ή όχι. Εξισώνοντας τα αντίστοιχα οφέλη του παίκτη  $n_1$

$$u_1(\mathbf{s}_1) \cdot p_{np} + u_1(\mathbf{s}_2) \cdot (1 - p_{np}) = u_1(\mathbf{s}_3) \cdot p_{np} + u_1(\mathbf{s}_4) \cdot (1 - p_{np}) \quad (7.15)$$

προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για την πιθανότητα μη εκπομπής σήματος ανίχνευσης

$$p_{np}(x, T) = \frac{A(T) \cdot x - B(T)}{B(T) \cdot x - C(T)} \quad (7.16)$$



όπου

$$A(T) = 1 - P_{m,p}(T) \quad (7.17)$$

$$B(T) = P_m(T) - P_{m,p}(T) \quad (7.18)$$

$$C(T) = B(T) - (1 - P_m(T)) \quad (7.19)$$

Όπως αποδεικνύεται στο Παράρτημα Δ.2, υπάρχει μικτή ΝΕ στρατηγική για το ανωτέρω παίγνιο δύο παικτών εφόσον

$$x > E_{th}(T) \quad (7.20)$$

όπου

$$E_{th}(T) = \frac{B(T)}{A(T)} = \frac{P_m(T) - P_{m,p}(T)}{1 - P_{m,p}(T)} \quad (7.21)$$

το κανονικοποιημένο ενεργειακό κατώφλιο που οριοθετεί τη λειτουργία των DTN κόμβων. Συγκεκριμένα, η λειτουργία των κόμβων διαφοροποιείται ανάλογα με το κόστος ανίχνευσης  $x$ , που προσδιορίζεται στην αρχή κάθε χρονοσχιsmής. Ενόσω το  $x$  είναι μικρότερο του  $E_{th}$ , οι κόμβοι εκπέμπουν σήμα ανίχνευσης και δεν εμπλέκονται στη φάση παιγνίου. Κατά τη διάρκεια της κανονικής φάσης, η κατανάλωση ενέργειας ανά κύκλο/χρονοσχιsmή είναι ίση με  $\Delta E$  και η πιθανότητα επικοινωνίας είναι ίση με  $P_c^{(2)}(T)$ .

Όταν το  $x$  υπερβεί το  $E_{th}$ , το κόστος ανίχνευσης καθίσταται σημαντικό, ωθώντας τους κόμβους να εμπλακούν στη φάση παιγνίου, στην αρχή κάθε κύκλου της οποίας, οι κομβοι πιθανοτικά αποφασίζουν αν θα εκπέμψουν σήμα ανίχνευσης ή όχι με πιθανότητα

$$p_p(x, T) = 1 - p_{np}(x, T) \quad (7.22)$$

Κατά τη φάση παιγνίου, η κατανάλωση ενέργειας για την εκπομπή σήματος ανίχνευσης ανά κύκλο είναι ίση με

$$C_G(x, T) = p_p(x, T) \cdot \Delta E \quad (7.23)$$

ενώ η πιθανότητα επικοινωνίας είναι ίση με

$$P_G(x, T) = P_c^{(2)}(T) \cdot p_p(x, T)^2 + 2 \cdot P_c^{(1)}(T) \cdot p_p(x, T) \cdot (1 - p_p(x, T)) \quad (7.24)$$

Είναι φανερό από την (7.24) ότι η  $P_G(x, T)$  μπορεί να προσδιοριστεί πριν την εκκίνηση της DTN λειτουργίας. Οι φάσεις του προτεινόμενου σχήματος προσδιορίζονται στην Παρ. 7.4.1.

## 7.4 Το προτεινόμενο σχήμα ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα

### 7.4.1 Εξασφάλιση ελάχιστου επιπέδου πιθανότητας σύναψης επικοινωνίας

Το προτεινόμενο αυτόνομο σχήμα ρυθμίζει τη διαδικασία ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα αποσκοπώντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω εκπομπής άσκοπων σημάτων ανίχνευσης διατηρώντας ένα ελάχιστο QoS επίπεδο, όπως αυτό αποτιμάται από την πιθανότητα επικοινωνίας.

Το προτεινόμενο σχήμα που βασίζεται στο παίγνιο που διατυπώθηκε στην Ενότητα 7.3 προσδιορίζει τρεις φάσεις λειτουργίας των DTN κόμβων: την *κανονική φάση*, τη *φάση παιγνίου* και τη *φάση σταθεροποίησης*. Κατά τη διάρκεια της κανονικής φάσης, στην αρχή κάθε κύκλου οι κόμβοι εκπέμπουν σήματα ανίχνευσης. Κατά τη διάρκεια της φάσης παιγνίου, οι κόμβοι εμπλέκονται στο παίγνιο που διατυπώθηκε στην Ενότητα 7.3 εκπέμποντας σήματα ανίχνευσης πιθανοτικά, εφαρμόζοντας την (7.22). Τέλος, κατά τη φάση σταθεροποίησης, οι κόμβοι εκπέμπουν πιθανοτικά σήματα ανίχνευσης με σταθερή πιθανότητα που εγγυάται την ελάχιστη τιμή της πιθανότητας σύναψης επικοινωνίας που απορρέει από τις προδιαγραφές λειτουργίας του συστήματος, έστω  $P_{c,min}$ . Εξισώνοντας την πιθανότητα  $P_G(x, T)$  με την αντίστοιχη προδιαγραφή  $P_{c,min}$ , προκύπτει ένα νέο κανονικοποιημένο ενεργειακό κατώφλιο  $E_s(T)$ , πέραν του οποίου η DTN λειτουργία σταθεροποιείται ώστε να εξασφαλιστεί ότι η πιθανότητα επικοινωνίας δεν υπολείπεται της ελάχιστης αποδεκτής  $P_{c,min}$ . Συγκεκριμένα, όταν το  $x$  υπερβεί το  $E_s(T)$ , οι κόμβοι εκπέμπουν πιθανοτικά σήματα ανίχνευσης με σταθερή πιθανότητα ίση με  $p_p(E_s, T)$ . Βάσει του προαναφερθέντος σκεπτικού, το κατώφλιο  $E_s(T)$  ικανοποιεί τη σχέση

$$P_G(E_s, T) = P_{c,min} \quad (7.25)$$

όπου  $P_G(x, T)$  δίνεται από την (7.24). Αντικαθιστώντας την (7.22) στην (7.24) και επιλύοντας ως προς  $E_s(T)$  προκύπτει

$$E_s(T) = \frac{B(T) - C(T) \cdot (1 - Y)}{A(T) - B(T) \cdot (1 - Y)} \quad (7.26)$$

όπου  $Y$  η λύση της εξίσωσης

$$[P_c^{(2)}(T) - 2 \cdot P_c^{(1)}(T)] \cdot y^2 + 2 \cdot P_c^{(1)}(T) \cdot y - P_{c,min} = 0 \quad (7.27)$$

που απορρέει από την (7.25). Η  $Y$  είναι ίση με την σταθεροποιητική πιθανότητα εκπομπής σήματος ανίχνευσης που εξασφαλίζει ότι η πιθανότητα επικοινωνίας δεν υπολείπεται της

$P_{c,min}$ , δηλαδή

$$p_p(E_s, T) = Y \quad (7.28)$$

Προκειμένου να απλοποιηθούν στη συνέχεια οι συμβολισμοί, δεν θα δηλώνεται εφεξής η εξάρτηση των  $E_{th}$ ,  $E_s$ ,  $P_c$ ,  $P_G$ ,  $C_G$  και  $p_p$  από το  $T$ .

## 7.4.2 Περιγραφή του προτεινόμενου σχήματος

Λαμβάνοντας υπόψη το Poisson μοντέλο κινητικότητας που ακολουθείται από τους κόμβους, τα δύο ενεργειακά κατώφλια  $E_{th}$  και  $E_s$  προσδιορίζονται και αυτά πριν την εκκίνηση της DTN λειτουργίας.

Στην αρχή κάθε κύκλου, επαναλαμβάνεται το ακόλουθο πλαίσιο:

- Ενόσω  $x < E_{th}$ , δηλαδή ενόσω το κόστος ανίχνευσης είναι μικρό, οι κόμβοι βρίσκονται στην κανονική φάση και εκπέμπουν σήματα ανίχνευσης.
- Έστω ότι στην αρχή ενός κύκλου κατά τη χρονική στιγμή  $t = t_g$ , το κόστος ανίχνευσης  $x$  γίνεται για πρώτη φορά μεγαλύτερο του  $E_{th}$ , δηλαδή το κόστος ανίχνευσης γίνεται σημαντικό. Τότε, εκκινείται η φάση παιγνίου. Οι χρονικές στιγμές

$$t = t_g + q_g \cdot T, \quad q_g = 0, 1, 2 \dots$$

σηματοδοτούν διαδοχικούς κύκλους της φάσης παιγνίου. Επί όσο χρονικό διάστημα ισχύει  $E_{th} \leq x < E_s$ , οι κόμβοι αποφασίζουν πιθανοτικά αν θα εκπέμψουν ή όχι σήμα ανίχνευσης με πιθανότητα που προκύπτει από την (7.22), όπως προσδιορίστηκε κατά τη διατύπωση του παιγνίου δύο κόμβων/παικτών (βλ. Ενότητα 7.3).

- Έστω ότι στην αρχή ενός κύκλου τη χρονική στιγμή  $t = t_s$ , το κόστος ανίχνευσης  $x$  γίνεται για πρώτη φορά μεγαλύτερο του  $E_s$ , δηλαδή η πιθανότητα επικοινωνίας φθάνει την κατώτατη ανεκτή τιμή. Τότε, εκκινεί η φάση σταθεροποίησης. Οι χρονικές στιγμές

$$t = t_s + q_s \cdot T, \quad q_s = 0, 1, 2 \dots$$

σηματοδοτούν διαδοχικούς κύκλους της φάσης σταθεροποίησης, κατά τη διάρκεια των οποίων η λειτουργία των κόμβων πρέπει να εξασφαλίζει ότι η πιθανότητα επικοινωνίας δεν υπολείπεται της  $P_{c,min}$ . Στη φάση αυτή, οι κόμβοι εκπέμπουν σήματα ανίχνευσης με πιθανότητα ίση με αυτήν της (7.28). Η φάση σταθεροποίησης συνεχίζεται μέχρι να εξαντληθεί η εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων, δηλαδή μέχρι  $x = 1$ .

Βάσει του προτεινόμενου σχήματος, η κατανάλωση ενέργειας λόγω εκπομπής σημάτων ανί-

χνευσης ανά κύκλο είναι ίση με

$$C_E(x) = \begin{cases} \Delta E & 0 \leq x < E_{th} \\ p_p(x) \cdot \Delta E & E_{th} \leq x < E_s \\ p_p(E_s) \cdot \Delta E & E_s \leq x < 1 \end{cases} \quad (7.29)$$

Η πιθανότητα επικοινωνίας είναι ίση με

$$P_c(x) = \begin{cases} P_c^{(2)}(T) & 0 \leq x < E_{th} \\ P_G(x) & E_{th} \leq x < E_s \\ P_{c,min} & E_s \leq x < 1 \end{cases} \quad (7.30)$$

Βάσει της (7.29), ορίζεται η ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω λόγω εκπομπής σημάτων ανίχνευσης ανά κύκλο

$$\Delta C^{(\%)} = 100\% \cdot \int_0^1 \left( \frac{\Delta E - C_E(x)}{\Delta E} \right) dx = 100\% \cdot \left[ \int_{E_{th}}^1 (1 - p_p(x)) dx + (1 - E_s) \cdot (1 - p_p(E_s)) \right] \quad (7.31)$$

για να αποτιμήσει το ενεργειακό όφελος που προκύπτει από την εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος. Το μέγεθος αυτό είναι ανάλογο της επέκτασης της διάρκειας ζωής του δικτύου που επιτυγχάνει το προτεινόμενο σχήμα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση  $x = 1$  υποδηλώνει τον τερματισμό της λειτουργίας των κόμβων. Επομένως, οι ποσότητες  $C_E(x)/\Delta E$  και  $P_c(x)$  μηδενίζονται όταν  $x = 1$ .

## 7.5 Αριθμητικά αποτελέσματα

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν αποσκοπούν στην αξιολόγηση του προτεινόμενου αυτόνομου σχήματος ως προς τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω εκπομπής σημάτων ανίχνευσης, διατηρώντας ταυτόχρονα ένα ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο της πιθανότητας σύναψης επαφών. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για ένα DTN σε περιοχή ανάπτυξης με επιφάνεια  $A=(1000 \times 1000)m^2$ , αποτελούμενο από  $N$  κινητούς κόμβους που ακολουθούν το Poisson μοντέλο κινητικότητας RWP. Με βάση αυτό το σενάριο,

$$\lambda_p = \frac{8 \cdot w \cdot r \cdot u}{\pi \cdot A} \quad (7.32)$$

όπου  $r$  είναι η εμβέλεια των κόμβων,  $u$  η μέση ταχύτητά τους και  $w = 1.3683$ . Στις περισσότερες προσομοιώσεις, η χρονική διάρκεια του κύκλου λειτουργίας των DTN δικτύων τέθηκε ίση με τη μέση διάρκεια μεταξύ δύο επαφών, δηλαδή,  $\lambda \cdot T = 1$ . Συμβολίζοντας με  $d = N/A$

την πυκνότητα των κόμβων, ο βαθμός των κόμβων ( $n = \pi \cdot d \cdot r^2$ ) παρέμεινε πάντα μικρότερος του κατωφλίου συνδεσιμότητας  $n_t = 4.5$ . Οι τιμές των  $u$  και  $r$  που χρησιμοποιήθηκαν είναι τυπικές τιμές που εντοπίζονται στα DTN δίκτυα και κυμαίνονται μεταξύ  $1 - 15m/s$  και  $10 - 150m$ , αντίστοιχα [129, 130].

Αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές επισημαίνουν ότι η διάρκεια επαφής δύο κόμβων σε DTN δίκτυα ακολουθεί την Pareto κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της διάρκειας επαφής δύο κόμβων είναι ίση με

$$F_D(z) = 1 - (z/\tau)^{-k} \quad (7.33)$$

όπου  $k$  και  $\tau$  οι παράμετροι σχήματος και η παράμετρος κλίμακας της Pareto κατανομής, αντίστοιχα.

Υψηλές τιμές της παραμέτρου  $k$  αντιστοιχούν σε μικρή διάρκεια επαφών. Στη διατριβή, οι τιμές του  $k$  λαμβάνονται από το διάστημα  $(0, 4]$  [19, 31, 33, 134]. Η παράμετρος  $\tau$  είναι κρίσιμη για τη DTN λειτουργία, καθώς είναι η μικρότερη τιμή που μπορεί να πάρει η διάρκεια της επαφής δύο κόμβων. Όταν η χρονική διάρκεια του κύκλου  $T$  είναι σταθερή για όλη τη DTN λειτουργία, όπως συμβαίνει όταν οι DTN κόμβοι ακολουθούν το ομογενές Poisson μοντέλο κινητικότητας RWP που έχει υιοθετηθεί στις προσομοιώσεις, υψηλές τιμές του  $\tau$ , και επομένως, του  $\tau/T$ , αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές της χρονικής διάρκειας επαφών. Σε κάθε περίπτωση, αντικαθιστώντας τη (7.33) στις (7.4) και (7.5), επαληθεύεται αριθμητικά ότι η  $P_m(T)$  και η  $P_{m,p}(T)$  είναι φθίνουσες συναρτήσεις του  $k$  και αύξουσες του  $\tau/T$ .

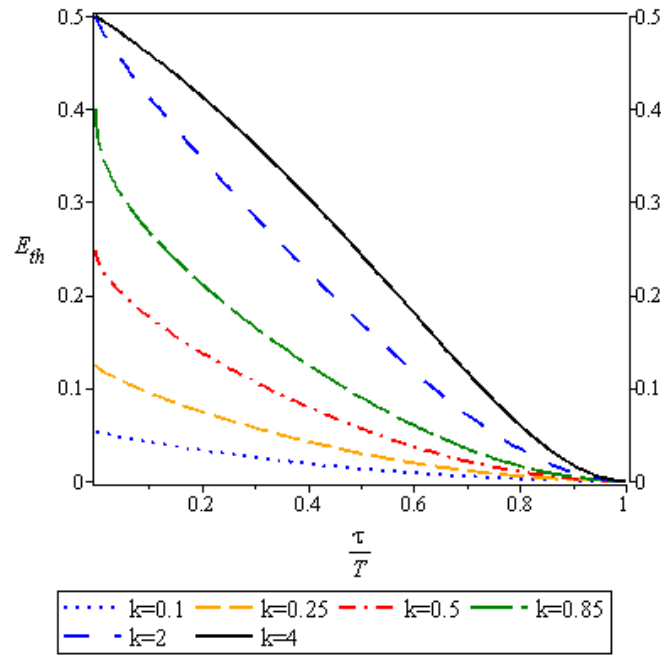
Στις προσομοιώσεις και προκειμένου να διευκολυνθεί η αξιολόγηση του προτεινόμενου σχήματος, η προδιαγραφή της πιθανότητας σύναψης επικοινωνίας  $P_{c,min}$  συσχετίζεται με την πιθανότητα επικοινωνίας  $P_c^{(2)}(T)$  που επιτυγχάνεται απουσία του προτεινόμενου σχήματος. Συγκεκριμένα, τίθεται

$$P_{c,min} = h \cdot P_c^{(2)}(T) \quad 0 \leq h \leq 1 \quad (7.34)$$

όπου η παράμετρος  $h$  αποτελεί μέτρο της αποδεκτής QoS μείωσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πιθανότητα  $P_c^{(2)}(T)$  εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του DTN δικτύου, οι τιμές της σταθεροποιητικής πιθανότητας  $P_{c,min}$  μεταβάλλονται και αυτές αποσκοπώντας στην ανάδειξη της εξάρτησης αυτής. Μεγάλες τιμές του  $h$  αντιστοιχούν σε αυστηρή προδιαγραφή σχετικά με την αποδεκτή μείωση στην πιθανότητα σύναψης επαφής, περιορίζοντας συνακόλουθα το ενεργειακό όφελος που προσφέρει το προτεινόμενο σχήμα.

