

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ &  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ**  
UNIVERSITY OF PATRAS

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

Μελέτη μέσω προσομοιώσεων (simulations) της μετάδοσης δεδομένων  
σε Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs)

---

Συγγραφέας

Χρήστος Κατσάνος

A.M. 5539

Υπεύθυνος Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας

Επιβλέπων

Βαγγέλης Καπούλας

Πάτρα, Ιούνιος 2018



## Περίληψη

Στη σημερινή εποχή, τα Ad Hoc δίκτυα είναι ιδιαίτερα δημοφιλή βρίσκοντας εφαρμογή σε πληθώρα περιπτώσεων καθημερινά. Η παράλληλη ραγδαία εξέλιξη των κινητών συσκευών, οδήγησε στην ταυτόχρονη πρόοδο των Ad Hoc δικτύων. Τα Ad Hoc δίκτυα διαθέτουν το πλεονέκτημα λειτουργίας χωρίς τη βοήθεια κάποιας προϋπάρχουσας δικτυακής δομής που θα διευκολύνει τη μετάδοση των δεδομένων ή θα συντονίσει τις διάφορες εργασίες εντός του δικτύου. Συσκευές μπορούν να εισέρχονται και να εξέρχονται αυθαίρετα σε ένα Ad Hoc δίκτυο χωρίς αυτό να χάνει τη λειτουργικότητα του. Τα MANETs (Mobile Ad Hoc Networks) απαρτίζονται από κινητούς κόμβους που επικοινωνούν ελεύθερα μεταξύ τους ενώ συμμετέχουν ταυτόχρονα και στην προώθηση πακέτων. Υποκατηγορία των MANETs είναι τα VANETs (Vehicular Ad Hoc Networks) στα οποία οι κόμβοι πλέον είναι τα οχήματα εντός μιας πόλης στα οποία έχει προσαρτηθεί μια δικτυακή συσκευή που επιτρέπει την επικοινωνία τους. Τα VANETs εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η δρομολόγηση πακέτων εντός ενός VANET αποτελεί σημαντικό πρόβλημα καθώς οι απαιτήσεις κάθε εφαρμογής είναι διαφορετικές. Συγκεκριμένα, το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται σε μια περίπτωση πρέπει να εγγυάται την παράδοση των πακέτων με υψηλή πιθανότητα ώστε να αυξάνεται όσο είναι δυνατόν η αξιοπιστία του δικτύου. Επιπρόσθετα, ο χρόνος που χρειάζεται ένα πρωτόκολλο για να μεταδώσει ένα πακέτο από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμού είναι εξίσου σημαντικός. Η προώθηση του πακέτου πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα με τις λιγότερες δυνατές μεταβάσεις του πακέτου μέσω του προσδιορισμού ενός βέλτιστου μονοπατιού.

Η ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των παραπάνω απαιτήσεων σε VANETs αποτελεί σημαντική πρόκληση. Τα χαρακτηριστικά ενός VANET καθορίζουν τη δυσκολία εκπλήρωσης των απαιτήσεων καθώς η κινητικότητα των κόμβων, η ταχύτητα και κατεύθυνση τους αλλά και άλλες παράμετροι όπως η πυκνότητα τους εντός του πλέγματος ή η ύπαρξη εμποδίων που δυσχεραίνουν την προώθηση πακέτων δύνανται να μειώσουν την απόδοση των πρωτοκόλλων. Συνεπώς, το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν του τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός αστικού περιβάλλοντος και τις ιδιομορφίες της κινητικότητας των κόμβων εντός αυτού ώστε να επιτυγχάνει όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση για τις χρησιμοποιούμενες μετρικές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της λειτουργίας διαφόρων πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε VANETs. Συγκεκριμένα, περιγράφεται περιληπτικά ο μηχανισμός δρομολόγησης πακέτων που χρησιμοποιεί κάθε πρωτόκολλο. Ακόμη, αναφέρονται τα αποτελέσματα της απόδοσης κάθε πρωτοκόλλου συγκριτικά με άλλα, για συγκεκριμένες μετρικές, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην εκάστοτε εργασία κάθε πρωτοκόλλου.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, διεξήχθησαν προσομοιώσεις μετάδοσης δεδομένων σε αστικό περιβάλλον για την αξιολόγηση της απόδοσης συγκεκριμένων πρωτοκόλλων. Τα πρωτόκολλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι τα AODV, DSR, GPSR, GPCR, GPSR-N και οι μετρικές απόδοσης για τις οποίες αξιολογήθηκαν είναι το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων (PDR) και η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση (Average End-to-End Delay). Το περιβάλλον στο οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις είναι αστικό με τις ταχύτητες των κόμβων να ανταποκρίνονται σε πραγματικές τιμές και τα κτίρια να αποτελούν εμπόδια για τη μετάδοση δεδομένων.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν πως συγκεκριμένα πρωτόκολλα όπως τα AODV και DSR αδυνατούν να εγγυηθούν αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, που να συνδυάζεται με χαμηλή καθυστέρηση, εντός της πόλης. Αντιθέτως, οι GPCR και GPSR αποδίδουν καλύτερα σε αστικά περιβάλλοντα εμφανίζοντας επαρκές ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων με χαμηλή μέση καθυστέρηση. Ο GPSR-N απέδωσε καλύτερα από όλα τα πρωτόκολλα που αναφέρθηκαν, καταφέροντας να επιτύχει υψηλά ποσοστά παραδιδόμενων πακέτων αλλά και τη χαμηλότερη καθυστέρηση, για όλες τις πυκνότητες οχημάτων και τα διάφορα μεγέθη πόλης. Τέλος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία για να διαπιστωθεί η εγκυρότητα τους ενώ σχολιάστηκαν τυχούσες αποκλίσεις.

## **Abstract**

Ad Hoc networks are currently very popular with multiple everyday applications. The fast-paced development and improvement of mobile devices has mediated significant parallel progress in Ad Hoc network development. Ad Hoc networks are advantageous in that function does not require a pre-existent network structure to allow for data transmission or process coordination within the network. Thus, devices can arbitrarily enter or exit an Ad Hoc network without impairing its functionality. Mobile Ad Hoc Networks (MANETs) are made up of mobile nodes that freely communicate with each other while participating in packet forwarding. A subcategory of MANETs are VANETs (Vehicular Ad Hoc Networks) where the nodes are represented by the vehicles of a city carrying a network device that allows for communication between them. This present report is focusing on the study of VANETs.

Routing of packets within a VANET is challenging due to the different requirements of every application (using it). More specifically, the routing protocol in use should warrant the delivery of packets at high probability to increase the reliability of the network. In addition, equally crucial is the time required by the protocol to transmit a packet from the source-node to the receiver-node. Packets have to be forwarded rapidly by determining the most optimal route containing the least amount of hops.

Fulfilling all the above criteria simultaneously in VANETs constitutes a significant challenge. The characteristics of a VANET like the movement of nodes, their speed and direction of motion as well as other factors like the density of nodes within a grid or the existence of obstacles can hinder the protocol performance and are those that determine the difficulty of successful process completion. Therefore, the employed protocol should consider the traits of the urban landscape and the mobility of nodes within it in order to achieve optimal performance based on the utilized metrics.

This study includes a short review of the function of a variety of different routing protocols of VANETs, briefly outlining the mechanism of packet routing for every protocol. Moreover, a comparative analysis of the results on performance between protocols, for specific metrics, as these were reported in studies on each protocol, is presented here.

For this study, simulations were carried out on data transmission within an urban environment to assess the performance of specific protocols. The utilized protocols were AODV, DSR, GPSR, GPCR, GPSR-N and were assessed based on the proportion of delivered packets (PDR) and the average end-to-end delay metrics. The simulated environment was urban with buildings acting as obstacles in data transmission and with node speeds corresponding to normal vehicular speed values.

The results presented here show that protocols such as the AODV and DSR cannot guarantee reliable transmission of data coupled with low delays within the city. In contrast, the GPCR and GPSR protocols perform better in urban environments exhibiting sufficient proportions of delivered packets and low average delay. The GPSR-N performed the best amongst all protocols achieving high proportions of delivered packets and the lowest delay for all vehicle densities and city sizes. Lastly, the results found here were compared to literature-derived results to determine their validity, while possible deviations were discussed.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν, στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Χρήστο Μπούρα (Αναπληρωτή Πρύτανη και Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών) για την ανάθεση και επίβλεψη της επιτυχούς ολοκλήρωσης της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βαγγέλη Καπούλα για την πολύτιμη βοήθεια του, χωρίς την οποία δε θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

# Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1</b> .....	13
<b>Εισαγωγικές Έννοιες</b> .....	13
1.1 Δίκτυο Υπολογιστών .....	13
1.2 Ασύρματα δίκτυα .....	14
1.3 Εύρος ζώνης, ψηφιακή μετάδοση και ψηφιακό σήμα .....	15
1.4 Μοντέλο αναφοράς OSI .....	17
1.5 Ασύρματη μετάδοση .....	18
1.6 IEEE 802.11 .....	20
1.7 Ευρυζωνικότητα .....	21
1.8 Αδόμητα Ασύρματα Δίκτυα .....	22
1.9 MANETs .....	25
1.10 VANETs .....	26
1.11 Προσομοιωτές δικτύων .....	28
<b>Κεφάλαιο 2</b> .....	29
<b>Αλγόριθμοι δρομολόγησης</b> .....	29
2.1 GPSR .....	29
2.2 A-STAR .....	31
2.3 GSR .....	32
2.4 GPCR .....	33
2.5 LOUVRE .....	34
2.6 GyTAR .....	36
2.7 DSR .....	37
2.8 LAR .....	39
2.9 BMAR .....	41
2.10 AODV .....	42
2.11 HLAR .....	43
2.12 SAR .....	45
2.13 CBF .....	46



2.14 CAR.....	47
2.15 EBGR .....	49
2.16 JBR .....	50
2.17 GPSR-N.....	53
2.18 OLSR.....	54
<b>Κεφάλαιο 3 .....</b>	<b>57</b>
<b>Αξιολόγηση Απόδοσης των πρωτοκόλλων .....</b>	<b>57</b>
3.1 Παράμετροι Προσομοίωσης.....	57
3.2 Αποτελέσματα σε μικρό Grid.....	58
3.2.1 PDR σε μικρό Grid.....	58
3.2.2 Average Delay σε μικρό Grid.....	61
3.3 Αποτελέσματα σε μεσαίο Grid.....	62
3.3.1 PDR σε μεσαίο Grid .....	62
3.3.2 Average Delay σε μεσαίο Grid.....	65
3.4 Αποτελέσματα σε μεγάλο Grid .....	67
3.4.1 PDR σε μεγάλο Grid.....	67
3.4.2 Average Delay σε μεγάλο Grid .....	70
3.5 Συγκριτική μελέτη Πρωτοκόλλων .....	72
3.5.1 PDR για μικρό Density.....	72
3.5.2 PDR για μεσαίο Density .....	74
3.5.3 PDR για μεγάλο Density .....	75
3.5.4 PDR για μέγιστο Density.....	76
3.5.5 Average Delay για μικρό Density.....	78
3.5.6 Average Delay για μεσαίο Density.....	79
3.5.7 Average Delay για μεγάλο Density .....	80
3.5.8 Average Delay για μέγιστο Density .....	82
3.6 Απόδοση πρωτοκόλλων για διάφορα Grid size/densities .....	83
3.6.1 AODV.....	83
3.6.2 DSR .....	86
3.6.3 GPSR .....	89
3.6.4 GPCR.....	92