Το Σχ. 7.1 παρουσιάζει την εξάρτηση του κανονικοποιημένου ενεργειακού κατωφλίου  $E_{th}$  από το  $\tau/T$  για διάφορες τιμές του  $k$ . Όπως είναι φανερό, η  $E_{th}$  είναι φθίνουσα συνάρτηση του  $\tau/T$ . Επομένως, όταν το  $\tau/T$  είναι μικρό, η φάση παιγνίου του προτεινόμενου σχήματος εκκινεί νωρίτερα, αυξάνοντας τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό είναι φανερό και στην αντίστοιχη συμπεριφορά των  $C_E(x)$  και  $\Delta C^{(\%)}$  μεγεθών.

Το Σχ. 7.2 δείχνει την εξάρτηση της διάρκειας της φάσης παιγνίου  $\Delta x = E_s - E_{th}$  από

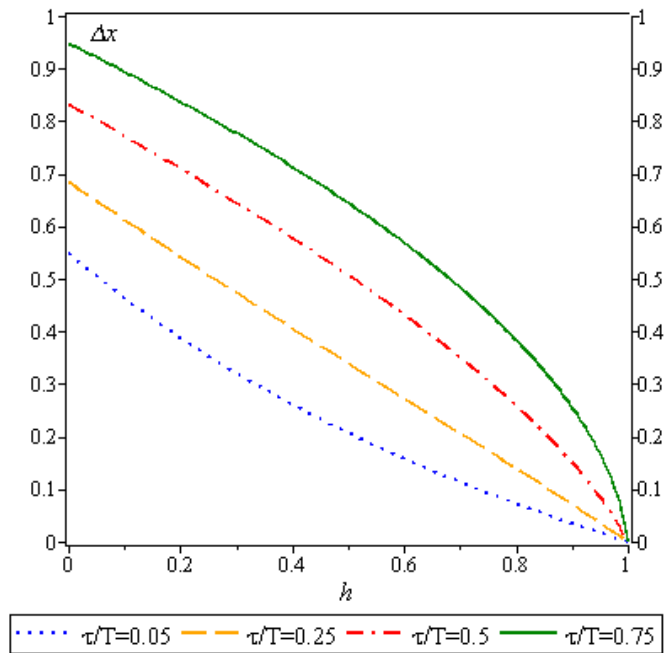


Σχήμα 7.1: Εξάρτηση του κανονικοποιημένου ενεργειακού κατωφλίου  $E_{th}$  από το  $\tau/T$  για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $k$ , ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ,  $n = 1.57$ ).

την παράμετρο  $h$  για διάφορες τιμές του  $\tau/T$ . Η διαφορά  $\Delta x$  σχετίζεται άμεσα με τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω εκπομπής σημάτων ανίχνευσης που επιτυγχάνει το προτεινόμενο σχήμα και αντανακλά την αναμενόμενη επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Επίσης, είναι φανερό ότι, όπως αναμενόταν, η διάρκεια της φάσης παιγνίου και, κατ' επέκταση, το ενεργειακό όφελος που αναμένεται από την εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος μειώνονται καθώς αυξάνεται το  $h$ . Το Σχ. 7.2 δείχνει επίσης ότι στα DTN δίκτυα όπου η διάρκεια των επαφών είναι μεγαλύτερη, δηλαδή για μεγαλύτερες τιμές του  $\tau/T$ , η διαφορά  $\Delta x$  αυξάνεται και αυτή. Συνεπώς, η αναμενόμενη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας επιτείνεται.

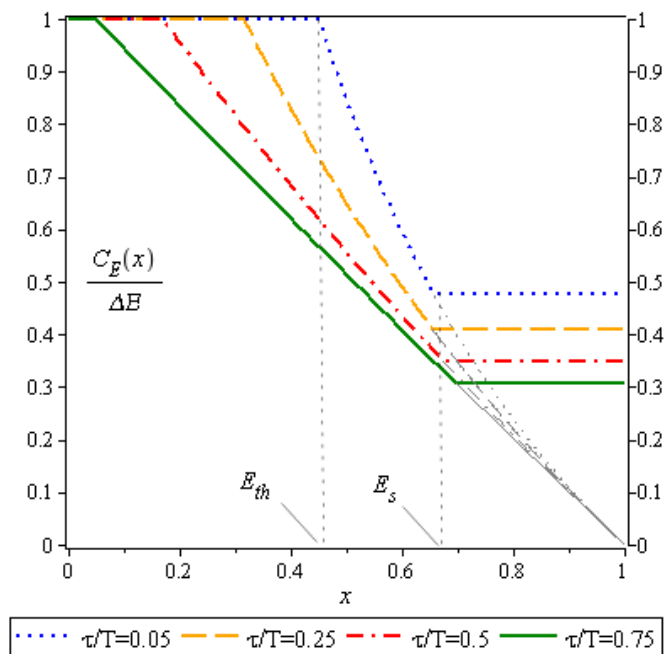
Στα σχήματα που ακολουθούν, το μη χρωματισμένο τμήμα των καμπυλών απεικονίζει τη συμπεριφορά τους όταν δεν υπάρχει η φάση σταθεροποίησης.

Το Σχ. 7.3 απεικονίζει την εξάρτηση της κανονικοποιημένης κατανάλωσης ενέργειας ανά κύκλο λειτουργίας  $C_E(x)/\Delta E$  από το κόστος ανίχνευσης για διάφορες τιμές του  $\tau/T$ . Για την ακρίβεια, για το διάστημα  $E_{th} \leq x < E_s$ , τα διαγράμματα αντιστοιχούν στη συνάρτηση  $p_p(x)$ . Είναι φανερό ότι, όταν το κανονικοποιημένο κόστος ανίχνευσης υπερβεί το  $E_{th}$ , το  $C_E(x)/\Delta E$  εξασθενεί σχετικά απότομα, καθώς οι κόμβοι τείνουν να αποφεύγουν την εκπομπή σημάτων ανίχνευσης. Αυτή η σχετικά απότομη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας ανίχνευσης γίνεται περισσότερο απότομη για χαμηλότερες τιμές του  $\tau/T$ , όπως, άλλωστε, αυτό προβλέπεται από τις αντίστοιχες χαμηλές τιμές του  $E_{th}$ . Για το διάστημα  $E_s \leq x < 1$ , το προτεινόμενο σχήμα σταθεροποιεί το  $C_E(x)/\Delta E$  στο επίπεδο του  $C_E(E_s)/\Delta E$ , που είναι ίσο με  $p_p(E_s)$ .

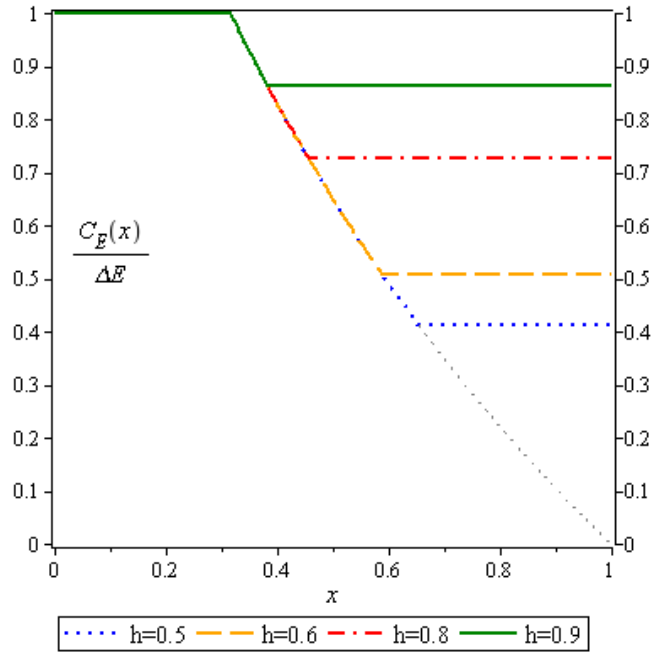


Σχήμα 7.2: Η επίδραση της QoS προδιαγραφής  $h$  στην διαφορά των ενεργειακών καταστάσεων  $\Delta x = E_s - E_{th}$  για διάφορες τιμές του  $\tau/T$ , ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ,  $n = 1.57$ ,  $k = 2$ ).

Το Σχ. 7.4 απεικονίζει την εξάρτηση της κανονικοποιημένης κατανάλωσης ενέργειας ανά κύκλο  $C_E(x)/\Delta E$  από το κόστος ανάγνωσης για διάφορες τιμές του  $h$ . Όταν



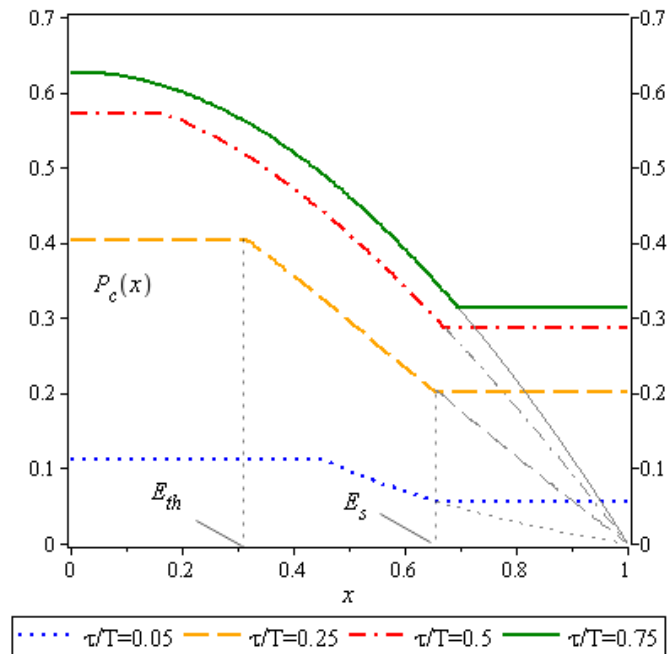
Σχήμα 7.3: Κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας ως συνάρτηση του  $x$  για διάφορες τιμές του  $\tau/T$  ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ,  $n = 1.57$ ,  $h = 0.5$ ,  $k = 2$ ,  $\lambda \cdot T = 1$ ).



Σχήμα 7.4: Κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας ως συνάρτηση του  $x$  για διάφορες τιμές του  $h$  ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ,  $n = 1.57$ ,  $\tau/T = 0.25$ ,  $k = 2$ ,  $\lambda \cdot T = 1$ ).

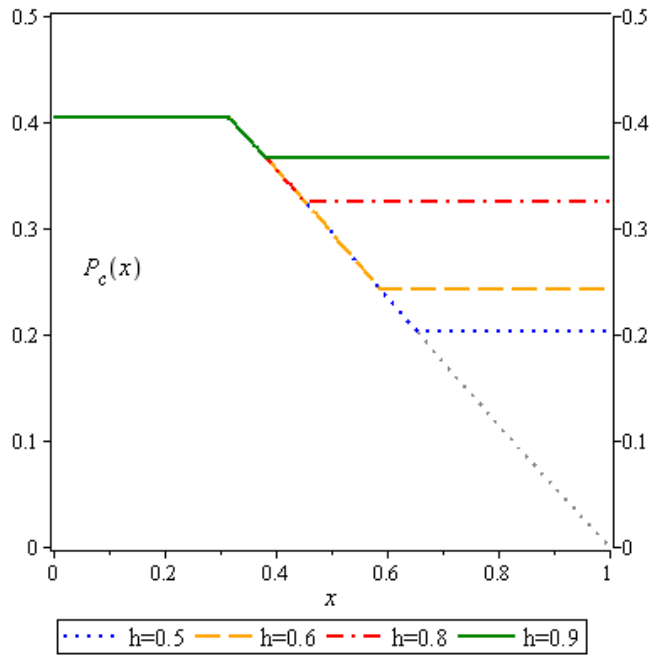
επιτρέπεται μικρή μείωση του επιπέδου QoS, η φάση παιγνίου τερματίζεται νωρίτερα, οδηγώντας σε υψηλότερα επίπεδα της  $C_E(x)/\Delta E$ .

Το Σχ. 7.5 απεικονίζει την εξάρτηση της πιθανότητας σύναψης επικοινωνίας  $P_c(x)$  από



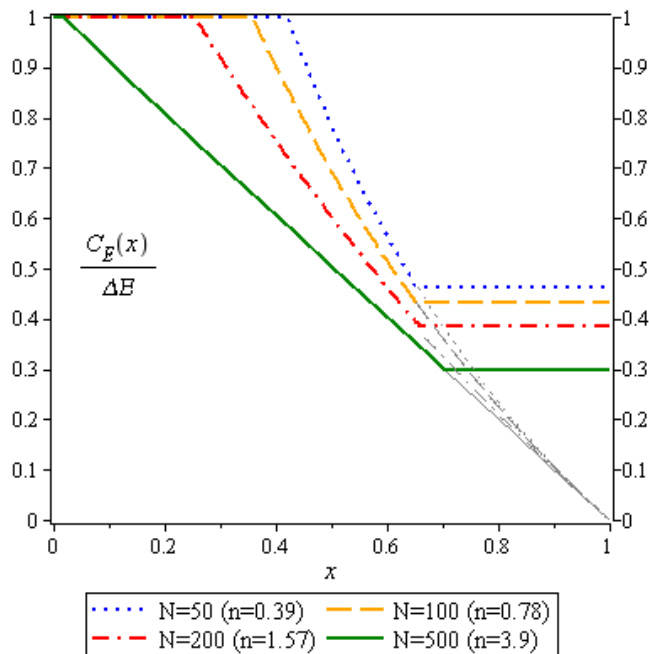
Σχήμα 7.5: Η πιθανότητα επικοινωνίας ως συνάρτηση του  $x$  για διάφορες τιμές του  $\tau/T$  ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ,  $n = 1.57$ ,  $h = 0.5$ ,  $k = 2$ ,  $\lambda \cdot T = 1$ ).



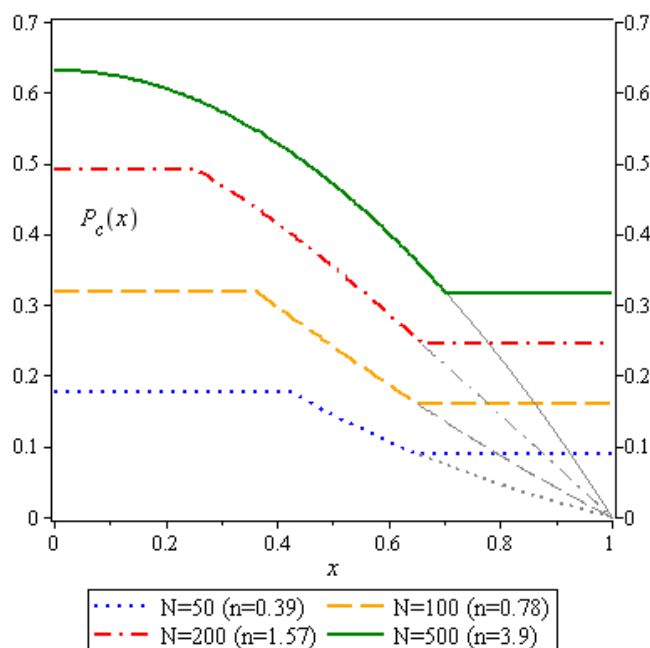


Σχήμα 7.6: Η πιθανότητα επικοινωνίας ως συνάρτηση του  $x$  για διάφορες τιμές του  $h$  ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ,  $n = 1.57$ ,  $\tau/T = 0.25$ ,  $k = 2$ ,  $\lambda \cdot T = 1$ ).

το κόστος ανίχνευσης για διάφορες τιμές του  $\tau/T$ . Είναι φανερό ότι η συμπεριφορά του  $P_c(x)$  ως προς το  $\tau/T$  είναι αντίστροφη της αντίστοιχης συμπεριφοράς του  $C_E(x)/\Delta E$ . Στην πραγματικότητα, η μείωση του  $P_c(x)$  με την αύξηση του  $x$ , δηλαδή το QoS κόστος που



Σχήμα 7.7: Επίδραση του πλήθους των κόμβων  $N$  στην κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ,  $\tau = 10s$ ,  $k = 2$ ,  $h = 0.5$ ,  $\lambda \cdot T = 1$ ).



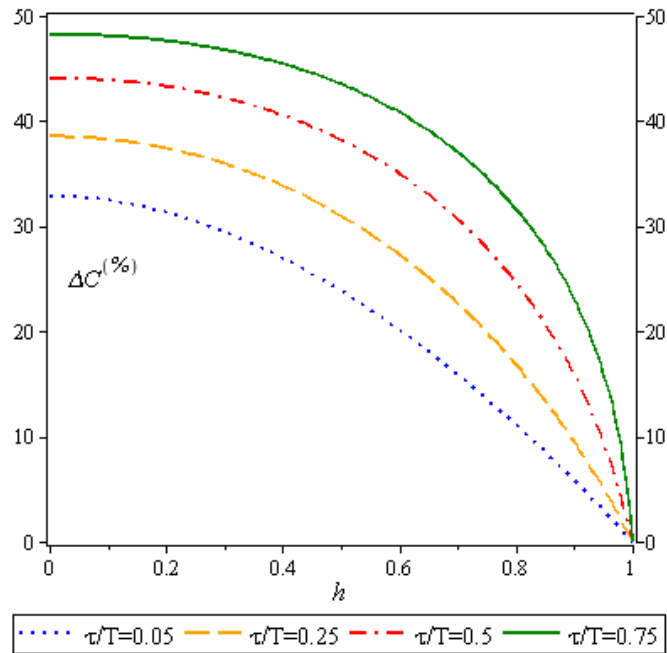
Σχήμα 7.8: Επίδραση του πλήθους των κόμβων  $N$  στην πιθανότητα επικοινωνίας ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ,  $\tau = 10s$ ,  $k = 2$ ,  $h = 0.5$ ,  $\lambda \cdot T = 1$ ).

εισάγεται από την εφαρμογή του σχήματος, είναι ελαφρώς περισσότερο απότομη όσο το  $\tau/T$  μεγαλώνει. Τέλος, για  $E_s \leq x < 1$  η πιθανότητα επικοινωνίας σταθεροποιείται στην τιμή  $P_{c,min} = h \cdot P_c^{(2)}(T)$ , όπως επιβάλλεται από το προτεινόμενο σχήμα.

Το Σχ. 7.6 απεικονίζει την εξάρτηση της πιθανότητας επικοινωνίας  $P_c(x)$  από το κόστος ανάχνευσης για διάφορες τιμές του  $h$ . Όταν επιτρέπεται μικρή μείωση του επιπέδου QoS, η φάση παιγνίου τερματίζεται νωρίτερα προκειμένου να σταθεροποιήσει τη πιθανότητα επικοινωνίας σε υψηλότερα  $P_{c,min}$  επίπεδα.

Τα Σχ. 7.7 και 7.8 απεικονίζουν την εξάρτηση του  $C_E(x)/\Delta E$  και  $P_c(x)$  από το κόστος ανάχνευσης για διάφορες τιμές του  $N$ . Αύξηση του πλήθους των κόμβων  $N$  αντιστοιχεί σε ανάλογη αύξηση του βαθμού των κόμβων  $n$ . Όπως αναμενόταν, σε πυκνά DTN οι κόμβοι τείνουν να αποφεύγουν την εκπομπή ανάχνευσης, καθώς προσδοκούν ότι οι γειτονικοί κόμβοι θα εκπέμπουν σήματα ανάχνευσης. Συνεπώς, παρατηρούνται χαμηλές τιμές του  $C_E(x)/\Delta E$ . Από το Σχ. 7.8 είναι φανερό ότι η συμπεριφορά της πιθανότητας  $P_c(x)$  ως συνάρτησης του  $N$  είναι αντίστροφη της αντίστοιχης συμπεριφοράς του  $C_E(x)/\Delta E$ , καθώς η μείωση του  $P_c(x)$  είναι περισσότερο απότομη για μεγαλύτερες τιμές του  $N$ . Τόσο το Σχ. 7.7 όσο και το 7.8 αποκαλύπτουν ότι το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει μεγαλύτερη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας ανάχνευσης όταν εφαρμόζεται σε πυκνά DTN δίκτυα.

Αναφορικά με την εξάρτηση του προτεινόμενου σχήματος ως προς το  $r$  και το  $u$  και όπως εύκολα προκύπτει από την (7.2) και (7.32), το  $\lambda$  είναι ανάλογο του  $r$  και  $u$ . Όπως επαληθεύεται από τις σχετικές προσομοιώσεις, η συμπεριφορά του  $C_E(x)/\Delta E$  και  $P_c(x)$  ως προς  $r$  ή ως προς  $u$  είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά τους ως προς  $N$ . Συγκεκριμένα,



Σχήμα 7.9: Ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ως συνάρτηση του  $h$  για διάφορες τιμές του  $\tau/T$  ( $r = 50m$ ,  $u = 1m/s$ ,  $n = 1.57$ ,  $k = 2$ ,  $\lambda \cdot T = 1$ ).

υψηλότερες τιμές του  $r$  και του  $u$  οδηγούν σε αυξημένη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανίχνευσης.

Στο Σχ. 7.9 σχεδιάζεται το ποσοστιαίο μέτρο απόδοσης  $\Delta C^{(\%)}$  ως προς την παράμετρο αποδεκτής QoS χειροτέρευσης  $h$  για διάφορες τιμές του  $\tau/T$ . Εύκολα προκύπτει ότι το προτεινόμενο σχήμα συμβάλλει σημαντικά στην επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας ανίχνευσης και επιτρέποντας ταυτόχρονα αποδεκτή μείωση της πιθανότητας επικοινωνίας. Το Σχ. 7.9 αποκαλύπτει ότι σε DTN δίκτυα όπου είναι ανεκτά χαμηλά επίπεδα της πιθανότητας επικοινωνίας, το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανίχνευσης. Το Σχ. 7.9 επαληθεύει ότι, όσο το  $\tau/T$  αυξάνεται, το  $\Delta C^{(\%)}$  αυξάνεται επίσης, καθώς όταν η διάρκεια επαφής μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας, οι DTN κόμβοι τείνουν να αποφεύγουν την εκπομπή σημάτων ανίχνευσης, προσδοκώντας ότι αυτό θα το κάνει κάποιος γειτονικός κόμβος.

Συμπερασματικά, το προτεινόμενο σχήμα προσφέρει σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας διατηρώντας ταυτόχρονα ένα (ελάχιστο) αποδεκτό επίπεδο της πιθανότητας επικοινωνίας, όπως αυτό επιβάλλεται από τις σχετικές QoS προδιαγραφές. Εφόσον το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να διαχειριστεί αποδοτικά τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας για εκπομπή σημάτων ανίχνευσης και της πιθανότητας επικοινωνίας, είναι κατάλληλο για ενεργειακά περιορισμένα αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα, ειδικά για τα πυκνότερα DTN δίκτυα. Η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας που επιτυγχάνεται οδηγεί σε σημαντική επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου που μπορεί να είναι κρίσιμη για τα

αυτο-οργανούμενα DTN δίκτυα που επιδέχονται μείωση στην πιθανότητα επικοινωνίας.

## 7.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό της διατριβής παρουσιάστηκε ένα αυτόνομο σχήμα ενεργητικής ανίχνευσης που προορίζεται για αυτο-οργανούμενα, ενεργειακά περιορισμένα DTN δίκτυα. Το σχήμα αποσκοπεί στη ρύθμιση της διαδικασίας ενεργητικής ανίχνευσης των κόμβων. Ακολουθώντας το προτεινόμενο παίγνιο ανίχνευσης δύο παικτών, οι DTN κόμβοι αποφασίζουν αυτόνομα αν θα εκπέμψουν ή όχι σήματα ανίχνευσης βάσει της εναπομένουσας ενέργειάς τους. Το προτεινόμενο σχήμα ενεργητικής ανίχνευσης των κόμβων διαχειρίζεται τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας ανίχνευσης και της πιθανότητας επικοινωνίας, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, διατηρώντας, παράλληλα, ένα ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο της πιθανότητας επικοινωνίας. Σε αυτο-οργανούμενα δίκτυα που επιδέχονται μείωση της πιθανότητας επικοινωνίας, το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να επεκτείνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

## Κεφάλαιο 8

### Συμπεράσματα της διατριβής

Οι εγγενείς περιορισμοί που χαρακτηρίζουν τα DTN δίκτυα, σε συνδυασμό με την ανάγκη επιμήκυνσης της διάρκειας ζωής των περιορισμένων ενεργειακά κόμβων τους, παρακινούν τους ερευνητές στην κατεύθυνση της λειτουργικής αναβάθμισης των κόμβων ώστε να επιτελούν αυτόνομα απαιτητικές διεργασίες που αποσκοπούν στην αποδοτική διαχείριση της εναπομένουσας ενέργειάς τους. Λαμβάνοντας ως δεδομένη την αυτόνομη δράση των κόμβων, τα προτεινόμενα σχήματα καλούνται να αντιμετωπίσουν προβλήματα βελτιστοποίησης συγκεκριμένων μέτρων επίδοσης των εκάστοτε υπό μελέτη DTN δικτύων. Στο πλαίσιο αυτό, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη συνυπολογισμού των εναπομενόντων ενεργειακών πόρων στις τοπικές αποφάσεις που καλούνται να λάβουν οι κόμβοι.

Η παρούσα διατριβή μελετά την ενεργειακά αποδοτική λειτουργία των DTN δικτύων ως προς (i) τη μείωση της πλεονάζουσας πληροφορίας που διακινείται στο δίκτυο, (ii) την ενεργειακά αποδοτική ρύθμιση κινητικότητας των DTN κόμβων και (iii) τη βελτίωση της διαδικασίας της ενεργητικής ανίχνευσης δικτύου. Στο πλαίσιο της διατριβής, προτάθηκαν ενεργειακά αποδοτικά σχήματα που επιτυγχάνουν τη δραστική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και, συνακόλουθα, επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των ενεργειακά περιορισμένων κόμβων και του δικτύου συνολικά.

Ενδιαφέροντα μελλοντικά ερευνητικά θέματα αποτελούν η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων στη βελτιστοποίηση προβλημάτων που προκύπτουν από τη χρήση της κωδικοποίησης δικτύου σε DTN δίκτυα, η επέκταση των προτεινόμενων σχημάτων για διαχείριση της κινητικότητας και της ενεργητικής ανίχνευσης δικτύου σε περιπτώσεις όπου οι DTN κόμβοι ακολουθούν κοινωνικά μοντέλα κινητικότητας, όπου ο ρυθμός επαφών εμφανίζει χωρικές και χρονικές εξαρτήσεις, και συγγραφή εργασίας που εξετάζει και ταξινομεί συστηματικά τις ερευνητικές προσπάθειες που άπτονται της ελεγχόμενης κινητικότητας και της παθητικής/ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα.



# Παράρτημα Α

## Ανίχνευση δικτύου στα αυτο-οργανούμενα DTN

### A.1 Εισαγωγή

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται η διαδικασία ανίχνευσης στα DTN δίκτυα, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας με τα οποία επιτυγχάνεται η ανίχνευση των κόμβων καθώς και οι ερευνητικές προσπάθειες που άπτονται του συγκεκριμένου ερευνητικού θέματος.

### A.2 Ανίχνευση δικτύου στα DTN

Σημαντικό παράγοντα για την επίτευξη επικοινωνίας στα DTN αποτελεί η διαδικασία ανίχνευσης δικτύου από τους κόμβους. Όταν τα δίκτυα είναι αραιά, η κατάλληλη ρύθμιση της διαδικασίας αυτής είναι κρίσιμη, αφού η επίτευξη επικοινωνίας αποτελεί προϋπόθεση για την ανταλλαγή δεδομένων. Ωστόσο, αν η διαδικασία ανίχνευσης δεν σχεδιαστεί ορθά, μπορεί να οδηγήσει σε άσκοπη κατανάλωση ενέργειας ή σε απώλεια πιθανών ευκαιριών επίτευξης επικοινωνίας με γειτονικούς κόμβους. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται από τους DTN κόμβους οφείλεται στην εκπομπή σημάτων για την ανίχνευση του δικτύου [135–137]. Η δυναμική φύση των DTN δικτύων ευνοεί την ανάπτυξη κατανεμημένων σχημάτων ανίχνευσης δικτύου που βασίζονται σε τοπικές αποφάσεις που λαμβάνονται από τους κόμβους κατά αυτόνομο τρόπο.

Η διαδικασία της ανίχνευσης δικτύου για γειτονικό κόμβο διαφέρει, ανάλογα με το πρωτόκολλο επικοινωνίας.

#### A.2.1 Bluetooth

Οι προδιαγραφές του Bluetooth πρωτοκόλλου επικοινωνίας ορίζουν τα στρώματα μιας τυπικής στοίβας δικτυακών πρωτοκόλλων, από το φυσικό μέχρι και το στρώμα εφαρμογής [133]. Το Bluetooth πρωτόκολλο λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz ISM (Industrial, Scientific και Medical), την οποία μοιράζεται με άλλες εφαρμογές, όπως IEEE 802.11 σταθ-

μούς. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιεί την τεχνική FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) προκειμένου να αποφεύγονται οι παρεμβολές.

Κατά τη διάρκεια ανίχνευσης δικτύου, η συσκευή ανίχνευσης αποστέλλει σήματα ανίχνευσης περιοδικά και περιμένει για απαντήσεις ενώ η συσκευή σάρωσης σαρώνει τα ασύρματα κανάλια και αποστέλλει απαντήσεις. Σε κάθε χρονοσχισμή, η συσκευή ανίχνευσης αποστέλλει δύο σήματα ανίχνευσης σε δύο διαφορετικά κανάλια και αναμένει απάντηση στα ίδια κανάλια. Η συσκευή ανίχνευσης, το Bluetooth ελέγχει τη διάρκεια και συχνότητα σάρωσης μέσω του παραθύρου σάρωσης (scan window) και της συχνότητας σάρωσης (scan interval), αντίστοιχα.

### **A.2.2 Bluetooth χαμηλής ενέργειας**

Το πρωτόκολλο Bluetooth χαμηλής ενέργειας LE (Low Energy) [133] λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 2400-2483.5MHz την οποία χωρίζει σε 40 κανάλια εύρους 2MHz, σε αντίθεση με τα 79 κανάλια εύρους 1MHz του κλασικού Bluetooth πρωτοκόλλου. Εξ αυτών, τα κανάλια 37, 38 και 39 χρησιμοποιούνται για ανίχνευση του δικτύου ενώ τα υπόλοιπα είναι κανάλια δεδομένων.

Σε αντίθεση με το κλασικό πρωτόκολλο Bluetooth, το LE Bluetooth χρησιμοποιεί τρία κανάλια για τη διαδικασία ανίχνευσης δικτύου: το διαφημιστικό, το κανάλι σάρωσης και το κανάλι αρχικοποιήσεων. Στο διαφημιστικό κανάλι, κάθε κόμβος αποστέλλει ένα ή περισσότερα σήματα τα οποία περιέχουν τη διεύθυνση συσκευής του. Στο κανάλι σάρωσης ή αρχικοποιήσεων, οι κόμβοι σαρώνει περιοδικά το διαφημιστικό κανάλι με διάρκεια ίση με το παράθυρο σάρωσης και συχνότητα ίση με τη συχνότητα σάρωσης.

### **A.2.3 WiFi**

Οι σταθμοί WiFi και οι ad-hoc κόμβοι αποστέλλουν περιοδικά σήματα ανίχνευσης (beacon messages) για να δηλώσουν την παρουσία τους στο δίκτυο [133]. Τα σήματα ανίχνευσης περιέχουν πληροφορίες περί του αποστέλλοντος κόμβου, όπως το όνομα του δικτύου στο οποίο ανήκει (SSID) και τις δυνατότητες του. Προκειμένου να δομηθεί ένα ευκαιριακό δίκτυο από κόμβους που επικοινωνούν με WiFi, οι κόμβοι πρέπει να λειτουργούν ως ad-hoc. Εκτός από την αποστολή σημάτων ανίχνευσης, ένας κόμβος WiFi σαρώνει επίσης τα κανάλια επικοινωνίας προς ανεύρεση γειτονικών κόμβων.

Υπάρχουν δύο τρόποι ανίχνευσης WiFi: ο παθητικός και ο ενεργητικός. Κατά την παθητική ανίχνευση, η διεπαφή WiFi σαρώνει περιοδικά τα ασύρματα κανάλια προκειμένου να λάβει σήματα ανίχνευσης από γειτονικούς κόμβους. Οι κόμβοι αλλάζουν περιοδικά κανάλια ενώ σε αυτόν τον τρόπο ανίχνευσης δεν αποστέλλουν σήματα ανίχνευσης. Κατά την ενεργητική ανίχνευση, οι κόμβοι εκπέμπουν σήματα ανίχνευσης σε όλα τα ασύρματα κανάλια λειτουργίας του δικτύου (1-11) αναμένοντας απαντητικά σήματα από γειτονικούς κόμβους.



Τα απαντητικά σήματα περιέχουν πληροφορία όμοια με τα σήματα ανίχνευσης.

#### **A.2.4 Zigbee**

Το Zigbee αποτελεί πρωτόκολλο χαμηλού κόστους και ενέργειας που χρησιμοποιείται σε συσκευές ελέγχου και παρακολούθησης. Οι διατάξεις Zigbee είναι εξοπλισμένες με μνήμη μεγέθους 60-256 KB και λειτουργούν στη συχνότητα 868 MHz στην Ευρώπη, στην 784MHz στην Κίνα και στην 915MHz στην Αμερική.

Οι κόμβοι που για την επικοινωνία τους χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο Zigbee τους χρειάζονται πληροφορίες προκειμένου να καταστήσουν εφικτή την επικοινωνία με άλλους κόμβους. Και σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία ανίχνευσης δικτύου πραγματοποιείται με δύο ειδών σάρωσεις: την παθητική και την ενεργητική. Κατά την παθητική σάρωση, οι κόμβοι σαρώνουν περιοδικά τα Zigbee κανάλια χωρίς να αποστέλλουν σήματα ανίχνευσης ενώ στην ενεργητική σάρωση οι κόμβοι, αποστέλλουν μέσω ευρυεκπομπής σήματα ανίχνευσης σε όλα τα κανάλια Zigbee.

### **A.3 Μοντέλα ανίχνευσης DTN δικτύων**

Με σκοπό την εύρεση του κατάλληλου τρόπου και συχνότητας ανίχνευσης δικτύου, έχουν αναπτυχθεί διάφορα σχήματα που επιτυγχάνουν την εξισορρόπηση της κατανάλωσης ενέργειας για ανίχνευση και της πιθανότητας απώλειας ευκαιριών επαφής. Τα σχήματα αυτά διακρίνονται σε δύο ευρείες κατηγορίες, αυτά που ασχολούνται με τη διαχείριση της αδρανούς κατάστασης των κόμβων (sleep management) και αυτά που ασχολούνται με τη διαχείριση του μηχανισμού αποστολής σημάτων ανίχνευσης δικτύου (contact probing management). Η πρώτη κατηγορία αφορά την παθητική ανίχνευση δικτύου ενώ η δεύτερη την ενεργητική ανίχνευση δικτύου.

#### **A.3.1 Παθητική ανίχνευση δικτύου**

Η διαχείριση της αδρανούς κατάστασης των κόμβων (άλλως με την παθητική ανίχνευση) μπορεί να υλοποιηθεί με τρεις τρόπους: κατα παραγγελία ενεργοποίηση (on-demand wakeup), προγραμματισμένη ενεργοποίηση (scheduled wakeup) και ασύγχρονη ενεργοποίηση της διεπαφής επικοινωνίας των κόμβων (asynchronous wakeup) [138]. Τα σχήματα που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία αφορούν κόμβους που διαθέτουν δεύτερη διεπαφή επικοινωνίας [139], δηλαδή κεραία [140] ή RFID διεπαφή [141], που χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του κόμβου προκειμένου να ανταλλάξει πληροφορία με γειτονικούς κόμβους. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν κόμβοι που ενεργοποιούν τη διεπαφή επικοινωνίας τους κατά προγραμματισμένο και συγχρονισμένο τρόπο προκειμένου να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Η περιοδική ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της κεραίας των κόμβων προκειμένου να εξοικονομηθεί

ενέργεια ονομάζεται προγραμματισμός αδρανοποίησης (duty cycling, sleep scheduling). Για ασύρματα δίκτυα πολλαπλών αλμάτων (multihop wireless networks), οι κόμβοι μπορούν συνεργατικά να ρυθμίζουν την κατάσταση των διεπαφών επικοινωνίας τους προκειμένου να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας διατηρώντας ταυτόχρονα τη συνδεσιμότητα των κόμβων [142]. Ωστόσο, τα σχήματα με προγραμματισμένη ρύθμιση των καταστάσεων επικοινωνίας των κόμβων απαιτούν συγχρονισμό. Κατά την ασύγχρονη ενεργοποίηση των διεπαφών επικοινωνίας, οι κόμβοι ενεργοποιούνται σε προδιαγεγραμμένα χρονικά διαστήματα που εγγυώνται χρονική επικάλυψη με τις ενεργοποιήσεις γειτονικών κόμβων [143–145]. Η ασύγχρονη αυτή λειτουργία ενδείκνυται για δίκτυα όπου ο συγχρονισμός των κόμβων είναι αδύνατος. Τα σχήματα που ανήκουν στην κατηγορία αυτή προσπαθούν να βελτιώσουν την απόδοση του δικτύου βελτιστοποιώντας συγκεκριμένες παραμέτρους [146–151].