3.6.5 GPSR-N .....	96
3.6.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	100
<b>Κεφάλαιο 4</b> .....	<b>103</b>
<b>Συμπεράσματα και Μελλοντική εργασία</b> .....	<b>103</b>
4.1 Συμπεράσματα.....	103
4.2 Μελλοντική εργασία .....	104
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>105</b>

## Εισαγωγή

Ο στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι:

1. Η καταγραφή των διάφορων αλγορίθμων δρομολόγησης σε Vehicular Ad Hoc Networks, η περιγραφή τους και η αναφορά των συγκριτικών επιδόσεων τους σύμφωνα με τα papers στα οποία δημοσιεύτηκαν.
2. Η συγκριτική μελέτη της απόδοσης των πρωτοκόλλων αυτών σε VANETs μέσω προσομοιώσεων σε εξομοιωτή δικτύου (ns3) και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την απόδοσή τους σε κάθε σενάριο σε σχέση με το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων και την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.

Η διπλωματική εργασία οργανώνεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται κάποιες εισαγωγικές έννοιες που είναι θεμελιώδεις για τα VANETs. Γίνεται εισαγωγή στα δίκτυα υπολογιστών και στα Ad Hoc δίκτυα. Συγκεκριμένα, παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας των ασύρματων δικτύων και κατ' επέκταση των VANETs. Ακολούθως, γίνεται συνοπτική αναφορά στον προσομοιωτή δικτύου που χρησιμοποιήθηκε για τη διενέργεια των πειραμάτων.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια καταγραφή των υπαρχόντων αλγορίθμων δρομολόγησης. Για κάθε αλγόριθμο παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία του, από τον τρόπο που εδραιώνονται τα μονοπάτια μεταξύ των κόμβων ως τη φιλοσοφία που ακολουθεί κάθε πρωτόκολλο στη δρομολόγηση των πακέτων προς τον προορισμό. Αναλύεται ο τρόπος επανάκαμψης από τυχόν αδιέξοδα κατά τη δρομολόγηση των πακέτων κατά μήκος ενός μονοπατιού, ενώ γίνεται συνοπτική αναφορά στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο κάθε δημοσίευσης.

Στο κεφάλαιο 3 περιλαμβάνεται η παρουσίαση των πειραμάτων που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Αρχικά, αναφέρονται οι παράμετροι των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν καθώς και οι προδιαγραφές των πειραμάτων όπως το μέγεθος πόλης και οι διάφορες πυκνότητες κόμβων. Εν συνεχεία, παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε γραφικές παραστάσεις. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται ως προς τις επιλεγμένες μετρικές για κάθε πρωτόκολλο ξεχωριστά αλλά και για όλα τα πρωτόκολλα συνδυαστικά.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται ανακεφαλαίωση και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη διενέργεια των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, σχολιάζεται η απόδοση κάθε πρωτοκόλλου για τις διάφορες πυκνότητες κόμβων και καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος πόλης, ενώ συγκρίνονται και τα αποτελέσματα των πρωτοκόλλων μεταξύ τους, για τις αντίστοιχες μετρικές. Επιπροσθέτως, τα

αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συγκρίνονται με αντίστοιχα αποτελέσματα πειραμάτων παρόμοιων προδιαγραφών και σχολιάζεται το κατά πόσο αυτά επιβεβαιώνουν ή αποκλίνουν από τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε αυτή την εργασία. Τέλος, γίνεται μια αναφορά στο που θα μπορούσε να εστιάσει πιθανή μελλοντική εργασία ώστε να διερευνηθεί περαιτέρω η απόδοση των πρωτοκόλλων σε VANETs σε αστικό περιβάλλον.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγικές Έννοιες

### 1.1 Δίκτυο Υπολογιστών

Το δίκτυο υπολογιστών είναι τηλεπικοινωνιακό σύστημα από αυτόνομους ή μη αυτόνομους διασυνδεδεμένους υπολογιστές. Οι υπολογιστές θεωρούνται διασυνδεδεμένοι όταν είναι σε θέση να ανταλλάξουν πληροφορίες μεταξύ τους και αυτόνομοι όταν δεν είναι δυνατό κάποιος υπολογιστής να ελέγξει τη λειτουργία (π.χ. εκκίνηση ή τερματισμό) κάποιου άλλου. Σε ένα δίκτυο υπολογιστών μπορούν να διασυνδέονται μεταξύ τους εκτός από τα παραδοσιακά επιτραπέζια PCs και άλλου τύπου συσκευές όπως PDAs, κινητά τηλέφωνα, τηλεοράσεις, εκτυπωτές, σαρωτές. Τα δίκτυα φέρουν χαρακτηρισμούς, που καθορίζουν και την κατηγορία τους. Ανάλογα με το φυσικό μέσο διασύνδεσης τους χαρακτηρίζονται ως ενσύρματα ή ασύρματα. Ανάλογα με τον τρόπο πρόσβασης σε αυτά χαρακτηρίζονται ως δημόσια ή ιδιωτικά δίκτυα. Ανάλογα με τη γεωγραφική κάλυψη του δικτύου χαρακτηρίζονται ως τοπικά (LAN και WLAN), μητροπολιτικά (MAN και WMAN), ευρείας κάλυψης (WAN και WWAN) και προσωπικά (PAN και WPAN). Οι χαρακτηρισμοί με το πρόσθετο W ανταποκρίνονται στον ασύρματο (Wireless) τρόπο σύνδεσης.



Εικόνα 1: Ιεραρχία δικτύων υπολογιστών

Τα τοπικά δίκτυα ή και LAN (local area networks) είναι δίκτυα που συνδέουν υπολογιστές σε κοντινές αποστάσεις, π.χ. από υπολογιστές που βρίσκονται σε ένα δωμάτιο μέχρι υπολογιστές που απέχουν μερικά χιλιόμετρα μεταξύ τους.

Χρησιμοποιούνται συνήθως για να συνδέουν προσωπικούς υπολογιστές και σταθμούς εργασίας σε γραφεία εταιρειών, εργοστάσια, πανεπιστήμια κ.λπ.

Ένα μητροπολιτικό δίκτυο ή και MAN (metropolitan area network) είναι μια μεγαλύτερη εκδοχή ενός τοπικού δικτύου καθώς καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις, π.χ. από μια ομάδα γειτονικών γραφείων μιας εταιρείας έως μια πόλη.

Τα δίκτυα ευρείας περιοχής ή WAN (wide area network) καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, π.χ. από σύνδεση μεταξύ διαφορετικών πόλεων μέχρι μιας ολόκληρης ηπείρου και μπορούν να συνδέσουν ακόμη και περισσότερα από ένα τοπικά δίκτυα καθώς και ομάδες τοπικών δικτύων. Τα περισσότερα δίκτυα ευρείας περιοχής χρησιμοποιούν τηλεφωνικά δίκτυα ή τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους.

Τα διαδίκτυα είναι δίκτυα ευρείας περιοχής τα οποία καλύπτουν γεωγραφικές περιοχές μίας ή περισσότερων ηπείρων διασυνδέοντας επιμέρους δίκτυα. Σε ένα διαδίκτυο μπορεί να συνυπάρχουν διασυνδεδεμένοι υπολογιστές και δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες και λειτουργικά συστήματα. Το Διαδίκτυο (Internet) είναι το μεγαλύτερο τέτοιου είδους δίκτυο.

## 1.2 Ασύρματα δίκτυα

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου. Όλα τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και επομένως, κατά μία έννοια, είναι ουσιαστικώς δίκτυα υπολογιστών. Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN). Τα τέσσερα τελευταία εξετάζονται σε αυτό το άρθρο. Η τηλεόραση και το ραδιόφωνο, αν και ως τηλεπικοινωνιακά μέσα είναι εκ φύσεως ασύρματα στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν συμπεριλαμβάνονται στα ασύρματα δίκτυα, καθώς η μετάδοση γίνεται προς πάσα κατεύθυνση χωρίς να υπάρχει κάποιο δομημένο δίκτυο τηλεπικοινωνιακών κόμβων (συσκευών) με τη συνήθη έννοια. Επιπλέον, τα μεταφερόμενα δεδομένα συνήθως είναι αναλογικά και επομένως δε μπορούν να θεωρηθούν δίκτυα υπολογιστών.

### 1.3 Εύρος ζώνης, ψηφιακή μετάδοση και ψηφιακό σήμα

Ένα ψηφιακό σήμα είναι μία ροή δυαδικών ψηφίων (bits) και μπορεί να κωδικοποιηθεί μέσω των μεταβολών μιας συνεχούς φυσικής ποσότητας με τη μέθοδο κωδικοποίησης συνήθως να ορίζει συγκεκριμένες μόνο επιτρεπτές μεταβολές ή επίπεδα τιμής, το καθένα εκ των οποίων αντιστοιχεί σε μια ακολουθία ενός ή περισσότερων bit (μία τέτοια ακολουθία ονομάζεται σύμβολο). Έτσι, το σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί ως κυματομορφή σε ένα γράφημα, ο κάθετος άξονας του οποίου αντιστοιχεί την ποσότητα που μεταβάλλεται και ο οριζόντιος στον χρόνο. Αυτό το σήμα που μεταφέρει κωδικοποιημένη πληροφορία δεν έχει μία συγκεκριμένη συχνότητα  $f$  (δεν είναι καν περιοδική κυματομορφή για να έχει συχνότητα), αλλά μαθηματικά ισοδυναμεί με ένα άθροισμα πολλών περιοδικών ημιτονοειδών σημάτων, ελαφρώς διαφορετικών συχνοτήτων, τα οποία προστίθενται, δίνοντας το ολικό σήμα (ένα εύρος συχνοτήτων  $\Delta f$  επικεντρωμένο γύρω από μία κεντρική συχνότητα  $f$ ).