### **A.3.2 Ενεργητική ανίχνευση δικτύου**

Στην κατηγορία των σχημάτων που ασχολούνται με τη διαχείριση του μηχανισμού αποστολής σημάτων ανίχνευσης δικτύου (άλλως ενεργητικής ανίχνευση) ανήκουν τα σχήματα που διαχειρίζονται τη συχνότητα των σημάτων ανίχνευσης (probes) των κόμβων. Κάποια από αυτά λαμβάνουν υπόψη τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της καθυστέρησης εντοπισμού επαφής και της κατανάλωσης ενέργειας λόγω εκπομπής, ενώ άλλα σχήματα λαμβάνουν υπόψη τη σχέση ανταλλαγής μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας λόγω εκπομπής και της πιθανότητας εντοπισμού επαφής. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν σχήματα όπως το Disco [152], το U-Connect [153] και το Searchlight [154], τα οποία αναφέρονται στην ασύγχρονη λειτουργία των κόμβων σχετικά με την ενεργοποίηση της διεπαφής επικοινωνίας τους. Κατά τη διάρκεια των διαστημάτων όπου η διεπαφή είναι ενεργοποιημένη, οι κόμβοι μπορούν να απνοοστέλλουν ή όχι σήματα ανίχνευσης, υλοποιώντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ενεργητική ανίχνευση. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν σχήματα που υπολογίζουν το βέλτιστο διάστημα μεταξύ δύο εκπομπών σημάτων ανίχνευσης [133], [124, 125, 132, 155, 156].

# Παράρτημα Β

## Θεωρία Παιγνίων

### B.1 Εισαγωγή

Η θεωρία παιγνίων (Game Theory) παρέχει τη μαθηματική βάση για την ανάλυση διαδραστικών διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Παρέχει εργαλεία για την πρόβλεψη της έκβασης καταστάσεων όπου δρουν *λογικές* οντότητες με αντικρουόμενα ή κοινά συμφέροντα. Παρέχει, επίσης, ένα σύνολο μεθόδων μαθηματικής διατύπωσης που συμβάλλουν στην κατανόηση και λύση προβλημάτων στα οποία πρέπει να ληφθούν αποφάσεις από πολλές διαφορετικές οντότητες. Τις τελευταίες δεκαετίες, η θεωρία παιγνίων έχει εφαρμοστεί στην επίλυση τηλεπικοινωνιακών προβλημάτων στα οποία συμμετέχουν οντότητες όπως δικτυακοί κόμβοι, αισθητήρες, κινητοί κόμβοι [157–159].

Ένα παίγνιο περιλαμβάνει τρία σύνολα: (i) το σύνολο των παικτών, (ii) το σύνολο των δράσεων/στρατηγικών και (iii) το σύνολο των οφελών. Οι παίκτες είναι αυτοί που λαμβάνουν τις αποφάσεις στο εκάστοτε υπό μελέτη πρόβλημα. Για παράδειγμα, σε ένα ασύρματο δίκτυο οι παίκτες είναι συχνά οι κόμβοι του δικτύου και οι δράσεις είναι οι επιλογές που είναι διαθέσιμες σε κάθε κόμβο. Κάθε παίκτης επιλέγει μια δράση ενώ το σύνολο όλων των δράσεων των παικτών του δικτύου καθορίζει το αποτέλεσμα του παιγνίου. Όφελος ενός παίκτη είναι η ανταμοιβή που αποκομίζει αντίστοιχα προς τη δράση που έχει επιλέξει. Η *σειρά προτίμησης* (preference order) κάθε παίκτη εκφράζει την προτίμηση του παίκτη στο διαθέσιμο πλήθος δράσεων. Σε πολλές περιπτώσεις, η σχέση προτίμησης εκφράζεται μέσω μιας *συνάρτησης χρησιμότητας* (utility function) η οποία αποδίδει μία τιμή σε κάθε πιθανό ενδεχόμενο. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή τόσο περισσότερο επιθυμητό είναι το αντίστοιχο ενδεχόμενο. Η κατάλληλη μαθηματική διατύπωση των σχέσεων προτίμησης αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις για την εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων.

#### B.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Οι ρίζες της θεωρίας παιγνίων είναι παλαιές. Οι πρώτες αναφορές βρίσκονται στο αρχαίο ιερό κείμενο των Βαβυλωνίων, το Ταλμούδ [160], όπου γίνεται λεπτομερής περιγραφή του

		Προτεραιότητα Γυναικών		
		100	200	300
Περιουσία Άνδρα	100	100/3	100/3	100/3
	200	50	75	75
	300	50	100	150

*Πίνακας Β.1: Το παίγνιο του προγραμμαίου συμβολαίου στο Ταλμούδ, το ιερό κείμενο των Βαβυλωνίων.*

προβλήματος του προγραμμαίου συμβολαίου. Στο πρόβλημα αυτό, ένας άνδρας έχει τρεις συζύγους οι οποίες σε περίπτωση θανάτου του θα κληρονομήσουν 100, 200 και 300 χρυσά νομίσματα, αντίστοιχα. Στην περίπτωση όπου τα περιουσιακά στοιχεία του άνδρα είναι μόνο 100 νομίσματα, το Ταλμούδ προτείνει η διανομή της περιουσίας να γίνει ισόποσα. Όμως, εφόσον τα περιουσιακά στοιχεία αξίζουν 300 νομίσματα, η μοιρασιά γίνεται αναλογικά, δηλαδή, η πρώτη γυναίκα θα πάρει 50, η δεύτερη 100 και η τρίτη 150. Τέλος, αν τα περιουσιακά στοιχεία έχουν αξία 200 η διανομή που προτείνει το Ταλμούδ είναι 50, 75 και 75 αντίστοιχα. Ο λόγος που προτάθηκε αυτός ο τρόπος διανομής αποτέλεσε μυστήριο για περισσότερο από δύο χιλιετίες. Τελικά, η απάντηση δόθηκε το 1985 όταν διαπιστώθηκε ότι αποτελούσαν τις λύσεις τριών διαφορετικών προβλημάτων συνεργατικής θεωρίας παιγνίων. Ο Πίνακας Β.1 παρουσιάζει το προγραμμαίο συμβόλαιο των Βαβυλωνίων.

Στη σύγχρονη μορφή της, η αρχική διατύπωση της θεωρίας παιγνίων αποδίδεται στον John von Neuman (1928) ο οποίος ανακάλυψε και διατύπωσε τη σχέση της θεωρίας παιγνίων με το γραμμικό προγραμματισμό. Αργότερα, ο George B. Dantzig ανέπτυξε τη θεωρία simplex του γραμμικού προγραμματισμού και έτσι δόθηκε η δυνατότητα να επιλυθούν πολλά προβλήματα της θεωρίας παιγνίων. Στη συνέχεια, με την πολύτιμη συνεισφορά του Αμερικανού μαθηματικού John Nash, η θεωρία παιγνίων αναπτύχθηκε σημαντικά. Για την προσφορά του αυτή ο Nash τιμήθηκε με το βραβείο Nobel οικονομίας. Από τότε, η θεωρία παιγνίων βρήκε εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως στη βιολογία, στα οικονομικά και στις επιστήμες πληροφορικής. Κλασικά παραδείγματα παιγνίων αποτελούν το σκάκι και το πόκερ, στα οποία οι παίκτες χρησιμοποιώντας ένα σύνολο στρατηγικών αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση του προσωπικού τους οφέλους. Επιπλέον, οι διαπραγματεύσεις που γίνονται καθημερινά για την αγορά αγαθών ή ακόμη η απόφαση ενός οδηγού για το ποιο δρόμο να διαλέξει σε συνδυασμό με την τρέχουσα κυκλοφοριακή κίνηση αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής της θεωρίας παιγνίων.

		Παίκτης 2	
		Σιωπό (Σ)	Μαρτυρώ (Μ)
Παίκτης 1	Σιωπό (Σ)	(3, 3)	(0, 4)
	Μαρτυρώ (Μ)	(4, 0)	(1, 1)

Πίνακας Β.2: Το παίγνιο του “Διλήμματος του Φυλακισμένου”.

## B.2 Μαθηματική περιγραφή και κατηγοριοποίηση των παιγνίων

Ο ορισμός ενός παιγνίου εξαρτάται από τη μαθηματική περιγραφή του. Σε αυτή την ενότητα, τρεις περιγραφές παιγνίων λαμβάνονται υπόψη. Η κατηγοριοποίηση των παιγνίων αποσκοπεί στην περαιτέρω ανάλυση τους.

### B.2.1 Μαθηματική περιγραφή παιγνίων

Υπάρχουν τρεις βασικές περιγραφές παιγνίων:

- Η κανονική ή στρατηγική περιγραφή
- Η εκτενής περιγραφή
- Η περιγραφή συνασπισμού

#### B.2.1.1 Η κανονική ή στρατηγική περιγραφή

Ένα παίγνιο κανονικής μορφής ορίζεται από την τριάδα  $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{S}, \mathcal{U})$ , όπου  $\mathcal{N}$  είναι το πλήθος των κόμβων στο δίκτυο,  $\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{N}} = \mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2 \times \dots \times \mathcal{S}_{|\mathcal{N}|}$  το σύνολο των διαθέσιμων προφίλ στρατηγικών, όπου  $\mathcal{S}_i$  είναι το διαθέσιμο σύνολο των στρατηγικών του παίκτη  $n_i$  και  $\mathcal{U} = \{u_i\}_{i \in \mathcal{N}}$  η συνάρτηση που αποδίδει σε κάθε παίκτη μια τιμή ανταμοιβής (οφέλους) αντίστοιχα προς το εκάστοτε προφίλ στρατηγικών που ακολουθείται από όλους τους παίκτες στο δίκτυο [160, 161]. Η κανονική ή στρατηγική μορφή χρησιμοποιείται συχνότερα από όλες τις περιγραφών παιγνίων τόσο στη θεωρία παιγνίων όσο και στη βιβλιογραφία των ασύρματων επικοινωνιών καθώς είναι εύχρηστη για μαθηματική ανάλυση.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα παιγνίου αποτελεί το “Δίλημμα του φυλακισμένου” (Prisoner’s Dilemma). Το άρχικο πλαίσιο του παιγνίου τέθηκε από τους Flood και Dresher το 1950. Μία εκδοχή του παιγνίου περιγράφεται ακολούθως (Stanford εγκυκλοπαίδεια 2007).

Δύο ύποπτοι συλλαμβάνονται από την αστυνομία. Οι αστυνομικοί έχουν ανεπαρκή στοιχεία σε βάρος τους και, κρατώντας απομονωμένους τους φυλακισμένους, τους επισκέπτονται για να τους κάνουν την ίδια προσφορά. Αν ένας από τους δύο μαρτυρήσει υπέρ της ποινικής δίωξης του άλλου (λιποταξία-defection) και ο άλλος σιωπήσει, ο λιποτάκτης ελευθερώνεται και ο σιωπών καταδικάζεται σε ποινή φυλάκισης δέκα ετών. Αν και οι δυο σιωπήσουν,

		Παίκτης 2	
		Προωθώ (Π)	Απορρίπτω (Α)
Παίκτης 1	Προωθώ (Π)	$(1 - c, 1 - c)$	$(-c, 1)$
	Απορρίπτω (Α)	$(1, -c)$	$(0, 0)$

Πίνακας Β.3: Το παίγνιο του “Διλήμματος του Διαβιβαστή”.

οι δύο φυλακισμένοι καταδικάζονται σε ποινή φυλάκισης έξι μηνών. Αν και οι δυο μαρτυρήσουν, καθένας καταδικάζεται σε πέντε χρόνια φυλάκισης. Οι φυλακισμένοι μπορούν να μαρτυρήσουν ή να παραμείνουν σιωπηλοί. Θεωρώντας ότι το παίγνιο παίζεται μία φορά, η κανονική/στρατηγική μορφή του παιγνίου προσδιορίζεται ως ακολούθως:

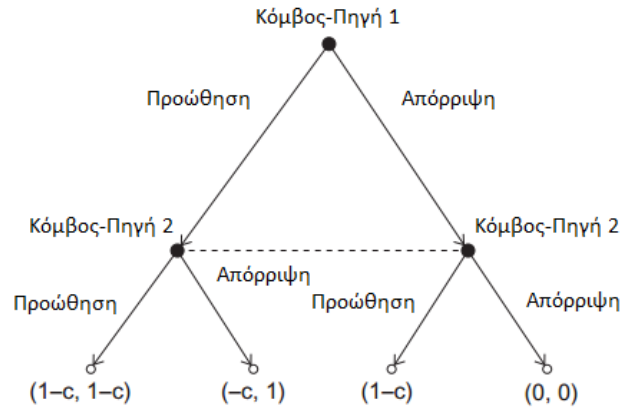
- Οι παίκτες είναι οι δύο φυλακισμένοι, οι οποίοι ονομάζονται 1 και 2. Επομένως, το σύνολο των παικτών είναι το  $\mathcal{N}^{\Delta\Phi} = \{1, 2\}$ .
- Οι επιλογές κινήσεων των φυλακισμένων είναι δύο: να μαρτυρήσουν ή να σιωπήσουν. Αυτές διαμορφώνουν το σύνολο των δράσεων τους  $\{\mathcal{A}_i^{\Delta\Phi}\}_{i \in \mathcal{N}} = \{\text{Μαρτυρώ}, \text{Σιωπώ}\}$ .
- Υπάρχει άπειρος αριθμός πιθανών συναρτήσεων χρησιμότητας για να διατυπωθεί μαθηματικά αυτή η διαδραστική κατάσταση. Θεωρώντας ότι το να παραμείνει ελεύθερος ο φυλακισμένος ισοδυναμεί με τέσσερις μονάδες και για τους δύο, το να μείνει στη φυλακή για έξι μήνες ισοδυναμεί με τρεις μονάδες, το να μείνει στη φυλακή για πέντε χρόνια ισοδυναμεί με μία μονάδα και το να μείνει στη φυλακή για δέκα χρόνια ισοδυναμεί με μηδέν μονάδες.

Η τριάδα  $(\mathcal{N}^{\Delta\Phi}, \mathcal{S}^{\Delta\Phi}, \mathbf{u}^{\Delta\Phi})$  είναι η στρατηγική μορφή του παιγνίου. Μια εύχρηστη περιγραφή της κανονικής/στρατηγικής μορφής είναι αυτή που πραγματοποιείται με τη χρήση πίνακα. Στον Πίνακα Β.2 παρουσιάζεται το παίγνιο “το δίλημμα του φυλακισμένου”.

Μια ασύρματη εκδοχή αυτού του προβλήματος είναι το “Δίλημμα του διαβιβαστή” από τους Felegyhazi και Hubaux (2006). Δύο κόμβοι-πηγές επιθυμούν να στείλουν ένα πακέτο στους κόμβους-προορισμούς τους, αντίστοιχα. Προκειμένου να φθάσει στον κόμβο - προορισμό, το πακέτο πρέπει να περάσει από ένα ενδιάμεσο κόμβο, ο οποίος είναι ο άλλος κόμβος-πηγή. Κάθε κόμβος-πηγή αποφασίζει αν θα προωθήσει το πακέτο στον εκάστοτε κόμβο - προορισμό της άλλης πηγής (Forward) ή να το απορρίψει (drop). Η συνάρτηση χρησιμότητας προκύπτει από τη σχέση “Χρησιμότητα=Όφελος-Κόστος” όπου το όφελος είναι 1 αν το πακέτο προωθηθεί και μηδέν αν απορριφθεί. Το κόστος προώθησης τίθεται ίσο με  $c > 0$ . Ο Πίνακας Β.3 απεικονίζει το παίγνιο του “Διλήμματος του διαβιβαστή”.

### Β.2.1.2 Η εκτενής περιγραφή

Το χαρακτηριστικό της εκτενούς περιγραφής παιγνίου είναι το δένδρο, το οποίο είναι χρήσιμο για τα παίγνια που παίζονται διαδοχικά. Ένα δένδρο είναι μια τριάδα  $(\mathcal{V}, v_{root}, \pi)$ ,



Σχήμα B.1: Εκτενής περιγραφή του “Διλήμματος του Διαβιβαστή”

όπου  $\mathcal{V}$  είναι το σύνολο των κόμβων (κορυφών),  $v_{root}$  η ρίζα του δέντρου και  $\pi$  η συνάρτηση προκατόχου (predecessor), δηλαδή, η συνάρτηση για την οποία ισχύει  $\forall v \in \mathcal{V}, \exists n \geq 1, \pi^{(n)} = \pi \circ \dots \circ \pi = v_{root}$ .

Η εκτενής περιγραφή δείχνει ότι το παίγνιο μπορεί να παρουσιαστεί με τη μορφή δένδρου, σε κάθε κόμβο του οποίου οι παίκτες αποφασίζουν ποια θα είναι η δράση τους, καθορίζοντας ανάλογα τους κόμβους που έπονται στο δένδρο.

Το Σχ. B.1 παρουσιάζει με εκτενή περιγραφή το παίγνιο του “Διλήμματος του Διαβιβαστή”.

### B.2.1.3 Σύγκριση μεταξύ κανονικής/στρατηγικής και εκτενούς περιγραφής

Ακολούθως, παρατίθενται ορισμένες χρήσιμες παρατηρήσεις που βοηθούν στη σύγκριση μεταξύ κανονικής/στρατηγικής και εκτενούς περιγραφής παιγνίων.

- Η κανονική/στρατηγική περιγραφή είναι περισσότερο εύχρηστη από την εκτενή για μαθηματική ανάλυση και συνεχή σύνολα δράσεων/στρατηγικών
- Η εκτενής περιγραφή είναι πληρέστερη από την κανονική/στρατηγική περιγραφή
- Η εκτενής περιγραφή είναι χρήσιμη για αναλύσεις της επιστήμης των υπολογιστών

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μετατροπή από εκτενή σε κανονική περιγραφή είναι εφικτή. Συγκεκριμένα, υπάρχει μοναδική κανονική/στρατηγική μορφή για την περιγραφή ενός εκτενούς μορφής παιγνίου. Το αντίστροφο, ωστόσο, δεν ισχύει. Η κανονική/στρατηγική περιγραφή μπορεί να αντιστοιχεί σε πολλές εκτενείς περιγραφές.

### B.2.1.4 Η περιγραφή συνασπισμού

Η περιγραφή συνασπισμού αφορά τη χαρακτηριστική περιγραφή συνασπισμού που εισήγαγαν οι von Neuman και Morgenstern (1944) για *συνασπιστικά* παίγνια (coalitional games)

με μεταβιβάσιμη χρησιμότητα (Transferable Utility, TU). Η χαρακτηριστική περιγραφή συνασπισμού ορίζεται ως ένα ζεύγος  $(\mathcal{N}, f)$ , όπου  $\mathcal{N}$  είναι το σύνολο των παικτών και  $f$  η χαρακτηριστική συνάρτηση  $f : 2^{\mathcal{N}} \rightarrow \mathbb{R}$ . Ο συμβολισμός  $2^{\mathcal{N}}$  υποδηλώνει ότι η συνάρτηση  $f$  αποδίδει μία τιμή σε ένα συγκεκριμένο υποσύνολο παικτών (ή συνασπισμό). Συγκεκριμένα, ένας συνασπισμός μπορεί να περιγραφεί ως ένα διάνυσμα  $\mathcal{N}$ -διαστάσεων του οποίου οι συνιστώσες λαμβάνουν τιμές 0 ή 1. Σε αντίθεση με την κανονική/στρατηγική και την εκτενή περιγραφή, οι οποίες δίνουν έμφαση στους κανόνες που ορίζουν το παίγνιο, η περιγραφή συνασπισμού επικεντρώνεται στο ποιο συνολικό όφελος αποκομίζει ένας συνασπισμός κόμβων και όχι στον τρόπο που αυτό επιτυγχάνεται.

## B.2.2 Κατηγοριοποίηση παιγνίων

Ακολούθως, παρατίθεται κατάλογος που περιλαμβάνει τις κατηγορίες των παιγνίων.

- Στατικά και δυναμικά παίγνια
- Στοχαστικά και μη στοχαστικά παίγνια
- Συνεργατικά και μη συνεργατικά παίγνια
- Παίγνια με πλήρη ή μερική πληροφόρηση
- Παίγνια με τέλεια ή ατελή ιστορικότητα
- Παίγνια μηδενικού ή μη μηδενικού αθροίσματος

### B.2.2.1 Στατικά και δυναμικά παίγνια

Τα δυναμικά παίγνια θεωρούν ότι οι παίκτες χρησιμοποιούν πληροφορία από προηγούμενες κινήσεις, παρατηρήσεις και επιλεγμένες στρατηγικές προκειμένου να διαμορφώσουν τις τρέχουσες ή μελλοντικές κινήσεις. Στα στατικά παίγνια, οι παίκτες διαθέτουν συγκεκριμένη γνώση η οποία δεν αλλάζει. Τα στατικά παίγνια θεωρούνται υποκατηγορία των δυναμικών παιγνίων.

### B.2.2.2 Στοχαστικά και μη στοχαστικά παίγνια

Τα στοχαστικά παίγνια χαρακτηρίζονται από την εξέλιξη, συνήθως χρονική, ενός μεγέθους που ακολουθεί μια κατανομή πυκνότητας πιθανότητας. Σε αντίθεση με τα στοχαστικά παίγνια, τα μη στοχαστικά παίγνια δεν εξελίσσονται με το χρόνο. Μια κατηγορία μη στοχαστικών παιγνίων είναι τα επαναλαμβανόμενα παίγνια (repeated games), που αποτελούν ειδική κατηγορία δυναμικών παιγνίων όπου ένα στατικό παίγνιο επαναλαμβάνεται. Τα μη στοχαστικά παίγνια αποτελούν υποκατηγορία των στοχαστικών παιγνίων.



### **B.2.2.3 Συνεργατικά και μη συνεργατικά παίγνια**

Στα μη συνεργατικά παίγνια οι στόχοι και οι στρατηγικές των παικτών είναι διακριτές. Στα συνεργατικά παίγνια αυτό δεν είναι πάντα εφικτό καθώς οι στόχοι και τα οφέλη από τις ακολουθούμενες στρατηγικές αφορούν ένα συνασπισμό παικτών. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο τύπων δικτύων είναι αν οι κοινοί στόχοι και οι δεσμεύσεις είναι επιβεβλημένες ή όχι. Στα συνεργατικά παίγνια οι δεσμεύσεις είναι επιβεβλημένες ενώ στα μη συνεργατικά παίγνια οι παίκτες δρουν αυτόνομα.

### **B.2.2.4 Παίγνια με πλήρη ή μερική πληροφόρηση**

Στα παίγνια με πλήρη πληροφόρηση τα δεδομένα του παιγνίου θεωρούνται γνωστά σε όλους τους παίκτες. Στην κανονική/στρατηγική περιγραφή, αυτό συνεπάγεται ότι οι αποφάσεις των παικτών καθώς και τα οφέλη από τα εκάστοτε στρατηγικά προφίλ είναι γνωστά στους παίκτες εκ των προτέρων. Επίσης, κάθε παίκτης γνωρίζει ότι όλοι οι παίκτες γνωρίζουν εξίσου τα δεδομένα του παιγνίου. Στα παίγνια με μερική πληροφόρηση, γνωστά και ως Bayesian παίγνια, θεωρείται ότι οι παίκτες δεν γνωρίζουν όλα τα δεδομένα του παιγνίου εκ των προτέρων. Αν και τα Bayesian παίγνια φαίνονται περισσότερο ρεαλιστικά, και οι δύο κατηγορίες δικτύων είναι σημαντικές στην πράξη.

### **B.2.2.5 Παίγνια με τέλεια ή ατελή ιστορικότητα**

Όταν οι παίκτες έχουν πλήρη γνώση της ιστορίας του παιγνίου τότε τα παίγνια θεωρούνται ότι διαθέτουν τέλεια ιστορικότητα. Το αντίθετο ισχύει για τα παίγνια με ατελή ιστορικότητα. Η ιστορικότητα ενός παιγνίου μπορεί εύκολα να απεικονιστεί με την εκτενή περιγραφή.

### **B.2.2.6 Παίγνια μηδενικού ή μη μηδενικού αθροίσματος**

Τα παίγνια μηδενικού αθροίσματος ονομάζονται τα παίγνια των οποίων το άθροισμα των οφελών είναι μηδέν (ή σταθερό). Αυτό συνεπάγεται ότι αν κάποιος παίκτης ωφεληθεί, κάποιος άλλος παίκτης θα ζημιωθεί. Αυτό δεν ισχύει στα παίγνια μη μηδενικού αθροίσματος.

## **B.3 Βασικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων**

Χρήσιμος ορισμός για την παρουσίαση των βασικών εννοιών της θεωρίας παιγνίων αποτελεί αυτός του *λογικού παίκτη* (rational player).

**Ορισμός B.1.** *Λογικός παίκτης ονομάζεται αυτός που μεγιστοποιεί το όφελος του (ή την αναμενόμενη χρησιμότητά του) λαμβάνοντας υπόψη όλη τη γνώση που έχει για τη διαδραστική κατάσταση στην οποία συμμετέχει.*

Ο ανωτέρω ορισμός δόθηκε από τους von Neumann και Morgenstern το 1944.

Επίσης, παρατίθεται και ο ορισμός της *κοινωνικής χρησιμότητας* (social welfare).

**Ορισμός B.2.** Το κοινωνικό όφελος ενός παιγνίου ορίζεται ως το αλγεβρικό άθροισμα των οφελών(ζημιών) όλων των παικτών, δηλαδή

$$w = \sum_{i=1}^{|\mathcal{N}|} u_i \quad (\text{B.1})$$

Τέλος, παρατίθενται οι ορισμοί του πεπερασμένου και συμμετρικού παιγνίου.

**Ορισμός B.3.** Ένα παίγνιο ονομάζεται πεπερασμένο αν το πλήθος των διαθέσιμων στρατηγικών και των αντίστοιχων χρησιμοτήτων είναι πεπερασμένο.

**Ορισμός B.4.** Συμμετρικό ονομάζεται το παίγνιο στο οποίο οι παίκτες έχουν το ίδιο σύνολο στρατηγικών και τα οφέλη τους για την επιλογή της ίδιας στρατηγικής και για το ίδιο στρατηγικό προφίλ των υπόλοιπων παικτών είναι τα ίδια [162]. Δηλαδή,

$$\forall i, j \in \mathcal{N}, \forall s_i \in \mathcal{S}_i, \forall s_j \in \mathcal{S}_j, \forall s_{-i} \in \mathcal{S}_{-i}, \forall s_{-j} \in \mathcal{S}_{-j}, \text{ where } \mathcal{S}_i = \mathcal{S}_j \\ \text{if } s_i = s_j \text{ and } s_{-i} = s_{-j}, u_i(s_i, s_{-i}) = u_j(s_j, s_{-j}) \quad (\text{B.2})$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι η περιγραφή των συμμετρικών παιγνίων δύο παικτών σε πίνακα μπορεί να γίνει με την αναφορά των οφελών μόνο του ενός από τους δύο, καθώς τα οφέλη είναι κοινά.

Ακολούθως, ορίζονται ορισμένες βασικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων.

### B.3.1 Δράσεις και στρατηγικές

**Ορισμός B.5.** Έστω  $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$  το σύνολο των παικτών ενός παιγνίου. Έστω, επίσης,  $\{\mathcal{A}_i\}_{i \in \mathcal{N}}$  το σύνολο των δράσεων των παικτών. Το διάνυσμα των δράσεων  $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_N) \in \mathbf{A}$ , όπου  $\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \times \mathbf{A}_2 \times \dots \times \dots \times \mathbf{A}_N$ , ονομάζεται προφίλ δράσεων (action profile).

Στο σημείο αυτό αξίζει να διακριθεί η έννοια της δράσης από αυτή της στρατηγικής. Δράση είναι μία από τις διαθέσιμες κινήσεις που έχει ο παίκτης ενώ στρατηγική είναι η κατάλληλη οργάνωση αυτών των κινήσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, η *μικτή* στρατηγική αποδίδει πιθανότητες στις διαθέσιμες δράσεις κάθε παίκτη ενώ η *αμιγής* στρατηγική (pure strategy) ή δράση αποδίδει πιθανότητα ίση με τη μονάδα σε μία από τις διαθέσιμες κινήσεις ενός παίκτη.

### B.3.2 Βασικοί ορισμοί βέλτιστων στρατηγικών

Στην ενότητα αυτή δίδονται βασικοί ορισμοί βέλτιστων στρατηγικών.

**Ορισμός B.6.** Έστω  $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{N}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{N}})$  η στρατηγική μορφή ενός παιγνίου. Η στρατηγική  $\hat{s}_i$  ονομάζεται κυρίαρχη (dominant) για τον παίκτη  $i$  αν ισχύει:

$$\forall \mathbf{s}_{-i} \in \mathcal{S}_{-i}, \forall s_i \in \mathcal{S}_i, u_i(\hat{s}_i, \mathbf{s}_{-i}) \geq u_i(s_i, \mathbf{s}_{-i}) \quad (\text{B.3})$$

Ο ορισμός της αυστηρώς κυρίαρχης στρατηγικής προκύπτει από την αντικατάσταση στην (B.3) του συμβόλου  $\geq$  σε  $>$ . Μια στρατηγική ονομάζεται κυριαρχημένη (ch:6:eq:dominated) όταν δεν ισχύει η (B.3).

Σύμφωνα με τον ορισμό B.1, ένας λογικός παίκτης δεν θα ακολουθήσει μία κυριαρχημένη στρατηγική, αλλά θα ακολουθεί πάντα τις κυρίαρχες στρατηγικές του, εφόσον υπάρχουν. Ένα παίγνιο ονομάζεται επιλύσιμο ως προς την κυριαρχία (dominance solvable), αν ο προσδιορισμός των κυρίαρχων και κυριαρχημένων στρατηγικών είναι εφικτός. Σε αυτή την περίπτωση, αυτό είναι αρκετό για την πρόβλεψη της έκβασης του παιγνίου.

Ανατρέχοντας στο “Δίλημμα του φυλακισμένου” (Πίνακας B.2), η ανάλυση για την εύρεση της κυρίαρχης στρατηγικής είναι η εξής. Για τον παίκτη 1, η δεύτερη σειρά οφελών (4,1) είναι καλύτερη από την πρώτη σειρά (3,0). Αυτό σημαίνει ότι, ανεξαρτήτως της δράσης που επιλέγει ο παίκτης 2, είναι προτιμότερο ο παίκτης 1 να επιλέξει τη δράση “Σιωπά”. Επομένως, η δράση “Σιωπά” είναι μία αυστηρώς κυρίαρχη (αμιγής) στρατηγική. Λόγω συμμετρίας, ο παίκτης 2 έχει επίσης αυτή τη στρατηγική. Επομένως, το παίγνιο είναι επιλύσιμο ως προς την κυριαρχία: απαλείφοντας τις αυστηρώς κυριαρχημένες στρατηγικές για κάθε παίκτη, το μόνο στρατηγικό προφίλ που παραμένει είναι το (Σ,Σ) το οποίο είναι και η κυρίαρχη στρατηγική.

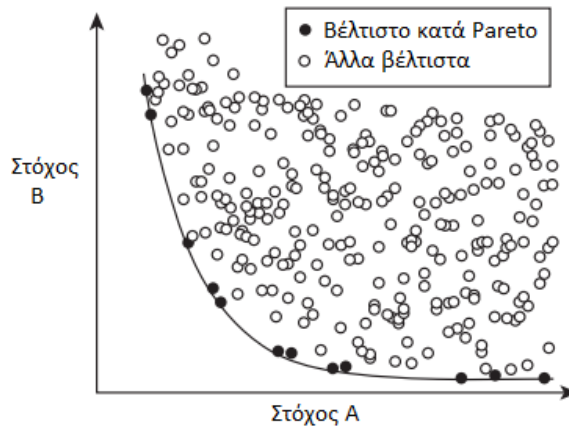
**Ορισμός B.7.** Ασθενές κατά Pareto κυρίαρχο στρατηγικό προφίλ (Weak Pareto-dominant profile) ονομάζεται το στρατηγικό προφίλ  $s_i$  για το οποίο ισχύει

$$\forall \mathbf{s}' \in \mathcal{S}, \forall i \in \mathcal{N}, u_i(\mathbf{s}) \geq u_i(\mathbf{s}') \quad (\text{B.4})$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται χρήση του αυστηρώς κατά Pareto κυρίαρχου στρατηγικού προφίλ, το οποίο ορίζεται επίσης από την (B.7) αντικαθιστώντας το σύμβολο  $\geq$  με το  $>$ .

**Ορισμός B.8.** Ένα στρατηγικό προφίλ  $s$  είναι βέλτιστο κατά Pareto όταν δεν κυριαρχείται από κανένα άλλο στρατηγικό προφίλ.

Για ένα παίγνιο δύο παικτών, το κατά Pareto βέλτιστο μπορεί να περιγραφεί σχηματικά σχεδιάζοντας την περιοχή των εφικτών οφελών ενός παιγνίου (βλ. Σχ. B.2). Το σύνολο των σημείων που αντιστοιχούν στα κατά Pareto βέλτιστα ονομάζεται όριο ή σύνορο Pareto (Pareto frontier). Από το σύνολο αυτό προκύπτουν και τα NE. Το Σχ. B.2 παρουσιάζει με μαύρο σημείο τα κατά Pareto βέλτιστα και με λευκό σημείο άλλα (όχι Pareto) βέλτιστα.



Σχήμα Β.2: Περιγραφή των κατά Pareto βέλτιστων στρατηγικών προφίλ

Ανατρέχοντας και πάλι στο “Δίλημμα του φυλακισμένου”, από τα τέσσερα διαθέσιμα στρατηγικά προφίλ μόνο το (M, M) δεν είναι βέλτιστο κατά Pareto. Πράγματι, το όφελος και των δύο παικτών αυξάνεται ( $1 \rightarrow 4$ ) αν αλλάξουν τη στρατηγική τους από “Μαρτυρώ” σε “Σιωπώ”. Αντίθετα, για τα υπόλοιπα τρία στρατηγικά προφίλ, δεν υπάρχει άλλο στρατηγικό προφίλ το οποίο να επιφέρει μεγαλύτερο όφελος και για τους δύο παίκτες.

**Ορισμός Β.9.** Το κοινωνικό βέλτιστο ορίζεται ως το μέγιστο του κοινωνικού οφέλους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το στρατηγικό προφίλ που αντιστοιχεί σε κάθε κοινωνικό βέλτιστο αποτελεί βέλτιστο κατά Pareto στρατηγικό προφίλ. Το αντίστροφο, ωστόσο, δεν ισχύει πάντα. Το κοινωνικό βέλτιστο χρησιμοποιείται για το ορισμό της τιμής της αναρχίας (price of anarchy).

**Ορισμός Β.10.** Η βέλτιστη απόκριση (best response) του παίκτη  $i$  στις στρατηγικές των άλλων παικτών  $s_{-i}$  δίνεται από τη σχέση

$$BR_i(s_{-i}) = \arg \max_{s_i \in \mathcal{S}_i} u_i(s_i, s_{-i}) \quad (\text{B.5})$$

Σύμφωνα με τον ορισμό Β.10, ένας λογικός παίκτης ακολουθεί μία στρατηγική από το σύνολο  $BR_i(s_{-i})$  των στρατηγικών που αποτελούν βέλτιστη απόκριση στο προφίλ  $s_{-i}$  των στρατηγικών των υπόλοιπων παικτών. Η βέλτιστη απόκριση ως όρος χρησιμοποιείται για τον ορισμό του σημείου ισορροπίας Nash (Nash Equilibrium, NE) [163].

### Β.3.3 Σημεία ισορροπίας

Υπάρχουν πολλών ειδών σημεία ισορροπίας στη βιβλιογραφία. Ανάλογα με τα δεδομένα κάθε παιγνίου και τη δυνατότητα προσέγγισης της έκβασής του, ορίζεται και το κατάλληλο σημείο ισορροπίας. Σε αυτή την ενότητα, αναφέρονται ορισμένα σημεία ισορροπίας.

Το σημείο ισορροπίας Nash -εφεξής θα χρησιμοποιείται ο όρος NE- διαμορφώθηκε από τον Nash το 1950. Για το μαθηματικό ορισμό ενός NE ή ενός σημείου Nash, αρκεί ο ορισμός  $N$  το πλήθος  $N$ -μεταβλητών συναρτήσεων.