Ο μαθηματικός μετασχηματισμός Φουριέ καταδεικνύει πόσο συμμετέχει το ημίτονο κάθε πιθανής συχνότητας στο ολικό σήμα, ενώ το σύνολο των συχνοτήτων που συμμετέχουν λέγεται εύρος ζώνης του σήματος και μετράται σε Χερτς (Hz). Ένα ψηφιακό σήμα μπορεί να μεταδώσει μόνο ψηφιακά δεδομένα, ενώ, αντίθετα, ένα αναλογικό σήμα (στο οποίο η φυσική ποσότητα μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο και όχι μόνο σε επιτρεπτά επίπεδα τιμής που αναπαριστούν ακολουθίες bit) μπορεί να μεταδώσει τόσο ψηφιακά όσο και αναλογικά δεδομένα. Όταν μεταδίδονται ψηφιακά δεδομένα, ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να μετρηθεί ως bps (bit ανά sec, ισούται με το μέγεθος "σύμβολα ανά δευτερόλεπτο" επί το "πλήθος bit ανά σύμβολο"), ενώ αντίστοιχο μέγεθος δεν υπάρχει κατά τη μετάδοση αναλογικών δεδομένων, αφού αυτά μεταδίδονται σε πραγματικό χρόνο (π.χ. παραδοσιακή τηλεόραση, τηλέφωνο και ραδιόφωνο).

Τα κανάλια επικοινωνίας είναι φυσικές δίοδοι, που επιτρέπουν σε σήματα κωδικοποιημένα μέσω μίας συγκεκριμένης φυσικής ποσότητας, να μεταδοθούν κατά μήκος τους· έτσι επιτυγχάνονται οι τηλεπικοινωνίες. Τα κανάλια που συναντώνται στην πράξη είναι τα ενσύρματα ηλεκτρικά (χάλκινα καλώδια σύστροφου ζεύγους ή ομοαξονικά), τα ενσύρματα οπτικά (οπτικές ίνες) και τα ασύρματα (ο ελεύθερος χώρος). Οι αντίστοιχες μεταβαλλόμενες φυσικές ποσότητες είναι η τάση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το καλώδιο και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Άρα το φυσικό μέσο χάρη στις ιδιότητες του οποίου μεταδίδεται η πληροφορία, είναι αντίστοιχα ο ηλεκτρισμός (ηλεκτρόνια), το φως (φωτόνια) και το ηλεκτρομαγνητικό κύμα (φωτόνια).

Κάθε κανάλι μπορεί να μεταδώσει, χωρίς σημαντικές απώλειες ισχύος, σήματα που περιέχουν συχνότητες μόνο εντός ενός συγκεκριμένου εύρους· αυτό είναι το εύρος ζώνης του καναλιού. Αν ο μετασχηματισμός Φουριέ ενός σήματος δείξει ότι αυτό περιέχει συχνότητες εκτός του διαθέσιμου από το κανάλι εύρους ζώνης, τότε μετά την κωδικοποίηση, αλλά πριν τη μετάδοση, απαιτείται το σήμα να υποστεί διαμόρφωση, μία διεργασία που προσαρμόζει κατάλληλα το τελευταίο, ώστε να εμπίπτει στο εύρος ζώνης του καναλιού. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων αυτό γίνεται με το αρχικό σήμα (σήμα βασικής ζώνης) να πολλαπλασιάζεται με ένα δεύτερο, συνεχώς ταλαντούμενο, υψίσυχο ημιτονοειδές σήμα, χωρίς ενσωματωμένη πληροφορία, το φέρον, και με το προκύπτον σήμα (σήμα-RF ή διαμορφωμένο σήμα) να μεταδίδει έτσι τα δεδομένα. Συνήθως η ίδια μέθοδος προσδιορίζει ταυτόχρονα και την κωδικοποίηση και τη διαμόρφωση (αν αυτή απαιτείται), οπότε τα όρια μεταξύ τους είναι δυσδιάκριτα. Οι μέθοδοι αυτές εκτελούνται μέσω ηλεκτρονικών διατάξεων στον πομπό και αντιστρέφονται στον παραλήπτη, επίσης από ηλεκτρονικές διατάξεις. Το διαμορφωμένο σήμα είναι αναλογικό ενώ το σήμα προκύπτει από απλή κωδικοποίηση είναι ψηφιακό (στην πραγματικότητα τα ψηφιακά σήματα προσεγγίζονται από κατάλληλα αναλογικά, καθώς μαθηματικά προκύπτει ότι ένα αυθεντικό ψηφιακό σήμα απαιτεί άπειρο εύρος ζώνης).

Σύμφωνα με τη θεωρία πληροφοριών, η πληροφορία (η ροή bit στις ψηφιακές επικοινωνίες) είναι μέτρο της εντροπίας ενός σήματος, οπότε από όσο περισσότερες συχνότητες αποτελείται ένα σήμα (εύρος ζώνης) τόσο περισσότερη πληροφορία φέρει στον ίδιο χρόνο και άρα τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός με τον οποίον μεταδίδεται η πληροφορία που αυτό περιέχει. Μαθηματικά αυτό προκύπτει από το Θεώρημα του Σάνον. Παράλληλα, κάθε φυσικό μέσο και κανάλι επικοινωνίας έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα (μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέσω αυτού) η οποία εξαρτάται από το δικό του εύρος ζώνης. Επίσης, όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης του καναλιού, τόσα διαφορετικά  $\Delta f$  μπορούν να περάσουν παράλληλα, με κάποια μέθοδο πολυπλεξίας συχνότητας ή χρόνου, οπότε τόσα περισσότερα διαφορετικά σήματα μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα από το κανάλι. Το εύρος ζώνης ενός σήματος συνήθως εξαρτάται άμεσα από τη μέγιστη συχνότητα που περιέχεται σε αυτό και η οποία καθορίζει πόσο «πυκνά» είναι τοποθετημένα τα σύμβολα στην κυματομορφή: όσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη συχνότητα ενός σήματος, τόσο ταχύτερα αυτό δύναται να μεταβάλλεται και άρα τόσο λιγότερο χρόνο «καταλαμβάνει» η μετάδοση ενός συμβόλου σε αυτό, άρα τόσο μεγαλύτερα είναι και το εύρος ζώνης και ο ρυθμός μετάδοσης του σήματος. Τα αδιαμόρφωτα ψηφιακά σήματα έχουν όλα περίπου το ίδιο εύρος ζώνης, αν και σε κάθε σήμα η ισχύς κατανέμεται διαφορετικά στις διάφορες συχνότητες, και οι διάφορες μέθοδοι κωδικοποίησης το προσαρμόζουν κατάλληλα στο εκάστοτε κανάλι, ώστε η μετάδοση να εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν καλύτερα το διαθέσιμο εύρος ζώνης (και άρα τον διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης) του τελευταίου.



## 1.4 Μοντέλο αναφοράς OSI

Στα δίκτυα υπολογιστών η αποστολή και η λήψη δεδομένων γίνεται σε βήματα, όπου διαδοχικά επίπεδα επεξεργασίας παρεμβάλλονται στα υπό εξέταση τηλεπικοινωνιακά δεδομένα και εκτελούν ανάλογες λειτουργίες. Το σύνολο κανόνων στο οποίο υπακούν αυτές οι λειτουργίες, καθώς και η προτυποποιημένη μορφή των δεδομένων που υφίστανται επεξεργασία σε κάθε επίπεδο, ονομάζεται πρωτόκολλο επικοινωνίας του αντίστοιχου επιπέδου. Τα πρωτόκολλα αυτά σχηματίζουν μία "στοίβα" η οποία χαρακτηρίζει επακριβώς τον τύπο και τον τρόπο επικοινωνίας. Ακολουθεί η συνηθέστερη κατηγοριοποίηση επιπέδων από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο της στοίβας:

- Φυσικό επίπεδο (physical layer)
- Επίπεδο ζεύξης δεδομένων (data link layer)
  - Υποεπίπεδο MAC (ελέγχου πρόσβασης μέσου)
  - Υποεπίπεδο LLC (ελέγχου λογικής ζεύξης)
- Επίπεδο δικτύου (network layer)
- Επίπεδο μεταφοράς (transport layer)
- Επίπεδο εφαρμογών (application layer)

Μία εφαρμογή συλλέγει τα δεδομένα, τα οποία επιθυμεί να αποστείλει στο δίκτυο, σύμφωνα με κάποιο πρωτόκολλο εφαρμογών, το οποίο εξαρτάται από αυτήν. Το πρωτόκολλο αυτό προδιαγράφει τι επιπλέον στοιχεία προστίθενται στα υπό εξέταση δεδομένα προκειμένου να υποστηριχθούν κάποιες λειτουργίες (π. χ. κάποιου είδους "ετικέτες" ώστε να γίνει κατανοητή από τον παραλήπτη η φύση των δεδομένων). Έτσι, σχηματίζεται ένα πακέτο επιπέδου εφαρμογών το οποίο προωθείται στον πυρήνα του λειτουργικό σύστημα, όπου είναι υλοποιημένο το επίπεδο μεταφοράς, σύμφωνα με κάποιο χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο μεταφοράς. Το επίπεδο μεταφοράς προσθέτει τα δικά του στοιχεία (την "κεφαλίδα" του), προκειμένου να υποστηριχθούν οι επιπλέον δικές του λειτουργίες, και το τελικό πακέτο προωθείται στο επίπεδο δικτύου. Το επίπεδο δικτύου προσθέτει επίσης τη δική του κεφαλίδα και προωθεί το άθροισμα, το πακέτο επιπέδου δικτύου, στο υποεπίπεδο LLC. Το τελευταίο διασπά το πακέτο σε πλαίσια LLC και, όταν ο αποστολέας λαμβάνει τον έλεγχο του καναλιού, (π.χ. όταν του δίνεται δικαίωμα εκπομπής σε ένα Ethernet LAN ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι του τοπικού δικτύου εξαναγκάζονται σε αναμονή μέχρι να τελειώσει) μέσω των λειτουργιών που ορίζονται στο υποεπίπεδο MAC, προβαίνει σε αποστολή των πλαισίων LLC σύμφωνα με τους κανόνες του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου φυσικού επιπέδου. Οι

κανόνες αυτοί ορίζουν τον τρόπο κωδικοποίησης σε κάποιο φυσικό μέσο, τον τυχόν τρόπο διαμόρφωσης και τον τρόπο μετάδοσης.

Αυτή η πολύπλοκη διαστρωμάτωση είναι απαραίτητη λόγω των διαφορετικών υπηρεσιών που παρέχει κάθε επίπεδο. Το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων, από κοινού, ουσιαστικά επιτυγχάνουν την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων στο ίδιο φυσικό μέσο (π.χ. σε ένα τοπικό δίκτυο ή σε σύνδεση από σημείο σε σημείο) και υλοποιούνται σε υλικό με τη βοήθεια μόνο μίας κάρτας δικτύου. Το επίπεδο δικτύου προδιαγράφει τη δρομολόγηση πακέτων διαμέσου διαφορετικών αλληλοσυνδεδεμένων δικτύων ("διαδίκτυο"). Προφανώς, το επίπεδο δικτύου απαιτεί κοινό υποεπίπεδο LLC σε όλα τα επιμέρους δίκτυα, ώστε τα εκπεμπόμενα πλαίσια να είναι κατανοητά από όλα τα τελευταία, ενώ επιτρέπει την αποστολή δεδομένων κατά μήκος μεγάλων γεωγραφικών αποστάσεων. Το επίπεδο μεταφοράς παρέχει μία αφαίρεση επικοινωνίας από άκρο σε άκρο, σαν να μη μεσολαβεί ένα πλήθος ενδιάμεσων δικτύων και η διαδικασία της δρομολόγησης, ενώ το επίπεδο εφαρμογών ορίζει τα πραγματικά δεδομένα και τις πραγματικές υπηρεσίες που παρέχονται απευθείας στον χρήστη.

## 1.5 Ασύρματη μετάδοση

Ραδιοκύματα ονομάζονται οι χαμηλές συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που εκτείνονται περίπου από τα 3 KHz ως τα 300 GHz. Οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες γίνονται συνήθως με ραδιοκύματα ευρείας εκπομπής (από τα 30 MHz ως το 1 GHz), ή μικροκύματα (από τα 2 GHz ως τα 40 GHz). Τα ραδιοκύματα χαμηλότερων συχνοτήτων γενικά εξασθενούν σχετικά γρήγορα, αφού συγκριτικά μεταφέρουν λίγη ενέργεια, αλλά έχουν την ικανότητα να διαπερνούν τα φυσικά εμπόδια. Τα κύματα υψηλότερων συχνοτήτων διαδίδονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις, αλλά ανακλώνται ευκολότερα από φυσικά εμπόδια. Επίσης, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα ενός κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η κατευθυντικότητα του (μπορεί δηλαδή να εκπεμφθεί σε μία σχετικά στενή δέσμη αντί προς πάσα κατεύθυνση). Έτσι, μιλώντας γενικά, τα μικροκύματα είναι κατευθυντικά ενώ τα ραδιοκύματα ευρείας εκπομπής όχι.

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τρόποι διάδοσης κυμάτων για τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες:

- Διάδοση εδάφους (Ground-Wave Propagation)

Χαμηλές συχνότητες (ως 2 MHz), που όμως ακολουθούν την κυρτή επιφάνεια της Γης λόγω διάθλασης τους από την ατμόσφαιρα, κι έτσι καλύπτουν ικανοποιητικές αποστάσεις. Έχουν το μειονέκτημα της ταχείας εξασθένησης.

- Ατμοσφαιρική διάδοση (Sky-Wave Propagation)

Υψηλών συχνοτήτων, δεν εξασθενεί η ισχύς τους εύκολα, μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω διαδοχικών ανακλάσεων τους από την ιονόσφαιρα στο έδαφος και τανάπαλιν - ώσπου να φτάσουν στον παραλήπτη.

- Διάδοση Γραμμής Όρασης (Line-Of-Sight Propagation)

Πολύ μεγάλες συχνότητες, που δεν ανακλώνται από τις επιφάνειες. Οι κεραίες βρίσκονται σε οπτική επαφή και το κύμα εκπέμπεται κατευθυνόμενο από τη μία στην άλλη. Πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η διάθλαση λόγω της ατμόσφαιρας και, έτσι, αυτός ο τρόπος αποδίδει καλύτερα για επικοινωνίες μακριά από την επιφάνεια της γης.

- Ανάκλαση εδάφους δύο ακτίνων (Two-Ray Ground Reflection)

Η διάδοση από τον πομπό στο δέκτη γίνεται με δύο συνιστώσες: Απευθείας μετάδοση μέσω οπτικής επαφής και έμμεση λήψη μετά από ανάκλαση στο έδαφος. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που η επικοινωνία γίνεται σε μικρή απόσταση και κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (π. χ. ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών).

Η ασύρματη μετάδοση εμπεριέχει διάφορους παράγοντες, που δημιουργούν προβλήματα στην επικοινωνία: η κατάσταση της ατμόσφαιρας και η διάθλαση επηρεάζουν το σήμα, η μεγάλη απόσταση εξασθενεί την ισχύ του σήματος κλπ. Όλοι αυτοί οι παράγοντες (απώλειες ελεύθερου χώρου) επιδρούν διαφορετικά σε σήματα διαφορετικών συχνοτήτων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται στρέβλωση και πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν όταν μεταδίδονται σήματα που εμπεριέχουν διαφορετικές συχνότητες. Ό,τι δεν ανήκει στην προς μετάδοση πληροφορία ονομάζεται θόρυβος και είναι είτε θερμικός (προκαλείται από τις κεραίες, εξαρτάται από τη θερμοκρασία και δεν μπορεί να εξαλειφθεί), είτε από εξωτερικές πηγές (εκπομπές που προκαλούνται ακούσια από διάφορες ηλεκτρικές συσκευές λόγω κατασκευαστικών ατελειών), είτε από παρεμβολές άλλων εκπομπών σε επικαλυπτόμενες συχνότητες. Ο θόρυβος είναι εξίσου σημαντική επιβάρυνση στην επικοινωνία, με τις απώλειες ελεύθερου χώρου.

Ένα άλλο φαινόμενο που ενυπάρχει στην ασύρματη μετάδοση και επιβαρύνει την επικοινωνία είναι οι πολλαπλές οδεύσεις, που οφείλονται στην ανάκλαση, διάθλαση και σκέδαση του σήματος κατά τη διάδοση του και έχουν ως αποτέλεσμα ένα σήμα να φτάνει στον αποδέκτη πολλές φορές, ή σε δόσεις, με χρονική διαφορά και διαφορετικά σήματα να φτάνουν την ίδια χρονική στιγμή παρεμβαλλόμενα το ένα στο άλλο. Το φαινόμενο όμως που δημιουργεί τα περισσότερα προβλήματα είναι οι διαλείψεις, η απότομη μεταβολή του πλάτους του σήματος, οι οποίες διαχωρίζονται σε υψίσυχνες και αργές, ενώ αντιμετωπίζονται με κάποιες τεχνικές που εκμεταλλεύονται τις πολλαπλές οδεύσεις.

## 1.6 IEEE 802.11

Το IEEE 802.11 είναι μια οικογένεια προτύπων της IEEE για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) που είχαν ως σκοπό να επεκτείνουν το 802.3 (Ethernet, το συνηθέστερο πρωτόκολλο ενσύρματης δικτύωσης υπολογιστών) στην ασύρματη περιοχή. Τα πρότυπα 802.11 είναι ευρύτερα γνωστά ως «WiFi» επειδή η WiFi Alliance, ένας οργανισμός ανεξάρτητος της IEEE, παρέχει την πιστοποίηση για τα προϊόντα που εμπίπτουν στις προδιαγραφές του 802.11. Αυτή η οικογένεια πρωτοκόλλων αποτελεί το καθιερωμένο πρότυπο της βιομηχανίας στο χώρο των ασύρματων τοπικών δικτύων.

Η ονομασία WiFi χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις συσκευές WLAN που βασίζονται στην προδιαγραφή IEEE 802.11 b/g/n και εκπέμπουν σε συχνότητες 2.4GHz. Ωστόσο το WiFi έχει επικρατήσει και ως όρος αναφερόμενος συνολικά στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Συνήθεις εφαρμογές του είναι η παροχή ασύρματων δυνατοτήτων πρόσβασης στο Internet, τηλεφωνίας μέσω διαδικτύου (VoIP) και διασύνδεσης μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών όπως τηλεοράσεις, ψηφιακές κάμερες, DVD Player και ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές το 802.11 βρίσκει εφαρμογές ασύρματης μετάδοσης, όπως π.χ. στη μεταφορά φωτογραφιών από ψηφιακές κάμερες σε υπολογιστές για περαιτέρω επεξεργασία και εκτύπωση, αν και σε αυτόν τον τομέα έχει υποσκελιστεί από το πρωτόκολλο Bluetooth για τα πολύ μικρότερης εμβέλειας ασύρματα προσωπικά δίκτυα.

Η πρώτη έκδοση του WiFi εισήχθη το 1997 και στο φυσικό επίπεδο περιελάμβανε δύο μεθόδους διασποράς φάσματος για τη μετάδοση στη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz, η εκπομπή στην οποία δεν απαιτεί άδεια. Η πρώτη μέθοδος λειτουργούσε με Frequency Hopping (FHSS) και υποστήριζε ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps, ενώ η δεύτερη λειτουργούσε με Direct Sequence (DSSS) και υποστήριζε ρυθμό μετάδοσης 1-2 Mbps. Περιλαμβανόταν επίσης και μία υπέρυθρη εκδοχή (IR). Πριν από την εμφάνιση του 802.11 δεν υπήρχε κάποιο ευρέως αποδεκτό πρότυπο για ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών, ούτε ανάλογες εμπορικές εφαρμογές, καθώς η τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης δεν ήταν ακόμα αρκετά ώριμη.

Το 1999 το 802.11b ώθησε την ταχύτητα στα 11 Mbps χρησιμοποιώντας DSSS. Οι ρυθμοί λειτουργίας 1-2 Mbps με DSSS ισχύουν ακόμα, έτσι ώστε οι συσκευές να μπορούν να πέσουν σε χαμηλότερες ταχύτητες για να διατηρήσουν μια σύνδεση όταν τα σήματα είναι αδύνατα. Με την έκδοση αυτή ο όρος WiFi άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως και οι ασύρματες κάρτες δικτύου 802.11 να εξαπλώνονται ταχέως.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μετάδοσης Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), δύο πρότυπα υψηλής ταχύτητας ακολούθησαν το 802.11b τα οποία παρέχουν μέχρι 54 Mbps: το 802.11a εκπέμπει στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz αλλά δεν είναι συμβατό με τις ασύρματες κάρτες δικτύου οι οποίες υποστηρίζουν

802.11b, ενώ το 802.11g εκπέμπει στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz και είναι συμβατό με το 802.11b. Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών εξοπλισμένων με κάρτες 802.11b και 802.11g γίνεται στην υψηλότερη δυνατή κοινή ταχύτητα, αυτήν του 802.11b.