**Ορισμός B.11.** Έστω  $\mathcal{S} = \mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2 \times \dots \times \mathcal{S}_N$ . Έστω, επίσης,  $u_i : \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}, i \in \mathcal{N}$ . Το διάνυσμα  $s^*$  είναι NE αν ισχύει:

$$\forall i \in \mathcal{N}, \forall s_i \in \mathcal{S}_i, u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*) \quad (\text{B.6})$$

Ένας εναλλακτικός ορισμός για το NE είναι αυτός χρησιμοποιεί τον όρο “βέλτιστη απόκριση”.

**Ορισμός B.12.** Έστω  $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{N}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{N}})$  η στρατηγική μορφή ενός παιχνιδιού. Ένα στρατηγικό προφίλ  $s^*$  είναι NE αν ισχύει:

$$s^* \in BR(s^*) \quad (\text{B.7})$$

όπου

$$BR : \begin{cases} \mathcal{S} \rightarrow & \mathcal{S} \\ s \mapsto & (BR_1(s_{-1}) \times BR_2(s_{-2}) \times \dots \times BR_N(s_{-N})) \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

Η (B.8) περιγράφει ότι το NE είναι ένα στρατηγικό προφίλ όπου οι στρατηγικές των επιμέρους παικτών ανήκουν στο σύνολο των βέλτιστων αποκρίσεων προς τις στρατηγικές των υπόλοιπων παικτών. Σε αυτό το πλαίσιο, σε ένα NE κανένας παίκτης δεν έχει όφελος να αλλάξει την στρατηγική του. Όταν το NE αποτελείται από αμιγείς στρατηγικές ονομάζεται *αμιγές NE*. Κατ’ αντιστοιχία, όταν το NE αποτελείται από μικτές στρατηγικές ονομάζεται *μικτό NE*.

Ανατρέχοντας στο “δίλημμα του φυλακισμένου” (Πίνακας B.2) και εξετάζοντας τις βέλτιστες αποκρίσεις και τα NE του παιχνιδιού ισχύουν τα εξής: Αν ο παίκτης 1 επιλέξει τη δράση “Μαρτυρώ” (M), η βέλτιστη απόκριση του άλλου παίκτη, δηλαδή του παίκτη 2, είναι να επιλέξει τη δράση “Σιωπά” (Σ). Αν ο παίκτης 1 επιλέξει τη δράση “Σιωπά” (Σ) η βέλτιστη απάντηση του παίκτη 2 είναι να επιλέξει “Μαρτυρώ” (M). Επομένως, η βέλτιστη απάντηση του “Διλήματος του Φυλακισμένου” για όλα τα πιθανά στρατηγικά προφίλ είναι το στρατηγικό προφίλ (Σ,Σ). Κατ’ αντιστοιχία, το στρατηγικό προφίλ (Σ,Σ) αποτελεί και το μοναδικό NE του παιχνιδιού.

**Ορισμός B.13.** Αν κάθε παίκτης διαθέτει κυρίαρχη στρατηγική και την επιλέξει, τότε ο συνδυασμός των κυρίαρχων στρατηγικών και των αντίστοιχων οφελών συνιστούν το σημείο ισορροπίας κυρίαρχης στρατηγικής για αυτό το παίγνιο.

Τέλος, παρουσιάζεται το Bayesian σημείο ισορροπίας.

**Ορισμός B.14.** Το Bayesian σημείο ισορροπίας είναι ένα NE για παίγνια στα οποία οι παίκτες δεν έχουν ακριβείς πληροφορίες για τις παραμέτρους του παιχνιδιού.

		Παίκτης 2	
		Σ1	Σ2
Παίκτης 1	Σ1	(a, a)	(b, c)
	Σ2	(c, b)	(d, d)

Πίνακας B.4: Τα οφέλη ενός συμμετρικού παιγνίου με δύο παίκτες.

## B.4 Βασικά θεωρήματα ύπαρξης NE

Ακολουθώς παρουσιάζονται βασικά θεωρήματα που τεκμηριώνουν την ύπαρξη NE.

**Θεώρημα B.1.** Κάθε πεπερασμένο παίγνιο έχει ένα αμιγούς στρατηγικής NE ή ένα μικτής στρατηγικής NE [163].

**Θεώρημα B.2.** Κάθε πεπερασμένο συμμετρικό παίγνιο έχει ένα συμμετρικό, μικτής στρατηγικής NE [163].

**Θεώρημα B.3.** Κάθε συμμετρικό παίγνιο με δύο στρατηγικές έχει ένα συμμετρικό, αμιγούς στρατηγικής NE [162].

Τα θεωρήματα που προηγήθηκαν χρησιμοποιούνται στις εργασίες που θα παρουσιαστούν στο δεύτερο μέρος της διατριβής.

### B.4.1 Προσδιορισμός μικτής στρατηγικής NE σε συμμετρικό παίγνιο δύο στρατηγικών

Έστω ένα συμμετρικό παίγνιο δύο παικτών με οφέλη

$$\mathbf{u}_1 = \begin{pmatrix} \alpha & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad \mathbf{u}_2 = \begin{pmatrix} \alpha & c \\ b & d \end{pmatrix} \quad (\text{B.9})$$

όπως φαίνεται και από τον Πίνακα B.4, όπου  $a, b, c, d \geq 0$ . Για να προσδιοριστεί υπό ποιες συνθήκες το παίγνιο αυτό έχει μικτής στρατηγικής NE χρησιμοποιείται η εξίσωση των οφελών [164]. Αν  $p$  είναι η πιθανότητα ένας παίκτης να επιλέξει τη στρατηγική Σ1 (κατ' επέκταση  $1 - p$  η πιθανότητα να επιλεγεί η στρατηγική Σ2), ισχύει [164]

$$\begin{pmatrix} \alpha & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ 1 - p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b + p \cdot (a - b) \\ d + p \cdot (c - d) \end{pmatrix} \quad (\text{B.10})$$

Εξισώνοντας τα οφέλη προκύπτει

$$b + p \cdot (a - b) = d + p \cdot (c - d)$$

ή

$$p = \frac{(d - b)}{(a - c) + (d - b)} \quad (\text{B.11})$$

Η πιθανότητα αυτή είναι αποδέκτης εφόσον  $0 < p < 1$  δηλαδή εφόσον  $a > c, b < d$  ή εφόσον  $a < c, b > d$ .

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία θα χρησιμοποιηθεί σε επόμενα κεφάλαια για τον προσδιορισμό των μικτής στρατηγικής NE στα υπό μελέτη θέματα αυτο-οργανούμενων DTN δικτύων. Τα παίγνια που θα μελετηθούν είναι συμμετρικά, μη συνεργατικά παίγνια με δύο στρατηγικές. Επίσης, σε αυτά θεωρείται ότι οι παίκτες είναι λογικοί.





## Παράρτημα Γ

# Υπολογισμός των αμιγών και μικτών ΝΕ στρατηγικών του παιγνίου κινητικότητας σε DTN δίκτυα

### Γ.1 Παίγνιο DTN κινητικότητας δύο κόμβων/παικτών

#### Γ.1.1 Υπολογισμός αμιγούς ΝΕ στρατηγικής

Παρατηρώντας τον Πίνακα 6.1 που απεικονίζει τα οφέλη του παιγνίου δύο κόμβων/παικτών, εύκολα συνάγεται ότι, όταν

$$x \leq 1 - p^{(hit)}/p^{(meet)} \quad (\Gamma.1)$$

το συμμετρικό DTN παίγνιο δύο κόμβων/παικτών, δύο στρατηγικών έχει μια συμμετρική ΝΕ στρατηγική (symmetric pure strategy NE), συγκεκριμένα το στρατηγικό προφίλ (*κινούμαι, κινούμαι*). Από την άλλη πλευρά, αν

$$x > 1 - p^{(hit)}/p^{(meet)} \quad (\Gamma.2)$$

το DTN παίγνιο δύο παικτών έχει δύο μη συμμετρικές αμιγείς ΝΕ στρατηγικές, τα στρατηγικά προφίλ (*κινούμαι, μένω ακίνητος*) και (*μένω ακίνητος, κινούμαι*).

#### Γ.1.2 Υπολογισμός μικτής ΝΕ στρατηγικής

Αντιστοιχώντας την πιθανότητα  $p_s$  στην αμιγή στρατηγική “μένω ακίνητος”, το όφελος του κόμβου/παίκτη  $n_1$  όταν αποφασίσει να κινηθεί είναι ίσο με

$$u(n_1) = (1 - x) \cdot p_s \cdot p^{(hit)} + (1 - x) \cdot (1 - p_s) \cdot p^{(meet)} \quad (\Gamma.3)$$

Από την άλλη πλευρά, όταν ο παίκτης  $n_1$  αποφασίσει να μείνει ακίνητος, το όφελός του είναι ίσο με

$$u(n_1) = 0 \cdot p_s + 1 \cdot (1 - p_s) \cdot p^{(hit)} \quad (\Gamma.4)$$

Εξισώνοντας τα ανωτέρω οφέλη, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για την πιθανότητα  $p_s$

$$(1-x) \cdot p_s \cdot p^{(hit)} + (1-x) \cdot (1-p_s) \cdot p^{(meet)} = p_s \cdot 0 + (1-p_s) \cdot p^{(hit)} \quad (\Gamma.5)$$

που οδηγεί στη σχέση

$$p_s = \frac{p^{(meet)}}{p^{(meet)} - p^{(hit)}} \cdot \frac{x - [1 - p^{(hit)}/p^{(meet)}]}{x - [1 - p^{(hit)}/(p^{(meet)} - p^{(hit)})]} \quad (\Gamma.6)$$

Μικτή NE στρατηγική υπάρχει εφόσον

$$0 \leq p_s \leq 1 \quad (\Gamma.7)$$

Το αριστερό σκέλος της (Γ.7) γράφεται ισοδύναμα υπό τη μορφή

$$\frac{p^{(meet)}}{p^{(meet)} - p^{(hit)}} \cdot [x - (1 - \frac{p^{(hit)}}{p^{(meet)}})] \cdot [x - (1 - \frac{p^{(hit)}}{p^{(meet)} - p^{(hit)}})] \geq 0 \quad (\Gamma.8)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $p^{(meet)} > p^{(hit)}$  και ότι, για τυπικές τιμές των  $p^{(meet)}$  και  $p^{(hit)}$  που απαντώνται στη βιβλιογραφία, ισχύει ότι  $0.5 \leq p^{(hit)}/p^{(meet)} < 1$ , η σχέση (Γ.8) είναι ισοδύναμη ή με τη σχέση

$$x > 1 - p^{(hit)}/p^{(meet)} \quad (\Gamma.9)$$

ή με τη σχέση

$$x < 1 - p^{(hit)}/(p^{(meet)} - p^{(hit)}) \quad (\Gamma.10)$$

Αντικαθιστώντας την (Γ.9) στην (Γ.7), το δεξιό σκέλος της (Γ.7) είναι ισοδύναμο με  $x \leq 1$  που είναι πάντα αληθές.

Αντικαθιστώντας την (Γ.10) στην (Γ.7), το δεξιό σκέλος της (Γ.7) είναι ισοδύναμο με  $x > 1$  που δεν είναι ποτέ αληθές.

Επομένως, υπάρχει μικτή NE στρατηγική υπάρχει όταν  $x > 1 - p^{(hit)}/p^{(meet)}$ .

## Γ.2 Παίγνιο DTN κινητικότητας $N$ κόμβων/παικτών

### Γ.2.1 Συγχρονισμένα DTN δίκτυα

Υπάρχει μικτή NE στρατηγική για το παίγνιο DTN κινητικότητας  $N$  κόμβων/παικτών υπό πλήρη συγχρονισμό εφόσον η λύση της (6.14)  $p_s$  ικανοποιεί τη σχέση  $0 \leq p_s \leq 1$ , δηλαδή εφόσον ισχύει

$$0 \leq \frac{\hat{P}_N^{(hit)} - (1-x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)})}{\hat{P}_N^{(hit)} - (1-x) \cdot (P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)} - p_N^{(hit)})} \leq 1 \quad (\Gamma.11)$$

Θέτοντας  $B = P_N^{(meet)} + P_N^{(hit)}$ ,  $A = \hat{P}_N^{(hit)}$  και  $a = p_N^{(hit)}$  η (Γ.11) γράφεται υπό τη μορφή

$$0 \leq \frac{B}{B-a} \cdot \frac{x - (1 - A/B)}{x - [1 - A/(B-a)]} \leq 1 \quad (\Gamma.12)$$

Το αριστερό σκέλος της (Γ.12) γράφεται ισοδύναμα υπό τη μορφή

$$\frac{B}{B-a} \cdot [x - (1 - A/B)] \cdot [x - (1 - A/(B-a))] \geq 0 \quad (\Gamma.13)$$

Όπως μπορεί εύκολα να αποδειχθεί,  $B > a$ , οπότε η (Γ.13) καθίσταται ισοδύναμη ή με τη σχέση

$$x > 1 - A/B \quad (\Gamma.14)$$

ή με τη σχέση

$$x < 1 - A/(B-a) \quad (\Gamma.15)$$

(i) Εφόσον ισχύει η (Γ.14), το δεξιό σκέλος της (Γ.12) έρχεται στη μορφή

$$x - (1 - \frac{A}{B}) < [x - (1 - \frac{A}{B-a})] \cdot \frac{B-a}{B} \quad (\Gamma.16)$$

που είναι ισοδύναμη με  $x \leq 1$ , και είναι πάντα αληθής.

(ii) Εφόσον ισχύει η (Γ.15) ισχύει, το δεξιό σκέλος της (Γ.12) έρχεται στη μορφή

$$x - (1 - \frac{A}{B}) \geq [x - (1 - \frac{A}{B-a})] \cdot \frac{B-a}{B} \rightarrow x > 1 \quad (\Gamma.17)$$

που είναι ισοδύναμη με  $x > 1$ , και δεν είναι ποτέ αληθής.

Συνεπώς, υπάρχει μικτή NE στρατηγική εφόσον  $x > 1 - A/B$ , η οποία είναι η (6.15) του Κεφ. 6.

## Γ.2.2 Μη συγχρονισμένα DTN δίκτυα

Ακολουθώντας το σκεπτικό του Παραρτήματος Γ.2.1, όταν ένα DTN δίκτυο δεν είναι πλήρως συγχρονισμένο, υπάρχει μικτή NE στρατηγική για το παίγνιο DTN κινητικότητας  $N$  κόμβων/παικτών εφόσον η λύση της αντίστοιχης εξίσωσης οφελών  $p'_s$  ικανοποιεί τη σχέση  $0 \leq p'_s \leq 1$ , δηλαδή εφόσον ισχύει

$$0 \leq \frac{B'}{B'-a} \cdot \frac{x - (1 - A'/B')}{x - [1 - A'/(B'-a)]} \leq 1 \quad (\Gamma.18)$$

όπου

$$B' = B + Q_N^{(hit)} \quad (\Gamma.19)$$

και

$$A' = \tilde{Q}_N^{(hit)} \quad (\Gamma.20)$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι  $B' > A'$ . Επίσης, ισχύει ότι  $B' > B > a$ . Τότε, το αριστερό σκέλος της (Γ.18) γράφεται υπό τη μορφή

$$\frac{B'}{B' - a} \cdot [x - (1 - A'/B')] \cdot [x - (1 - A'/(B' - a))] \geq 0 \quad (\Gamma.21)$$

η οποία ισοδυναμεί ή με τη σχέση

$$x > 1 - A'/B' \quad (\Gamma.22)$$

ή με τη σχέση

$$x < 1 - A'/(B' - a) \quad (\Gamma.23)$$

Όπως αποδείχθηκε στο Παράρτημα Γ.2.1 για συγχρονισμένα DTN δίκτυα, υπάρχει μικτή ΝΕ στρατηγική για το παίγνιο DTN κινητικότητας  $N$  κόμβων/παικτών απουσία πλήρους συγχρονισμού εφόσον

$$x > 1 - A'/B'$$

που είναι η (6.25) του Κεφ. 6.

## Παράρτημα Δ

# Υπολογισμός των αμιγών και μικτών ΝΕ στρατηγικών του παιγνίου ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα

### Δ.1 Αμιγής ΝΕ στρατηγική

Προκειμένου να προσδιοριστούν τα αμιγή ΝΕ του παιγνίου ενεργητικής ανίχνευσης σε DTN δίκτυα που περιγράφεται από τον Πίνακα 7.1, πρέπει να συγκριθούν τα οφέλη κάθε στήλης. Δεδομένου ότι το παίγνιο ενεργητικής ανίχνευσης δύο κόμβων/παικτών και δύο στρατηγικών είναι συμμετρικό αρκεί να συγκριθούν τα  $u_1(\mathbf{s}_1) - u_1(\mathbf{s}_2)$  με τα  $u_1(\mathbf{s}_3) - u_1(\mathbf{s}_4)$ . Η σύγκριση αυτή αποσκοπεί στο να καταδείξει ότι ανεξάρτητα από την αμιγή στρατηγική που ακολουθείται από τον κόμβο  $n_2$ , ο κόμβος  $n_1$  επωφελείται αν επιλέξει την αμιγή στρατηγική που του αποφέρει το μεγαλύτερο όφελος. Στο πλαίσιο αυτό, προκύπτουν οι ακόλουθες περιπτώσεις προκύπτουν

$$(i) u_1(\mathbf{s}_1) > u_1(\mathbf{s}_2) \text{ και } u_1(\mathbf{s}_3) > u_1(\mathbf{s}_4) \text{ ή } u_1(\mathbf{s}_3) < u_1(\mathbf{s}_4)$$

Δεδομένου ότι  $u_1(\mathbf{s}_1) = 0$  και το  $u_1(\mathbf{s}_2)$  είναι πάντα θετικό, η περίπτωση (i) δεν μπορεί ποτέ να ισχύει.

$$(ii) u_1(\mathbf{s}_1) < u_1(\mathbf{s}_2) \text{ και } u_1(\mathbf{s}_3) < u_1(\mathbf{s}_4)$$

Οι ανωτέρω σχέσεις είναι και οι δύο αληθείς εφόσον

$$x < E_{th}(T) \tag{Δ.1}$$

όπου το  $E_{th}(T)$  δίνεται από την (7.21). Στην περίπτωση αυτή, το DTN παίγνιο ενεργητικής ανίχνευσης έχει ένα συμμετρικό ΝΕ, το (εκπέμω σήμα ανίχνευσης, εκπέμω σήμα ανίχνευσης) στρατηγικό προφίλ.

$$(iii) u_1(\mathbf{s}_1) < u_1(\mathbf{s}_2) \text{ και } u_1(\mathbf{s}_3) > u_1(\mathbf{s}_4):$$

Οι ανωτέρω σχέσεις είναι και οι δυο αληθείς εφόσον

$$x > E_{th}(T) \quad (\Delta.2)$$

Στην περίπτωση αυτή, το DTN παίγνιο ενεργητικής ανίχνευσης έχει δύο ασύμμετρα ΝΕ, τα στρατηγικά προφίλ (δεν εκπέμπω σήμα ανίχνευσης, εκπέμπω σήμα ανίχνευσης) και (εκπέμπω σήμα ανίχνευσης, δεν εκπέμπω σήμα ανίχνευσης).