Με τη διάδοση του WiFi κατά τις αρχές της δεκαετίας του 2000 εμφανίστηκε μία νέα μέθοδος πρόσβασης στο Internet: μία ψηφιακή συσκευή με κάρτα ασύρματης δικτύωσης WiFi, π.χ. ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής ή ένα PDA, μπορεί να συνδεθεί στο Διαδίκτυο όταν βρίσκεται σε ακτίνα κάλυψης ασύρματου δικτύου ήδη συνδεδεμένου στο Internet, το οποίο ονομάζεται σημείο πρόσβασης (Access Point). Μία περιοχή που καλύπτεται από ένα ή περισσότερα σημεία πρόσβασης συνδεδεμένα μεταξύ τους λέγεται hotspot. Ένα hotspot μπορεί να καλύπτει έναν χώρο έκτασης δωματίου ή και πολλών τετραγωνικών μέτρων, με εναλλασσόμενα σημεία πρόσβασης.

Έτσι η τεχνολογία WiFi επιτρέπει τη σύνδεση μεταξύ δύο συσκευών μεταξύ τους, τη σύνδεση ενός προσωπικού υπολογιστή με ένα τοπικό δίκτυο και άλλους υπολογιστές και, στη συνέχεια, μέσω αυτών στο Internet. Ένας φορητός υπολογιστής μπορεί να συνδεθεί οπουδήποτε υπάρχει σημείο πρόσβασης (π.χ. σε πάρκα ή πλατείες μεγάλων πόλεων, καφετέριες, βιβλιοθήκες κλπ).

## 1.7 Ευρυζωνικότητα

Ως ευρυζωνικότητα ορίζεται το προηγμένο, εφικτό και καινοτόμο από πολιτική, κοινωνική, οικονομική και τεχνολογική άποψη περιβάλλον, αποτελούμενο από:

Παροχή γρήγορων συνδέσεων στο Διαδίκτυο σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού, με ανταγωνιστικές τιμές (με τη μορφή καταναλωτικού αγαθού), χωρίς εγγενείς περιορισμούς στα συστήματα μετάδοσης και τον τερματικό εξοπλισμό των επικοινωνούντων άκρων.

Κατάλληλη δικτυακή υποδομή που: α) επιτρέπει την κατανομημένη ανάπτυξη υπαρχόντων και μελλοντικών δικτυακών εφαρμογών και πληροφοριακών υπηρεσιών, β) δίνει τη δυνατότητα αδιάλειπτης σύνδεσης των χρηστών σε αυτές γ) ικανοποιεί τις εκάστοτε ανάγκες των εφαρμογών σε εύρος ζώνης, αναδραστικότητα και διαθεσιμότητα, και δ) είναι ικανή να αναβαθμίζεται συνεχώς και με μικρό επιπλέον κόστος ώστε να εξακολουθεί να ικανοποιεί τις ανάγκες όπως αυτές αυξάνουν και μετεξελίσσονται με ρυθμό και κόστος που επιτάσσονται από την πρόοδο της πληροφορικής και της τεχνολογίας επικοινωνιών.

Τη δυνατότητα του πολίτη να επιλέγει α) ανάμεσα σε εναλλακτικές προσφορές σύνδεσης που ταιριάζουν στον εξοπλισμό του, β) μεταξύ διαφόρων δικτυακών εφαρμογών και γ) μεταξύ διαφόρων υπηρεσιών πληροφόρησης και ψυχαγωγίας και με

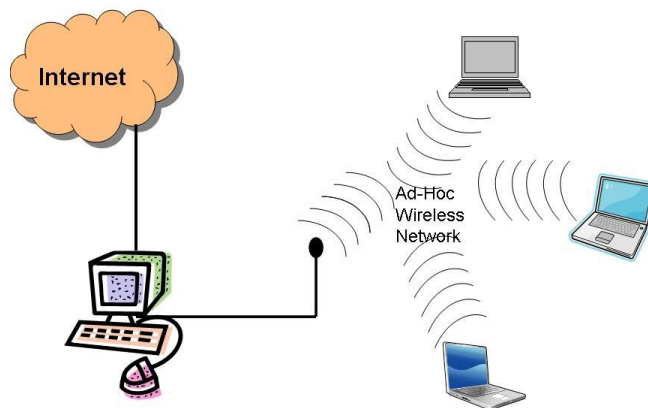
πιθανή συμμετοχή του ίδιου του πολίτη στην παροχή περιεχομένου, εφαρμογών και υπηρεσιών.

Το κατάλληλο ρυθμιστικό πλαίσιο αποτελούμενο από πολιτικές, μέτρα, πρωτοβουλίες, άμεσες και έμμεσες παρεμβάσεις, αναγκαίες για την ενδυνάμωση της καινοτομίας, την προστασία του ανταγωνισμού και την εγγύηση της σοβαρής ισορροπημένης οικονομικής ανάπτυξης ικανής να προέλθει από τη γενικευμένη συμμετοχή στην ευρυζωνικότητα.

## **1.8 Αδόμητα Ασύρματα Δίκτυα**

Από όταν πρωτοεμφανίστηκαν τα ασύρματα δίκτυα, γνώρισαν τεράστια αποδοχή από τον κόσμο των τηλεπικοινωνιών. Γεγονός που έγινε ιδιαίτερα αντιληπτό την προηγούμενη δεκαετία, κατά την οποία τα ασύρματα δίκτυα μπόρεσαν να υποστηρίξουν και την κινητικότητα των κόμβων τους. Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των ad hoc δικτύων συγκεντρώνει συνεχώς το αυξανόμενο ενδιαφέρον των ερευνητών και θεωρείται ως τεχνολογία αιχμής στον τομέα των ασυρμάτων δικτύων. Τα ad hoc δίκτυα κατηγοριοποιούνται σε δύο διαφορετικά είδη, τα σταθερά ασύρματα (fixed wireless) και τα κινητά ασύρματα (mobile wireless) δίκτυα. Τα σταθερά ασύρματα δίκτυα είναι δίκτυα στα οποία τα κινητά τερματικά συνδέονται με συγκεκριμένα γνωστά και σταθερά σημεία πρόσβασης που βρίσκονται εντός συγκεκριμένης ακτίνας. Καθώς λοιπόν το τερματικό μετακινείται προσπαθεί να βρει κάθε φορά ένα άλλο σταθερό σημείο στο οποίο θα έχει πρόσβαση με καλύτερη απόδοση και να συνδεθεί με αυτό.

Τα αδόμητα ασύρματα δίκτυα (ad-hoc networks) αποτελούνται από κόμβους που συνδέονται δυναμικά μεταξύ τους μέσω ασυρμάτων συνδέσεων. Χαρακτηριστικό των αδόμητων δικτύων είναι ότι δεν υποθέτουν την ύπαρξη κάποιας σταθερής υποδομής, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα δίκτυα που απαιτούν αυτή την υποδομή με τη μορφή των σταθμών βάσης. Οι κόμβοι ενός αδόμητου δικτύου μπορεί να είναι κινητοί ή σταθεροί και να έχουν σταθερή ή μεταβαλλόμενη ακτίνα μετάδοσης. Συνήθως οι κόμβοι ασκούν ενεργό ρόλο κατά τη δρομολόγηση προωθώντας, εκτός από τα δικά τους πακέτα και τα πακέτα άλλων κόμβων. Αυτό συμβαίνει επειδή η αφετηρία και ο προορισμός των πακέτων, συνήθως δεν βρίσκονται εντός της ακτίνας μετάδοσης ο ένας του άλλου και επομένως απαιτούνται πολλαπλές μεταδόσεις μέχρι να φτάσει ένα πακέτο στον προορισμό του.



Εικόνα 2: Ασύρματο Ad Hoc δίκτυο

Ένα ασύρματο ad hoc δίκτυο αποτελείται από έναν αριθμό κινητών κόμβων που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασυρμάτων μεταδόσεων. Σε αυτού του είδους τα δίκτυα, οι κόμβοι είναι σε θέση να σχηματίζουν δίκτυο χωρίς την ύπαρξη κεντρικής υποδομής και οργάνωσης. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των κινητών ασυρμάτων κόμβων ενός ad hoc δικτύου είναι η δυνατότητα να εκτελούν εργασίες ανεξάρτητα και ακολούθως να επικοινωνούν προκειμένου να συγχωνεύσουν τα αποτελέσματά τους, για να επιτελέσουν λειτουργίες υψηλότερης πολυπλοκότητας. Για αυτό το λόγο, τα ad hoc δίκτυα είναι ιδανικά για την εκτέλεση κατανεμημένων λειτουργιών με έξυπνο και αποδοτικό τρόπο. Βέβαια η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για πιο σύνθετες λειτουργίες από την πλευρά των ad hoc συσκευών, οδηγεί τους κατασκευαστές να συμπεριλάβουν στις συσκευές τους πιο απαιτητικό υλικό και λογισμικό. Το κλειδί της επιτυχίας αυτών των συσκευών είναι στην παροχή μεγαλύτερης αυτονομίας και ευελιξίας, ενώ η διάρκεια ζωής μιας συσκευής για ένα κύκλο φόρτισης είναι πολύ σημαντική στα σημερινά ad hoc δίκτυα, διότι θα διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα.

Τα ad hoc δίκτυα είναι ασύρματα δίκτυα πολλαπλών βημάτων (multihop), όπου όλοι οι κόμβοι βοηθούν για τη διατήρηση της διασυνδεσιμότητας του δικτύου. Η απουσία κάποιου κεντρικού διαχειριστή ή συντονιστή δικτύου ή κυκλοφορίας, επιτρέπει στον κάθε σταθμό να μπορεί να αποστείλει πληροφορία σε οποιοδήποτε άλλον σταθμό άμεσα, είτε ο παραλήπτης βρίσκεται εντός της εμβέλειας του, είτε βρίσκεται εκτός. Ο μόνος προβληματισμός είναι ότι πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο και αποδοτικό μονοπάτι που θα αποτελείται από τους κόμβους, τους οποίους θα περάσει το μήνυμα προκειμένου να φτάσει στον παραλήπτη. Για να συμβεί αυτό, προϋποτίθεται ότι όλοι οι σταθμοί είναι ισοδύναμοι και διαθέτουν τα ίδια χαρακτηριστικά δικτύωσης, ενώ επιτελούν ίδιες λειτουργίες όταν πρόκειται για αποστολές, λήψεις ή προωθήσεις πακέτων πληροφορίας.

Εφόσον δεν υπάρχει δικτυακή υποδομή, κάθε κόμβος λειτουργεί, τόσο ως δρομολογητής όσο και ως οικοδεσπότης (host). Σημαίνοντας ότι, αν ένας κόμβος θελήσει να συνδεθεί με κάποια συσκευή σε μεγάλη απόσταση, όπου η σύνδεση δεν είναι ενός βήματος (single-hop), τότε αναγκαστικά οι δύο κόμβοι συνδέονται μέσω διαδρομής πολλαπλών βημάτων (multi-hopping). Έτσι κάθε κόμβος συμμετέχει στη διαδικασία της δρομολόγησης προωθώντας πακέτα προς τον κόμβο-προορισμό.

Όπως αναφέρθηκε, τα ad hoc δίκτυα μπορούν να βρουν εφαρμογή οπουδήποτε υπάρχει ελλιπής ή καθόλου υποδομή, με βασικό τους πλεονέκτημα τη δυνατότητα να προστίθενται και να αφαιρούνται κόμβοι ελεύθερα δίχως να δημιουργούνται προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου. Οι εφαρμογές που μπορεί να βρει ένα ad hoc δίκτυο είναι ποικίλες και εκτείνονται από μεγάλης κλίμακας κινητά, ιδιαίτερος δυναμικά δίκτυα, έως μικρά στατικά δίκτυα που περιορίζονται από τη χρήση ενέργειας. Η συνήθης χρήση όπου απαντώνται κυρίως, είναι σε στρατιωτικές εφαρμογές, σε ασύρματες προσωπικές επικοινωνίες διασυνδέοντας φορητές συσκευές, σε δίκτυα αισθητήρων, σε οικιακές εφαρμογές και εφαρμογές πλέγματος (home and mesh networks) καθώς και σε διαχείριση κρίσεων, όπου το προσωπικό άμεσης ανάγκης θα είναι σε θέση να κατασκευάσει σε πολύ λίγο χρόνο ένα δικό του δίκτυο επικοινωνίας.

Το κύριο χαρακτηριστικό των ad hoc δικτύων, αλλά και ταυτόχρονα η διαφορά από τα υπόλοιπα ασύρματα δίκτυα, είναι πως δε στηρίζονται σε υπάρχουσα δικτυακή υποδομή. Σε θέματα δρομολόγησης και σε θέματα διαχείρισης, παρατηρείται μια αυτοοργάνωση και αυτοδιαχείριση του δικτύου από τους ίδιους τους κόμβους του. Η κύρια διαφοροποίηση των ασυρμάτων ad hoc δικτύων σε σχέση με τα συνηθισμένα ασύρματα δίκτυα εστιάζεται στην αυτοδιάρθρωση, στην ασφάλεια, στην κινητικότητα, στην κλιμάκωση και στη μετάδοση πολλαπλών αλμάτων.

Αρχικά, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η αυτοδιάρθρωση ενός ad hoc δικτύου έγκειται στο ότι πρέπει να έχει τη δυνατότητα να καθορίζει αυτόνομα τα χαρακτηριστικά της διάρθρωσής του όπως την διευθυνσιοδότηση, τη δρομολόγηση, τη δημιουργία ομάδων, τον έλεγχο ισχύος κ.ά. Σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατόν να υπάρχουν ειδικοί κόμβοι στους οποίους να ανατίθενται κάποιες αρμοδιότητες ελέγχου. Η επιλογή των κόμβων αυτών θα πρέπει να γίνεται αυτόνομα από το δίκτυο, όπως αυτόνομα θα πρέπει να λαμβάνονται και τα μέτρα που απαιτούνται όταν αυτοί αποσυνδέονται από ένα δίκτυο.

Στον τομέα της ασφάλειας, τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα ad hoc δίκτυα είναι παρόμοια με τα υπόλοιπα ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούνται μέχρι στιγμής. Εν τούτοις όμως, τα ad hoc δίκτυα έχει παρατηρηθεί ότι είναι περισσότερο ευάλωτα από ότι τα δίκτυα με υποδομή και για αυτόν το λόγο απαιτούνται εξελιγμένες μέθοδοι και τεχνικές για να αντιμετωπιστούν οι επιθέσεις που μπορεί να δεχθούν.



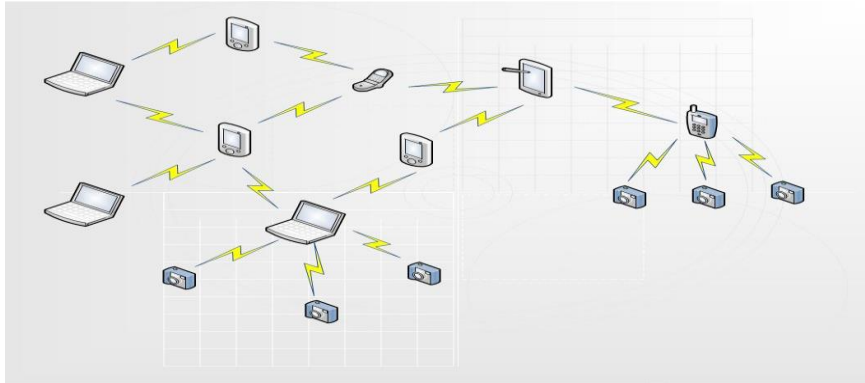
Η κινητικότητα σχετίζεται με το γεγονός ότι οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να κινούνται ελεύθερα, καθώς αυτό αποτελεί τον κύριο λόγο ύπαρξης των ad hoc δικτύων. Η κίνηση των κόμβων μπορεί να έχει πολλά χαρακτηριστικά, ανάλογα με το περιβάλλον που το δίκτυο καλείται να λειτουργήσει. Έτσι, είναι δυνατό να υπάρχει ατομική τυχαία κίνηση, ομαδική κίνηση, κίνηση μέσω προδιαγεγραμμένων οδών. Η κινητικότητα των κόμβων προκαλεί δυναμική αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου. Αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου προκαλούνται και από τη μικρή διάρκεια της συμμετοχής στο δίκτυο κάποιων κόμβων, που συμμετέχουν μόνο κατά τη διάρκεια της συνόδου τους. Το μοντέλο κινητικότητας των κόμβων μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην επιλογή των προδιαγραφών του δικτύου.

Η κλιμάκωση ενός ad hoc δικτύου μαζί με την κινητικότητα, είναι τα δύο χαρακτηριστικά που δημιουργούν τα μεγαλύτερα προβλήματα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ιεραρχικές δομές που χρησιμοποιούνται στα σταθερά δίκτυα για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της κλιμάκωσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στα ad hoc δίκτυα. Για αυτό το λόγο, πρέπει να βρεθούν νέες μέθοδοι που να του επιτρέπουν να αυξάνεται σε μεγάλα μεγέθη.

Το πέμπτο χαρακτηριστικό είναι ότι ένα ad hoc δίκτυο είναι ένα δίκτυο πολλών αλμάτων, όπου η διαδρομή από την πηγή της πληροφορίας προς τον προορισμό περνάει μέσα από πολλούς ενδιάμεσους κόμβους. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς η εμβέλεια των ασύρματων μέσων είναι συνήθως αρκετά περιορισμένη. Ας μην ξεχνάμε ότι οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα μοναδικού τρόπου κίνησης που μπορεί να είναι διαφορετικός, ανάλογα το κινητό αδόμητο δίκτυο (mobile ad hoc network-MANET ή vehicular ad hoc network-VANET) ή τον κόμβο.

## **1.9 MANETs**

Ένα MANET είναι ένα σύνολο απο κινητούς κόμβους που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματων συνδέσεων άμεσα ή έμμεσα χρησιμοποιώντας άλλους κόμβους για τη δρομολόγηση. Η λειτουργία των MANET δε βασίζεται σε προϋπάρχουσα υποδομή δικτύου ή σταθμούς βάσης. Οι κόμβοι στα MANET είναι ελεύθεροι να κινηθούν τυχαία.

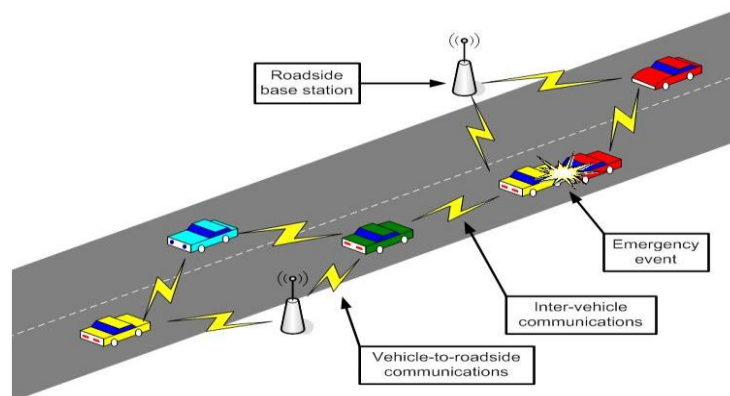


Εικόνα 3: Σχεδιάγραμμα ενός MANET

Ως εκ τούτου, η τοπολογία ενός MANET μπορεί να αλλάξει ραγδαία και απρόβλεπτα. Όλες οι λειτουργίες του δικτύου, όπως η εύρεση της τοπολογίας και η παράδοση των πακέτων δεδομένων πρέπει να γίνει από τους ίδιους τους κόμβους είτε μεμονομένα είτε συγκεντρωτικά.

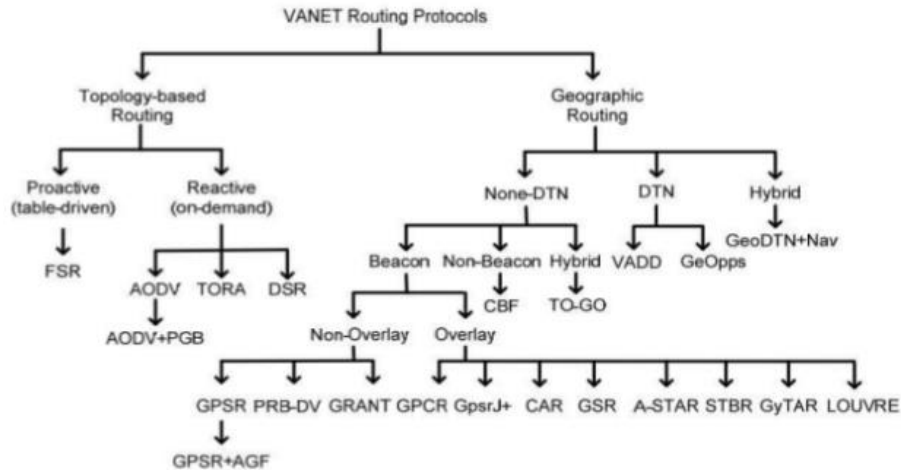
## 1.10 VANETs

Τα VANETs (Vehicular Ad-Hoc Networks) είναι ένας τύπος δικτύων που χρησιμοποιούν τα εν κινήσει οχήματα ως κόμβους, για να δημιουργήσουν ένα κινητό δίκτυο. Ένα VANET μετατρέπει κάθε συμμετέχον όχημα σε έναν ασύρματο δρομολογητή ή κόμβο επιτρέποντας σε οχήματα που απέχουν 100-300 μέτρα μεταξύ τους, να επικοινωνήσουν και να δημιουργήσουν ένα δίκτυο ευρείας κλίμακας. Όταν κάποια οχήματα βγαίνουν εκτός εμβέλειας του δικτύου και αποσυνδέονται, άλλα οχήματα μπορούν να εισαχθούν στο δίκτυο επεκτείνοντας το εύρος του. (Τα VANETs ανήκουν στην κατηγορία των MANETs).