## Δ.2 Μικτή ΝΕ στρατηγική

Λαμβάνοντας υπόψη την (7.16), υπάρχει μικτή ΝΕ στρατηγική για το DTN παίγνιο ενεργητικής ανίχνευσης εφόσον

$$0 \leq p_{np}(x, T) \leq 1 \quad (\Delta.3)$$

Δεδομένου ότι τα  $A$  και το  $B$  είναι πάντα θετικά, το αριστερό σκέλος της (Δ.3) είναι αληθές εφόσον

$$(x - B/A) \cdot (x - C/B) \geq 0 \quad (\Delta.4)$$

Συνεπώς, η  $p_{np}(x, T) \geq 0$  είναι αληθής εφόσον ισχύει η σχέση

$$x > \max \{B/A, C/B\} \quad (\Delta.5)$$

ή η σχέση

$$x < \min \{B/A, C/B\} \quad (\Delta.6)$$

Αλλά

$$\frac{B}{A} - \frac{C}{B} = \frac{(1 - P_m(T))^2}{(P_m(T) - P_{m,p}(T)) \cdot (1 - P_{m,p}(T))} > 0 \quad (\Delta.7)$$

Επομένως,  $B/A > C/B$  και το αριστερό σκέλος της (Δ.3) ισχύει εφόσον ισχύει η σχέση

$$x > B/A \quad (\Delta.8)$$

ή η σχέση

$$x < C/B \quad (\Delta.9)$$

Βάσει της (Δ.8), προκύπτουν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

(i)  $x \leq C/B$

Στην περίπτωση αυτή,  $B \cdot x - C \leq 0$  και

$$p_{np}(x, T) \leq 1 \Leftrightarrow A \cdot x - B \geq B \cdot x - C \Leftrightarrow (1 - P_m(T)) \cdot x \geq 1 - P_m(T)$$

που δεν είναι ποτέ αληθής αφού  $0 \leq x \leq 1$ .

(ii)  $x \geq B/A$

Στην περίπτωση αυτή, ισχύει και η  $x > C/B$  ή ισοδύναμα  $B \cdot x - C \geq 0$ . Επομένως,

$$p_{np}(x, T) \leq 1 \Leftrightarrow A \cdot x - B \leq B \cdot x - C \Leftrightarrow (1 - P_m(T)) \cdot x \leq 1 - P_m(T) \quad (\Delta.10)$$

Η (Δ.10) είναι πάντα αληθής, αφού  $0 \leq x \leq 1$ .

Συνοψίζοντας, υπάρχει μικτή ΝΕ στρατηγική για το DTN παίγνιο ενεργητικής ανίχνευσης εφόσον

$$x \geq B/A \quad (\Delta.11)$$

Επαληθεύονται έτσι οι (7.20) και (7.21) του Κεφ. 7.





## Βιβλιογραφία

- [1] M. J. Khabbaz, C. M. Ass, and W. F. Fawaz, “Disruption-tolerant networking: A comprehensive survey on recent developments and persisting challenges,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 14, no. 2, pp. 607–640, 2012.
- [2] Z. Zhang, “Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges,” *IEEE Communications Survey*, vol. 8, no. 1, pp. 24–37, 2006.
- [3] J. Quintanilla, S. Torquato, and R.-M. Ziff, “Efficient measurement of the percolation threshold for fully penetrable discs,” *Journal of Physics A: Mathematical and General*, vol. 22, no. 4, pp. L399–L407, Oct. 2000.
- [4] K. Fall, “A delay-tolerant network architecture for challenged internets,” in *ACM Conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications (SIGCOMM)*, Aug. 2003, pp. 27–34.
- [5] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L.-S. Peh, and D. Rubenstein, “Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with zebranet,” in *10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-X)*, Dec. 2002, pp. 96–107.
- [6] M. Rutishauser, V. Petkov, J. Boice, K. Obraczka, P. Mantey, T. M. Williams, and C. C. Wilmers, “Carnivore: a disruption-tolerant system for studying wildlife,” *Special Issue on opportunistic and delay tolerant networks, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2011, no. 10, 2011.
- [7] Y. Li and R. Bartos, “A survey of protocols for intermittently connected delay-tolerant wireless sensor networks,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 41, pp. 411–423, May 2014.
- [8] S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss, “RFC:4838 Delay-tolerant networking architecture,” <https://tools.ietf.org/html/rfc4838>, 2007, online-Last accessed-July 2015.

- [9] K. Fall, “DTn: an architectural retrospective,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 5, pp. 828–836, 2008.
- [10] K. Scott, The MITRE Corporation, and S. Burleigh, “RFC:5050 bundle protocol specification,” <https://tools.ietf.org/html/rfc5050>, 2007, online-Last accessed-July 2015.
- [11] Y. Cao and Z. Sun, “Routing in delay/disruption tolerant networks: A taxonomy, survey and challenges,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 14, no. 2, pp. 654–677, 2012.
- [12] Y. Zhu and B. Xu, “A survey of social-based routing in delay tolerant networks: positive and negative social effects,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 14, no. 2, pp. 387–401, 2012.
- [13] C. Fragouli and E. Soljanin, *Network Coding Fundamentals*, ser. 1. Now Publishers, 2007, vol. 2.
- [14] —, *Network Coding Applications*, ser. 2. Now Publishers, 2007, vol. 2.
- [15] C. Prehofer and C. Bettstetter, “Self-organization in communication networks: Principles and design paradigms,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 7, pp. 78–85, 2005.
- [16] C. Sengul, A. Carneiro, and A. Ziviani, “A survey of adaptive services to cope with dynamics in wireless self-organizing networks,” *ACM Computing Surveys*, vol. 44, no. 4, Aug. 2012.
- [17] M. Grossglauser and D. Tse, “Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, no. 4, pp. 477–486, 2002.
- [18] X. Wang, X. Lin, Q. Wang, and W. Luan, “Implementation of a topology control algorithm for mobile ad hoc networks using pursue mobility model,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 2, pp. 440–454, 2012.
- [19] P. Hui, A. Chaintreau, J. Scott, R. Gass, J. Crowcroft, and C. Diot, “Pocket switched networks and human mobility in conference environments,” in *ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, 2005.
- [20] A. Petz, J. Enderle, and C. Julien, “A framework for evaluating dtn mobility models,” in *Proceedings of SCENES*, 2009.
- [21] R. R. Roy, *Handbook of Mobile Ad Hoc Networks for Mobility Models*. Springer, 2011.

- [22] G. Thakur, U. Kumar, A. Helmy, and H. Wei-jen, “On the efficacy of mobility modeling for dtn evaluation: Analysis of encounter statistics and spatio-temporal preferences,” in *7th International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2011.
- [23] C. Bettstetter, “Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects,” in *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2001.
- [24] G. S. Thakur and A. Helmy, “Cobra: A framework for the analysis of realistic mobility models,” in *2013 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, 2013.
- [25] MIT, “Chapter 2: Poisson processes,” [http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-262-discrete-stochastic-processes-spring-2011/course-notes/MIT6\\_262S11\\_chap02.pdf](http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-262-discrete-stochastic-processes-spring-2011/course-notes/MIT6_262S11_chap02.pdf), 2011, online-Last accessed-September 2015.
- [26] M. Becchi, “From poisson processes to self-similarity: a survey of network traffic models,” Citeseer, Tech. Rep., 2008.
- [27] K. Lee, S. Hong, S. Kim, I. Rhee, and S. Chong, “SLAW: Self-similar least-action human walk,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 20, no. 2, pp. 515–529, 2011.
- [28] G. He and J. Hou, “An in-depth, analytical study of sampling techniques for self-similar internet traffic,” in *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, (ICDCS)*, 2005.
- [29] W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, “On the self-similar nature of ethernet traffic,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 1–15, 1994.
- [30] E. Chlebus and G. Divgi, “The pareto or truncated pareto distribution? Measurement-based modeling of session traffic for wi-fi wireless internet access,” in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2007, pp. 3625–3630.
- [31] X. Zhuo, Q. Li, W. Gao, G. Cao, and Y. Dai, “Contact duration aware data replication in delay tolerant networks,” in *19th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, 2011.
- [32] X. Zhuo, Q. Li, G. Cao, Y. Dai, B. Szymanski, and T. La Porta, “Social-based cooperative caching in DTNs: a contact duration aware approach,” in *IEEE 8th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, 2011.

- [33] W. Wang, V. Srinivasan, and M. Motani, “Adaptive contact probing mechanisms for delay tolerant applications,” in *Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)*, 2007.
- [34] Y. Li, D. Jin, Z. Wang, L. Zeng, and S. Chen, “Exponent and power law distribution of contact duration in urban vehicular ad hoc networks,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 110–113, 2012.
- [35] E. Hyttiá, P. Lassila, and J. Virtamo, “Stationary distributions for the random waypoint mobility model,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, no. 1, pp. 99–108, 2004.
- [36] E. Hyttiá, P. Lassila, and J. Virtamo, “Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 6, pp. 680–694, 2006.
- [37] ———, “A markovian waypoint mobility model with application to hotspot modeling,” in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2006.
- [38] H. Cai and D. Y. Eun, “Crossing over the bounded domain: from exponential to power-law intermeeting time in mobile ad hoc networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 17, no. 5, pp. 1578–1591, 2009.
- [39] R. Groenevelt, P. Nain, and G. Koole, “The message delay in mobile ad hoc networks,” *Performance evaluation*, vol. 62, no. 1, 2005.
- [40] A. Krifa, C. Barakat, and T. Spyropoulos, “Optimal buffer management policies for delay tolerant networks,” in *Proceedings of the 5th Annual IEEE Communications Society Conference on sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, 2008.
- [41] W. Gao, Q. Li, B. Zhao, and G. Cao, “Multicasting in delay tolerant networks: a social network perspective,” in *Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, 2009.
- [42] E. Altman, G. Neglia, F. De Pellegrini, and D. Miorandi, “Decentralized stochastic control of delay tolerant networks,” in *Proceedings of INFOCOM*, 2009.
- [43] E. Altman, A. P. Azad, T. Basar, and F. De Pellegrini, “Combined optimal control of activation and transmission in delay tolerant networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 2, pp. 482–494, 2013.

- [44] C. Singh, E. Altman, A. Kumar, and R. Sundaresan, "Optimal forwarding in delay-tolerant networks with multiple destinations," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 6, pp. 1812–1826, 2013.
- [45] Y. Chen, Y. Shen, and J. Zhu, "Capacity and delay-throughput tradeoff in ICMN with poisson contact process," *Wireless Networks*, 2015.
- [46] A. Chaintreau, P. Hui, J. Crowcroft, and C. Diot, "Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, no. 6, pp. 606–620, 2007.
- [47] C. Boldrini, M. Conti, and A. Passarella, "From pareto inter-contact times to residuals," *IEEE Communication letters*, vol. 15, no. 11, pp. 1256–1258, 2011.
- [48] X. F. Guo and M. C. Chan, "Plaktron: An efficient DTN routing algorithm," in *IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking (SECON)*, 2013.
- [49] U. Lee, S. Y. Oh, K.-W. Lee, and M. Gerla, "Scaling properties of delay tolerant networks in correlated motion patterns," in *Proceedings of the 4th ACM workshop on Challenged networks (CHANTS)*, 2009.
- [50] T. Karagiannis, J.-Y. Le Boudec, and M. Vojnović, "Power law and exponential decay of intercontact times between mobile devices," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, no. 10, pp. 1377–1390, 2010.
- [51] H. Cai. and D. Y. Eun, "Toward stochastic anatomy of inter-meeting time distribution under general mobility models," in *In Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc)*, 2008.
- [52] A. Picu and T. Spyropoulos, "DTN-Meteo: forecasting the performance of DTN protocols under heterogeneous mobility," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, no. 2, pp. 587–602, 2014.
- [53] P. Santi, *Mobility Models for Next Generation Wireless Networks*. Wiley, 2012.
- [54] F. Bai and A. Helmy, "A survey of mobility models," 2004, online-Last accessed-September 2015. [Online]. Available: <http://www.cise.ufl.edu/~helmy/papers/Survey-Mobility-Chapter-1.pdf>
- [55] M. Gorawski and K. Grochla, "Review of mobility models for performance evaluation of wireless networks," *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 242, pp. 567–577, 2014.

- [56] C. Bettstetter, H. Hartenstein, and H. Pérez-Costa, “Stochastic properties of the random waypoint mobility model,” *Kluwer Academic Publishers*, vol. 10, no. 5, pp. 555–567, 2004.
- [57] C. Bettstetter and C. Wagner, “The spatial node distribution of the random waypoint mobility model,” in *Workshop in Mobile Ad-Hoc (WMAN)*, 2002.
- [58] W. Navidi and T. Camp, “Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 56, pp. 680–694, 2004.
- [59] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. Raghavendra, “Performance analysis of mobility-assisted routing,” in *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, 2006.
- [60] A. Jindal and K. Psounis, “Fundamental mobility properties for realistic performance analysis of intermittently connected mobile networks,” in *Fifth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 2007.
- [61] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, “A survey of mobility models for ad hoc network research,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 5, pp. 483–502, 2002.
- [62] E. Royer, P. Meliar-Smith, and L. Moser, “An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks,” in *IEEE International Conference on Communications, (ICC)*, 2001.
- [63] T. Small and Z. Haas, “The shared wireless infostation model—a new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a way),” in *Proceedings of ACM MobiHoc*, 2003.
- [64] A.-L. Barabási, “The origin of bursts and heavy tails in human dynamics,” *Letters to Nature*, vol. 435, pp. 207–211, 2005.
- [65] D. Karamshuk, C. Boldrini, M. Conti, and A. Passarella, “Human mobility models for opportunistic networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 12, pp. 157–165, 2011.
- [66] P. Pirozman, G. Wu, B. Jedari, and F. Xia, “Human mobility in opportunistic networks: Characteristics, models and prediction methods,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 42, pp. 45–58, 2014.

- [67] M. Gonzalez, C. Hidalgo, and A. Barabási, “Understanding individual human mobility patterns,” *Nature*, vol. 453, pp. 779–782, 2008.
- [68] G. G. Zipf, *Human behavior and the principle of least effort: An introduction to human ecology*. Addison-Wesley Press, 1949.
- [69] C. Song, T. Koren, P. Wang, and A. Barabási, “Modelling the scaling properties of human mobility,” *Nature Physics*, vol. 6, pp. 818–823, 2010.
- [70] S. Hasan, X. Zhan, and S. Ukkusuri, “Understanding urban human activity and mobility patterns using large-scale location-based data from online social media,” in *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing*, 2013.
- [71] C. Boldrini and A. Passarella, “Spatiotemporal patterns of urban human mobility,” *Computer Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1056–1074, 2010.
- [72] T. Do and D. Gatica-Perez, “The places of our lives: Visiting patterns and automatic labeling from longitudinal smartphone data,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 313, no. 3, pp. 638–648, 2014.
- [73] W. Hsu, K. Merchant, C. Shu, H.W. and Hsu, and A. Helmy, “Weighted waypoint mobility model and its impact on ad hoc networks,” *Mobile Computing and Communications Review*, pp. 59–63, 2005.
- [74] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, and S. Chong, “On the levy-walk nature of human mobility,” in *IEEE INFOCOM*, 2008.
- [75] K. Lee, S. Hong, S. Kim, I. Rhee, and S. Chong, “Demystifying the levy walk patterns in human walks,” North Carolina State University, Tech. Rep., 2008.
- [76] A. Mei and J. Stefa, “SWIM: A simple model to generate small mobile worlds,” in *IEEE INFOCOM*, 2009, pp. 2106–2113.
- [77] S. Kosta, A. Mei, and J. Stefa, “Large-scale synthetic social mobile networks with sWIM,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 1, pp. 116–129, 2014.
- [78] A. Munjal, T. Camp, and W. Navidi, “SMOOTH: a simple way to model human mobility,” in *Proceedings of the 14th ACM international conference on modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems (MSWIM)*, 2011, pp. 515–529.
- [79] M. Mulolesi and C. Mascolo, “Designing mobility models based on social network theory,” *Mobile Computing and Communications*, pp. 1–11, 2007.