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση ενός VANET

Στα VANETs υπάρχουν 3 τύποι επικοινωνιών: V2V (Vehicle to Vehicle communication) δηλαδή επικοινωνία μεταξύ οχημάτων, V2R (Vehicle to Road-Side communication) δηλαδή επικοινωνία μεταξύ οχημάτων-υποδομών στον δρόμο, Inter-Vehicle communication δηλαδή επικοινωνία που περιλαμβάνει τους δύο προηγούμενους τύπους και επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ μακρινών σταθμών βάσης μέσω ενδιάμεσων οχημάτων ή και άλλων υποδομών.



Εικόνα 5: Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων σε VANETs

Επιπρόσθετα, η δρομολόγηση στα VANETS χωρίζεται σε διάφορα σχήματα ανάλογα τον τρόπο που προωθείται ένα πακέτο εντός του δικτύου και τη μέθοδο σχηματισμού μονοπατιών προς τους κόμβους προορισμού.

Τα σχήματα μετάδοσης περιγράφονται ως εξής:

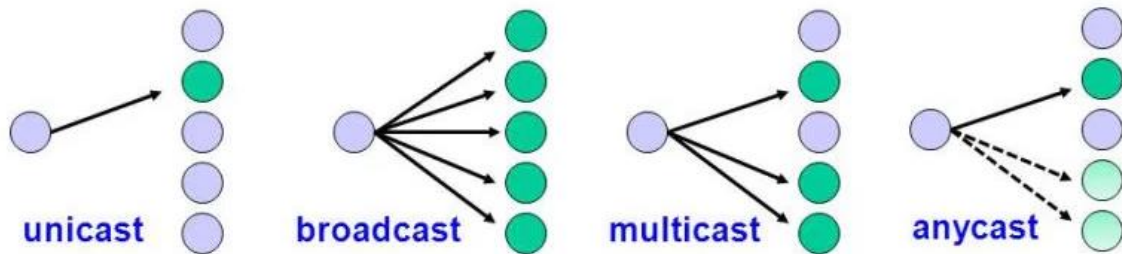
Unicast: Μετάδοση από τον κόμβο πηγή σε μοναδικό κόμβο παραλήπτη

Broadcast: Μετάδοση από τον κόμβο πηγή προς όλους τους κόμβους

Multicast: Μετάδοση από τον κόμβο πηγή προς ένα σύνολο κόμβων

Geocast: Υποπερίπτωση του Multicast όπου η μετάδοση γίνεται προς ένα σύνολο κόμβων σε μια γεωγραφική περιοχή

Anycast: Μετάδοση προς τον καλύτερο προορισμό σύμφωνα με την τοπολογία δρομολόγησης



Εικόνα 6: Σχήματα μετάδοσης δεδομένων

## 1.11 Προσομοιωτές δικτύων

Οι προσομοιωτές δικτύων κατηγοριοποιούνται σε ανοικτού κώδικα και εμπορικούς. Οι προσομοιωτές ανοικτού κώδικα παρέχουν στους χρήστες τον πηγαίο κώδικα ελεύθερα ώστε ο καθένας να μπορεί να συνεισφέρει σε αυτόν ή να τον βελτιώσει. Αυτό το χαρακτηριστικό τους δίνει και τη δυνατότητα να υλοποιούν πιο ταχύτερα νέες τεχνολογίες σε σχέση με τους εμπορικούς. Οι εμπορικοί προσομοιωτές δικτύων δεν παρέχουν τον πηγαίο τους κώδικα στους χρήστες ελεύθερα και είναι συνήθως επι πληρωμή. Ένας τέτοιος προσομοιωτής διαχειρίζεται από την ομάδα που τον ανέπτυξε και μόνο με το πλεονέκτημα ότι διαθέτει συνήθως καλύτερο documentation σε σχέση με τους προσομοιωτές ανοικτού κώδικα.

Τα πειράματα που παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική, έγιναν με χρήση του προσομοιωτή ns-3 [1].

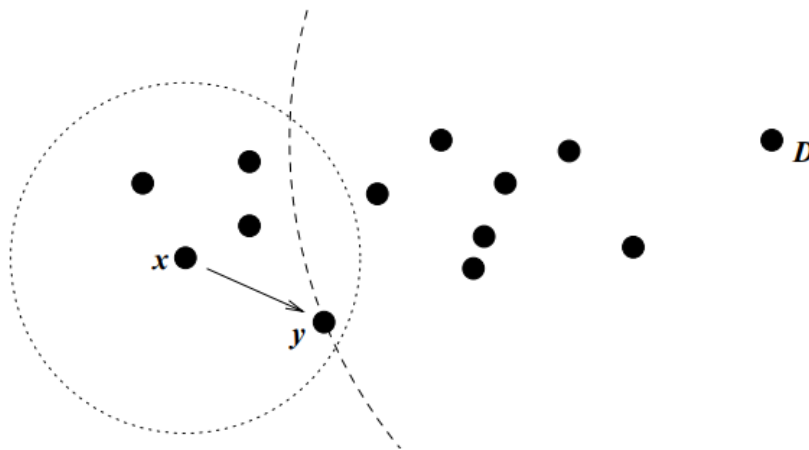
Ο ns-3 είναι ένας (ανοικτού κώδικα) προσομοιωτής δικτύων διακριτών γεγονότων που προορίζεται για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς και διατίθεται δωρεάν και με ανοιχτό κώδικα για έρευνα, ανάπτυξη ή απλή χρήση. Ο πυρήνας του ns-3 έχει υλοποιηθεί σε C++ και είναι χρισμένος ως μια βιβλιοθήκη που μπορεί να συνδεθεί στατικά ή δυναμικά με ένα C++ πρόγραμμα που ορίζει τις παραμέτρους τις προσομοίωσης και την εκτελεί. Ο πυρήνας υποστηρίζει τόσο IP όσο και non-IP δίκτυα και έχει έναν χρονοπρογραμματιστή για την αλληλεπίδραση του προσομοιωτή με πραγματικές συσκευές δικτύου πραγματοποιώντας αποστολή ή λήψη πακέτων που παρήχθησαν από τον ns-3. Στόχος του project ns-3 είναι να παρέχεται ένα λογισμικό που θα είναι καλώς τεκμηριωμένο, εύκολο στη χρήση και την αποσφαλμάτωση και θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες των προσομοιώσεων δικτύου, από τον καθορισμό της προσομοίωσης μέχρι την παραγωγή των αρχείων trace και την ανάλυση τους.

## Κεφάλαιο 2

### Αλγόριθμοι δρομολόγησης

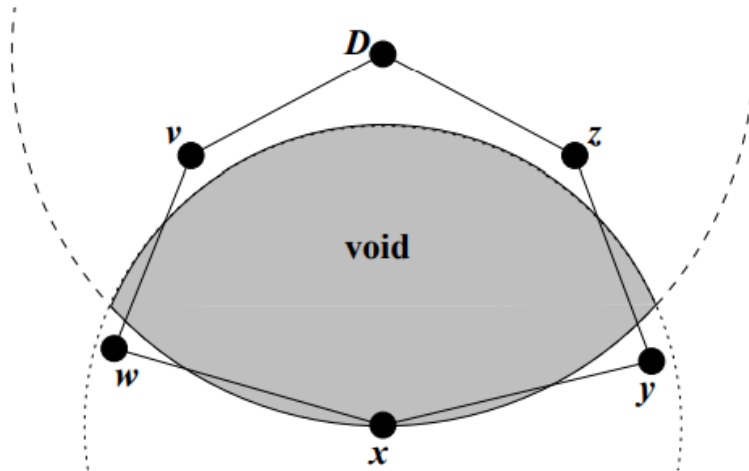
#### 2.1 GPSR [2]

Όλοι οι κόμβοι διατηρούν έναν πίνακα γειτνίασης που έχουν τις διευθύνσεις και τις τοποθεσίες των γειτόνων που βρίσκονται ένα hop μακριά. Ο πίνακας αυτός παρέχει τις πληροφορίες που απαιτούνται για την προώθηση πακέτων από τον GPSR. Πληροφορίες επίσης υπάρχουν και στα ίδια τα πακέτα. Τα πακέτα GPSR διαθέτουν κεφαλίδες με διάφορες πληροφορίες μεταξύ των οποίων και flag που υποδηλώνει το forwarding mode στο οποίο βρίσκεται κάθε πακέτο, greedy ή perimeter. Κάθε πακέτο σημαίνεται αρχικά από την πηγή του σε greedy mode.



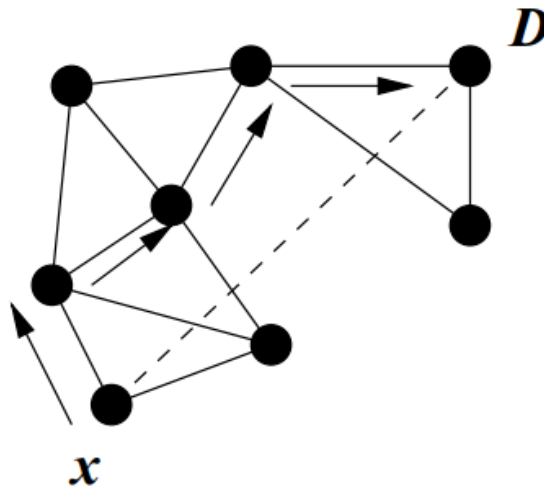
Εικόνα 7: Άπληστη προώθηση στον GPSR

Όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο σε greedy mode για προώθηση, ανατρέχει στον πίνακα γειτνίασης του για να βρει τον γείτονα του που είναι ο κοντινότερος γεωγραφικά στον προορισμό. Αν δε βρεθεί τέτοιος γείτονας τότε ο κόμβος σημαίνει το πακέτο σε perimeter mode.



Εικόνα 8: Τοπικό μέγιστο κατά την προώθηση πακέτου

Χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού, ο GPSR προωθεί πακέτα που βρίσκονται σε perimeter mode πάνω στο γράφημα του οδικού δικτύου δρομολογώντας τα σε όλο και πιο κοντινά σημεία προς τον προορισμό. Όταν ένα πακέτο μπαίνει σε perimeter mode ο GPSR αποθηκεύει σε αυτό την τοποθεσία  $L_p$  στην οποία η άπληστη προώθηση απέτυχε.