- [80] F. Ekman, A. Keranen, J. Karvo, and J. Ott, “Working day movement model,” in *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models (MobilityModels)*, 2008, pp. 33–40.
- [81] D. Fischer, K. Herrmann, and K. zRothermel, “GeSoMo — a general social mobility model for delay tolerant networks,” in *Proceedings of the IEEE 7th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, 2010, pp. 99–108.
- [82] S. Hong, K. Lee, and I. Rhee, “STEP: A spatio-temporal mobility model for humans walks,” in *Proceedings of the IEEE 7th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, 2010, pp. 630–638.
- [83] L. Bechetti, A. Clemenati, F. Pasquale, G. Resta, P. Santi, and R. Silvestri, “Flooding time in opportunistic networks under power law and exponential intercontact times,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014.
- [84] A. Beaufour, M. Leopold, and P. Bonnet, “Smart-tag based data dissemination,” in *Proceedings of the 1st ACM WSNA Workshop*, 2002.
- [85] A. Chakrabarti, A. Sabharwal, and B. Aazhang, “Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2003, pp. 129–145.
- [86] A. Hasson, R. Fletcher, and A. Pentland, “DakNet: A road to universal broadband connectivity,” in *Wireless Internet UN ICT Conference Case Study*, 2003.
- [87] E. Natalizio and Loscri, “Controlled mobility in mobile sensor networks: advantages, issues and challenges,” *Telecommunication Systems*, 2011.
- [88] J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas, and F. Bullo, “Coverage control for mobile sensing networks,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 20, no. 2, pp. 243–255, 2004.
- [89] D. K. Goldenberg, J. Lin, A. S. Morse, B. E. Rosen, and Y. R. Yang, “Towards mobility as a network control primitive,” in *5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, 2004, pp. 163–174.
- [90] K. Dantu, M. Rahimi, H. Shah, S. Babel, A. Dhariwal, and G. Sukhatme, “Robomote: enabling mobility in sensor networks,” in *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2005, pp. 404–409.
- [91] A. Somasundara, A. Ramamoorthy, and M. Srivastava, “Mobile element scheduling for efficient data collection in wireless sensor networks with dynamic deadlines,” in



- Proceedings of the 25th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS)*, 2005, pp. 296–305.
- [92] ———, “Mobile element scheduling with dynamic deadlines,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 2, no. 2, pp. 14–20, 2007.
- [93] W. Zhao and M. Ammar, “Message ferrying: Proactive routing in highly-partitioned wireless ad hoc networks,” in *Proceedings of the 9th IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems (FTDCS)*, 2003, pp. 308–314.
- [94] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, “A message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes,” in *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc)*, 2004, pp. 187–198.
- [95] ———, “Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant networks,” in *Proceedings of the 24th International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2005, pp. 1407–1418.
- [96] M. Tariq, A. Ammar, and E. Zegura, “Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes,” in *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc)*, 2006, pp. 37–48.
- [97] M. Ho and K. Fall, “Poster: Delay tolerant networking for sensor networks,” in *Proceedings of the Proc. of IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2004.
- [98] B. Burns, O. Brock, and B. Levine, “Mv routing and capacity building in disruption tolerant networks,” in *24th International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2005, pp. 398–408.
- [99] A. Kansal, A. Somasundara, D. Jea, M. Srivastava, and D. Estrin, “Intelligent fluid infrastructure for embedded networks,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys)*, 2004, pp. 111–124.
- [100] G. Wang, G. Cao, and T. La Porta, “Movement-assisted sensor deployment,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 6, pp. 640–652, 2006.
- [101] H. Liu, A. Nayak, and Stojmenović, “Localized mobility control routing in robotic sensor wireless networks,” *Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks*, vol. 4864, pp. 19–31, 2007.

- [102] S. Dalu, M. K. Naskar, and C. K. Sarkar, “Implementation of a topology control algorithm for mobile ad hoc networks using pursue mobility model,” *Journal of Applied Computers Science*, vol. 2, no. 2, pp. 14–20, 2008.
- [103] R. Sugihara and R. Gupta, “Optimizing energy-latency trade-off in sensor networks with controlled mobility,” in *Proceedings of the 28th International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2009, pp. 2566 – 2570.
- [104] Y. Li, D. Jin, and L. Zeng, “Energy-constrained mobility control for epidemic routing in disruption tolerant networks,” in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2011, pp. 1–5.
- [105] E. Hamouda, N. Mitton, and D. Simplot-Ryl, “Energy efficient mobile routing in actuator and sensor networks with connectivity preservation,” in *Proceedings of the 10th international conference on Ad-hoc, mobile, and wireless networks (ADHOC-NOW)*, 2011, pp. 15–28.
- [106] N. Gouvy, N. Mitton, and J. Zheng, “Greedy routing recovery using controlled mobility in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 10th international conference on Ad-hoc, mobile, and wireless networks (ADHOC-NOW)*, vol. 7960, 2013, pp. 209–220.
- [107] F. Mourad, H. Chehade, H. Snoussi, F. Yalaoui, L. Amodeo, and C. Richard, “Controlled mobility sensor networks for target tracking using ant colony optimization,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 8, pp. 1261 – 1273, 2012.
- [108] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Robert-Li, and R. W. Yeung, “Network information flow,” *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000.
- [109] **A. Vazintari**, C. Vlachou, and P. Cottis, “Network coding for overhead reduction in delay tolerant networks,” *Wireless Personal Communications*, vol. 72, no. 4, pp. 2653–2671, 2013.
- [110] —, “Energy constrained delay tolerant networks: A distributed network coding approach based on optimal memory management,” in *1st International Conference on Electrical Engineering and Applications (MIC-Electrical 2014)*, 4-6 April 2014.
- [111] X. Zhang, G. Neglia, J. Kurose, and D. Towsley, “On the benefits of random linear coding for unicast applications in disruption tolerant networks,” in *Network coding workshop (NeCod)*, 2006.
- [112] A. Vahdat and D. Becker, “Epidemic routing for partially connected ad-hoc networks,” Duke University, Tech. Rep., 2000.

- [113] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelen, “Probabilistic routing in intermittently connected networks,” *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review*, vol. 7, no. 3, pp. 19–20, 2003.
- [114] T. Ho, B. Leong, M. Medard, R. Kottter, Y.-H. Chang, and M. Effros, “On the utility of network coding in dynamic environments,” in *International workshop on wireless ad-hoc networks (IWWAN)*, 2004.
- [115] J. Widmer and J.-Y. Le Boudec, “Network coding for efficient communication in extreme networks,” in *Workshop on delay tolerant networking and relate networks (WDTN)*, 2005.
- [116] Y. Lin, B. Liang, and B. Li, “Performance modeling of network coding in epidemic routing,” in *International workshop on mobile opportunistic networking (MobiOpp)*, 2007.
- [117] —, “Stochastic analysis of network coding in epidemic routing,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, vol. 26, no. 5, pp. 794–808, 2008.
- [118] —, “Efficient network coded data transmissions in disruption tolerant networks,” in *INFOCOM*, 2008.
- [119] C. Fragouli, J. Widmer, and J.-Y. Le Boudec, “Efficient broadcasting using network coding,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 2, pp. 450–463, 2008.
- [120] P. Chou, Y. Wu, and K. Jain, “Practical network coding,” in *Alletron conference on communication, control and computing*, 2003.
- [121] J.-S. Lee, Y.-W. Su, and C.-C. Shen, “A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, uwb, zigbee and wi-fi,” in *Proceedings of IEEE IECON*, 2007.
- [122] J. Eliasson, P. Lindgren, and J. Delsing, “A bluetooth-based sensor node for low-power ad hoc networks,” *Journal of Computers*, 2008.
- [123] **A. Vazintari** and P. Cottis, “Mobility management in energy constrained self-organizing delay tolerant networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015 (to appear).
- [124] W. Wang, M. Motani, and V. Srinivasan, “Opportunistic energy-efficient contact probing in delay-tolerant applications,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009.
- [125] K.-H. Kim, A. W. Min, D. Gupta, P. Mohapatra, and J. P. Singh, “Improving energy efficiency of wi-fi sensing on smartphones,” in *INFOCOM*, 2011, pp. 2930 – 2938.

- [126] R. Oliveira, P. Luis, and J. Crowcroft, “The impact of node’s mobility on link-detection based on routing hello messages,” in *Proceedings of the Wireless Communications Networking Conference (WCNC)*, 2010, pp. 1–6.
- [127] A. Tyrell, G. Auer, and Bettstetter, “Emergent slot synchronization in wireless networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010.
- [128] L. M. B. Cabral, “Asymmetric equilibria in symmetric games with many players,” *Economic Letters*, vol. 27, pp. 205–208, 1988.
- [129] M. F. Munir and F. Filali, “Analyzing the performance of a self-organizing framework for wireless sensor-actuator networks,” in *Proceedings of the spring simulation multiconference (SpringSim)*, 2007, pp. 66–73.
- [130] H. Kim and J. A. Cobb, “Simultaneous optimization of transmission range and actor movement in wsans,” in *Proceedings of the International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2012, pp. 985–989.
- [131] **A. Vazintari** and P. Cottis, “Energy-efficient contact probing in self-organizing delay-tolerant networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, (submitted).
- [132] S. Qin, G. Feng, and Y. Zhang, “How the contact-probing mechanism affects the transmission capacity of delay-tolerant networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011.
- [133] B. Han, J. Li, and A. Srinivasan, “On the energy efficiency of device discovery in mobile opportunistic networks: A systematic approach,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, no. 4, pp. 786–799, 2015.
- [134] G. Baudic, T. Perennou, and E. Lochin, “Revisiting pitfalls of dtn datasets statistical analysis,” in *Proceedings of the 9th ACM Mobicom Workshop on Challenged Networks (CHANTS)*, 2014, pp. 73–76.
- [135] N. Banerjee, M. D. Corner, and B. . Levine, “Design and field experimentation of an energy-efficient architecture for DTN throwboxes,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, no. 2, pp. 554–567, 2010.
- [136] X. Zhang and K. G. Shin, “Energy-minimizing idle listening in wireless networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 9, pp. 1441–1454, 2012.
- [137] D. Rodriguez-Silva, A. Costa, and J. Macedo, “Energy impact analysis on dtn routing protocols,” in *Proceedings of the 4th Extreme Conference on Communication (ExtremeCom)*, 2012.

- [138] B. J. Choi and X. Shen, “Adaptive asynchronous sleep scheduling protocols for delay tolerant networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, no. 0, pp. 1283–1296, 2011.
- [139] H. Jun, M. H. Ammar, M. D. Corner, and E. W. Zegura, “Hierarchical power management in disruption tolerant networks with traffic-aware optimization,” in *Proceedings of SIGCOMM Workshop on Challenged Networks*, 2006, pp. 245–252.
- [140] S. Singh and C. S. Raghavendra, “PAMAS-Power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks,” pp. 5–26, 1998.
- [141] C. F. Chiasserini and R. Rao, “A distributed power management policy for wireless ad hoc networks,” in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2000.
- [142] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris, “SPAN: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks,” *Wireless Networks*, vol. 8, no. 5, pp. 481–494, 2002.
- [143] Y.-C. Tseng, C.-S. Hsu, and T.-Y. Hsieh, “Power-saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop ad hoc networks,” in *Proceedings of INFOCOM*, 2002.
- [144] —, “Power-saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop ad hoc networks,” *Computer Networks*, vol. 43, no. 3, pp. 317–337, 2003.
- [145] R. Zheng, J. C. Hou, and L. Sha, “Asynchronous wakeup for ad hoc networks,” in *Proceedings of ACM MobiHoc*, 2003.
- [146] I.-C. Chou, C.-M. Chao, and J.-P. Sheu, “An adaptive quorum-based energy conserving protocol for IEEE 802.11 ad hoc networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 5, pp. 560–570, 2006.
- [147] J.-R. Jiang, Y.-C. Tseng, C.-S. Hsu, and T.-H. Lai, “Quorum-based asynchronous power-saving protocols for IEEE 802.11 ad hoc networks,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, pp. 169–181, 2005.
- [148] Z.-T. Chou, “Optimal adaptive power management protocols for asynchronous wireless ad hoc networks,” in *Proceedings of the IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, 2007.
- [149] S.-H. Wu, C.-M. Chen, and M.-S. Chen, “An asymmetric quorum-based power saving protocol for clustered ad hoc networks,” in *Proceedings of the IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, 2007.

- [150] ———, “An asymmetric quorum-based power saving protocol for clustered ad hoc networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010.
- [151] ———, “Fully adaptive power saving protocols for ad hoc networks using the hyper quorum system,” in *Proceedings of the IEEE 28th International Conference on Distributed Computing System (ICDCS)*, 2008.
- [152] P. Dutta and D. Culler, “Practical asynchronous neighbor discovery and rendezvous for mobile sensing applications,” in *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Sensor Systems*, 2008, pp. 71–83.
- [153] A. Kandhalu, K. Lakshmanan, and R. R. Rajkumar, “U-Connect: A low-latency energy-efficient asynchronous neighbor discovery protocol,” in *Proceedings of the 9th ACM/IEEE Conference on Information Process. Sensor networks*, 2010, pp. 350–361.
- [154] M. Bakht, M. Trower, and R. H. Kravets, “Searchlight: Won’t you be my neighbor?” in *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing Networks*, 2012, pp. 185–196.
- [155] W. Giao and Q. Li, “Wakeup scheduling for energy-efficient communication in opportunistic mobile networks,” in *INFOCOM*, 2013, pp. 2058 – 2066.
- [156] J. Jeong, Y. Y. J. Choo, D. Y. Eun, and S. Chong, “Wi-fi sensing: Should mobiles sleep longer as they age?” in *INFOCOM*, 2013, pp. 2328–2336.
- [157] M. Anastasopoulos, P.-D. Arapoglou, R. Kannan, and P. G. Cottis, “Adaptive routing strategies in IEEE 802.16 multi-hop wireless backhaul networks based on evolutionary game theory,” *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*, 2008.
- [158] M. P. Anastasopoulos, M. P. Vasilakos, and P. G. Cottis, “An autonomic framework for reliable multicast: A game theoretical approach based on social psychology,” *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, 2009.
- [159] A. C. Voulkidis, M. P. Anastasopoulos, and P. G. Cottis, “Energy efficiency in wireless sensor networks: A game-theoretic approach based on coalition formation,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2013.
- [160] S. Lasaulce and H. Tembine, *Game theory and learning for wireless networks*. Elsevier, 2011.
- [161] M. Osborne and A. Rubinsteine, *A course in game theory*. Cambridge, MA, MIT Press, 1994.

- [162] S.-F. Cheng, D. M. Reeves, Y. Vorobyechik, and M. P. Wellman, “Notes on equilibria in symmetric games,” in *Proceedings of the 6th International Workshop on Game Theoretic Decision Theoretic Agents*, 2004, pp. 71–78.
- [163] J. Nash, “Non-cooperative games,” *Annual Mathematics*, vol. 54, no. 2, pp. 286–295, 1951.
- [164] “Lecture 7: Computing nash equilibria: the equality of payoffs theorem,” [http://people.math.umass.edu/~lr7q/ps\\_files/teaching/math456/lecture7.pdf](http://people.math.umass.edu/~lr7q/ps_files/teaching/math456/lecture7.pdf), online-Last accessed-September 2015.





# Κατάλογος Δημοσιεύσεων

- [1] **A. Vazintari**, C. Vlachou, and P. Cottis, “Network coding for overhead reduction in delay tolerant networks,” *Wireless Personal Communications*, vol. 72, no. 4, pp. 2653–2671, 2013.
- [2] —, “Energy constrained delay tolerant networks A distributed network coding approach based on optimal memory management,” in *1st International Conference on Electrical Engineering and Applications (MIC-Electrical 2014)*, 4-6 April 2014.
- [3] **A. Vazintari** and P. Cottis, “Mobility management in energy constrained self-organizing delay tolerant networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015 (to appear).
- [4] —, “Energy-efficient contact probing in self-organizing delay-tolerant networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, (submitted).



## Βιογραφικό Σημείωμα

Η Άννα Βαζιντάρη γεννήθηκε στις 15 Ιουλίου 1984 στην Αθήνα. Αποφοίτησε το 2002 από το 1ο Ενιαίο Λύκειο Αλίμου (Θουκυδίδειο) με βαθμό απολυτηρίου «Άριστα» (19.6/20), λαμβάνοντας το κληροδότημα Μπενάκη για την ενίσχυση των προπτυχιακών της σπουδών ως η μαθήτρια με το μεγαλύτερο βαθμό απολυτηρίου. Κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών της σπουδών στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (Η.Μ.Μ.Υ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.) (2002-2007), η Άννα Βαζιντάρη υπήρξε υπότροφος του ιδρύματος Σακελλαρίου Γεωργίου και Άνης (2002-2007), του κληροδοτήματος Παπακυριακόπουλου για την επικρατέστερη επίδοση στα Μαθηματικά και του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (Τ.Ε.Ε.) για την εξαιρετη επίδοσή της στο ακαδημαϊκό έτος 2003-2004, του κληροδοτήματος Κρήτσκη του Υπουργείου Παιδείας και Θρησκευμάτων (2005-2007), του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.) και του Θωμαΐδειου Βραβείου του Ε.Μ.Π. για την επίδοση στο ακαδημαϊκό έτος 2006-2007. Το Σεπτέμβριο του 2007 ολοκλήρωσε τις σπουδές της με βαθμό διπλώματος «Άριστα» (9.20/10). Η διπλωματική της εργασία με τίτλο «Δρομολόγηση σε Ευρυζωνικά Δίκτυα Επικοινωνιών μέσω Δικτύων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας» οδήγησε το Νοέμβριο του 2008 στην παρουσίαση της εργασίας «Converting Energy Distribution Networks into Smart Grid Networks with the use of Broadband over Powerlines Technology» στο διεθνές επιστημονικό συνέδριο «MedPower '08».

Το Νοέμβριο του 2007, η Άννα Βαζιντάρη έγινε δεκτή ως Υποψήφια Διδάκτορας (Υ.Δ.) από την Σχολή Η.Μ.Μ.Υ. του Ε.Μ.Π., στον Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Παναγιώτη Κωττή. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής της διατριβής, η Άννα Βαζιντάρη έλαβε την υποτροφία του κληροδοτήματος Δεμπεγιώτη της Σχολής Η.Μ.Μ.Υ. του Ε.Μ.Π. (2008-Σεπτέμβριος 2009) ως υποψήφια με τη μεγαλύτερη βαθμολογία διπλώματος και την υποτροφία του προγράμματος Ε.Σ.Π.Α. «ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ ΙΙ» (Σεπτέμβριος 2009-Οκτώβριος 2015). Παράλληλα με το ερευνητικό της έργο ως Υ.Δ., η Άννα Βαζιντάρη ολοκλήρωσε τις μεταπτυχιακές της σπουδές στο διατμηματικό πρόγραμμα σπουδών «Τεχνοοικονομικά Συστήματα» του Ε.Μ.Π. και του Πανεπιστημίου Πειραιά (Φεβρουάριος 2008-Σεπτέμβριος 2010). Στο πλαίσιο της διδακτορικής της διατριβής, η Άννα Βαζιντάρη πέτυχε τη δημοσίευση δύο (2) δημοσιεύσεων σε έγκριτα διεθνή επιστημονικά περιοδικά, παρουσίασε μία εργασία σε διεθνές επιστημονικό

συνέδριο με κριτές, ενώ προετοίμασε και υπέβαλε προς κρίση σε διεθνές επιστημονικό περιοδικό μία ακόμα εργασία.

Τα ερευνητικά ενδιαφέροντα της Άννας Βαζιντάρη αποτελούν η εξοικονόμηση ενέργειας στα αυτο-οργανούμενα δίκτυα ανεκτικά σε καθυστέρηση (SO-DTNs), η εφαρμογή της τεχνικής κωδικοποίησης δικτύου (Network Coding, NC) και η χρήση της θεωρίας παιγνίων ως μαθηματικό εργαλείο διαχείρισης των σχέσεων ανταλλαγής μεταξύ αντικρουόμενων μεγεθών στα SO-DTNs.