Εικόνα 9: Perimeter mode στον GPSR

Αυτή η τοποθεσία χρησιμοποιείται σε διαδοχικά hops για να προσδιοριστεί αν το πακέτο μπορεί να επανέλθει σε greedy mode. Όταν ένας κόμβος στον GPSR παραλάβει ένα

perimeter mode πακέτο για προώθηση συγκρίνει την τοποθεσία  $L_p$  με την τοποθεσία του και επαναφέρει το πακέτο σε greedy mode αν η απόσταση του κόμβου ως το  $D$  είναι μικρότερη από την  $L_p$  στο  $D$ . Όταν ένα πακέτο δε δύναται να φτάσει στον προορισμό  $D$ , τότε ο GPSR ανιχνεύει την αδυναμία αυτή και απορρίπτει το πακέτο. Ο GPSR επιτυγχάνει ένα πολύ καλό ποσοστό επιτυχίας στην παράδοση πακέτων (εως 94%), ενώ αποδίδει καλύτερα από άλλα πρωτόκολλα (DSR) όταν το πλήθος των κόμβων αυξάνεται.

## 2.2 A-STAR [3]

Ο A-STAR λαμβάνει υπ' όψιν τις δυσκολίες που παρουσιάζονται σε ένα αστικό περιβάλλον. Υιοθετεί την anchor-based προσέγγιση δρομολόγησης με παράλληλη γνώση των οδικών συνθηκών. Η γνώση αυτή αφορά τον καθορισμό της διαδρομής με χρήση οδικών χαρτών και την αλληλουχία των διασταυρώσεων που πρέπει να ακολουθήσει το πακέτο που αποστέλλεται ώστε να φτάσει στον προορισμό του. Ο A-STAR, σε αντίθεση με άλλα πρωτόκολλα, αποφασίζει τη διαδρομή που θα ακολουθήσει ένα πακέτο με παράλληλη γνώση στοιχείων που αφορούν την κίνηση (ο όρος κίνηση αναφέρεται σε κυκλοφοριακή κίνηση που αφορά οχήματα). Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι σε αστικό περιβάλλον υπάρχουν διαφορετικοί δρόμοι που εξυπηρετούν διαφορετικό όγκο από οχήματα ή λεωφορεία εξάγεται το συμπέρασμα ότι η συνδεσιμότητα θα είναι καλύτερη σε δρόμους με πολύ κίνηση αλλά και πιο σταθερή σε αυτούς από τους οποίους διέρχονται συχνά αστικά λεωφορεία. Βάσει αυτής της υπόθεσης, σε κάθε δρόμο μπορεί να ανατεθεί ένα "βάρος" που αντικατοπτρίζει τον αριθμό των λεωφορειακών γραμμών που τον εξυπηρετούν. Οι χάρτες που χρησιμοποιούν τα οχήματα διαθέτουν πληροφορίες για τις διαδρομές των λεωφορείων. Άρα με χρήση του αλγορίθμου Dijkstra μπορεί να βρεθεί ένα μονοπάτι ελάχιστου βάρους. Αν και οι διαδρομές λεωφορείων μπορούν να δώσουν μια εύλογη εκτίμηση σχετικά με την κίνηση σε κάθε δρόμο, οι κυκλοφοριακές συνθήκες σε έναν δρόμο μπορούν να μεταβάλλονται ραγδαία ανά στιγμή. Μια καλύτερη προσέγγιση είναι αυτή που δυναμικά αναθέτει σε έναν δρόμο βάρος ανάλογα με τις παρούσες κυκλοφοριακές συνθήκες και ως εκ τούτου να προκύψουν καλύτερες και πιο αποδοτικές διαδρομές μέσω του αλγορίθμου. Ο A-STAR επιτυγχάνει βελτίωση στην παράδοση πακέτων ενώ διατηρεί σχετικά χαμηλή από άκρο σε άκρο καθυστέρηση. Η καθυστέρηση που εισάγει ο A-STAR είναι ορισμένες φορές μεγαλύτερη σε σχέση με άλλους αλγορίθμους (π.χ. GSR) όσο μειώνεται ο αριθμός των κόμβων καθώς παραδίδονται επιτυχώς πακέτα που έχουν να καλύψουν μεγάλη διαδρομή. Τα πακέτα αυτά χωρίς χρήση local recovery θα είχαν απορριφθεί. Με τον χρόνο παράδοσής τους αυτά τα πακέτα ανεβάζουν τον μέσο όρο χρόνου παράδοσης.

## 2.3 GSR [4]

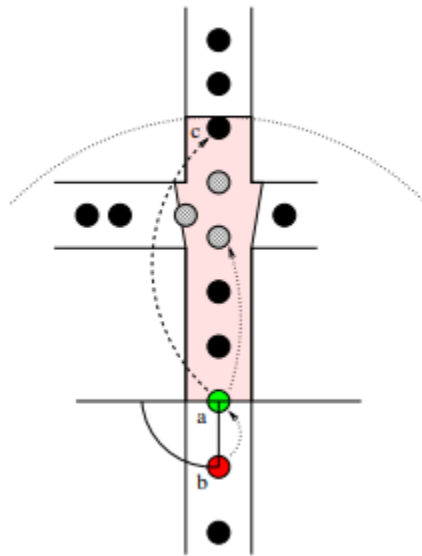
Στο πρωτόκολλο GSR, το ad-hoc ασύρματο δίκτυο αναπαρίσταται ως ένα ακατεύθυντο γράφημα  $G = (V, E)$ , όπου  $V$  είναι οι κόμβοι πλήθους  $|V|$  και  $E$  οι ακατεύθυντες ακμές πλήθους  $|E|$ , που συνδέουν τους κόμβους  $V$ . Κάθε ένας έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό και αναπαριστά ένα κινητό κόμβο με μια ασύρματη συσκευή με ακτίνα εκπομπής  $R$  και άπειρο αποθηκευτικό χώρο. Οι κόμβοι κινούνται τυχαία και μεταβάλλουν την ταχύτητα τους ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Μια ακατεύθυντη ακμή  $(i, j)$  που συνδέει τους κόμβους  $i$  και  $j$  δημιουργείται όταν η απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων γίνει μικρότερη του  $R$ . Η ακμή αυτή διαγράφεται όταν οι δύο κόμβοι απομακρύνονται τόσο ώστε να βγούν ο ένας από την ακτίνα εκπομπής του άλλου. Κάθε κόμβος  $i$  διαθέτει μια λίστα γειτνίασης και τρεις πίνακες. Έναν πίνακα τοπολογίας του δικτύου ( $TT_i$ ), για κάθε προορισμό  $j$  ο πίνακας  $NEXT_{i(j)}$  καταδεικνύει την επόμενη μετάβαση για την προώθηση πακέτων με προορισμό το  $j$  στο πιο σύντομο μονοπάτι, ενώ ο πίνακας  $D_{i(j)}$  περιέχει την απόσταση της πιο σύντομης διαδρομής από το  $i$  στο  $j$ . Επιπρόσθετα, για κάθε κόμβο-προορισμό  $j$  περιέχεται στον πίνακα  $TT_i$  μια καταχώρηση με δύο τμήματα:  $TT_i.LS(j)$  και  $TT_i.SEQ(j)$ . Το πρώτο περιέχει τις πληροφορίες για την σύνδεση με τον κόμβο  $j$ , ενώ το δεύτερο υποδηλώνει τη χρονική στιγμή που ο  $j$  παρήγαγε τις πληροφορίες αυτές. Τέλος, μία συνάρτηση βάρους (η οποία μπορεί να έχει διάφορες παραλλαγές) χρησιμοποιείται ώστε να υπολογίσει την απόσταση για μια σύνδεση. Στον GSR κάθε κόμβος αφού αρχικοποιηθεί κατάλληλα μαθαίνει τους κόμβους που είναι γειτονικοί σε αυτόν εξετάζοντας το πεδίο αποστολέα κάθε πακέτου στην ουρά εισερχόμενων πακέτων που διαθέτει. Ακολούθως, ο κόμβος επεξεργάζεται τις διάφορες πληροφορίες σύνδεσης που μεταφέρουν τα πακέτα και διασφαλίζει ότι μόνο οι πιο επίκαιρες από αυτές τις πληροφορίες θα χρησιμοποιηθούν. Αυτό επιτυγχάνεται συγκρίνοντας τον μοναδικό αριθμό ακολουθίας που φέρει κάθε πακέτο με εκείνο που διαθέτει ο ίδιος ο κόμβος και αν ο αριθμός του πακέτου είναι μεγαλύτερος από αυτόν του κόμβου, τότε οι πληροφορίες που διαθέτει ο κόμβος αντικαθίστανται από εκείνες του πακέτου. Τέλος, ο κόμβος ανακατασκευάζει τον πίνακα δρομολόγησης σύμφωνα με τη νέα τοπολογία που υπολογίστηκε και εκπέμπει περιοδικά τις νέες πληροφορίες στους γείτονες του. Για τον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Dijkstra με ορισμένες διαφοροποιήσεις. Ο GSR παραδίδει τα πακέτα με μικρότερη επιτυχία από τον LS (Link State routing protocol) ενώ αποδίδει καλύτερα από τον DBF. Σε ότι αφορά τις επιπρόσθετες πληροφορίες που συνοδεύουν το κάθε πακέτο, ο GSR διατηρεί σταθερό το πλήθος τους ανεξάρτητα από τον βαθμό κινητικότητας των κόμβων αλλά και λόγω του γεγονότος ότι κάθε κόμβος ανταλλάσσει πληροφορίες μόνο με τους άμεσους γείτονες του. Η ακρίβεια δρομολόγησης του GSR είναι καλή για μικρές ταχύτητες ενώ για μεγαλύτερες καταλήγει χειρότερη αυτής του LS. Επίσης, με κατάλληλη ρύθμιση του χρονικού διαστήματος μεταξύ των ενημερώσεων μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη ευστοχία στην παράδοση πακέτων. Τέλος, με αύξηση της ακτίνας



εκπομπής κάθε κόμβου αυξάνεται η συνδεσιμότητα των κόμβων αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται και το μέγεθος της πληροφορίας που φέρει το κάθε πακέτο.

## 2.4 GPCR [5]

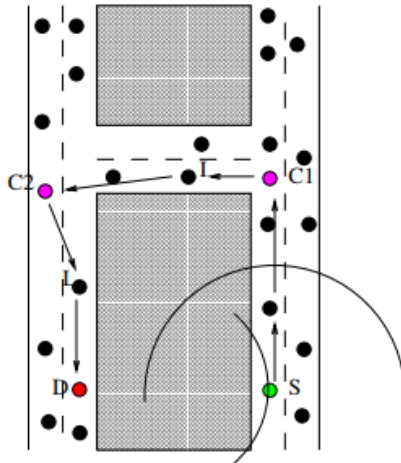
Το GPCR είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί άπληστη προώθηση πακέτων και μια στρατηγική επαναφοράς από αδιέξοδα η οποία επεξηγείται παρακάτω και αποτελείται από δύο κύρια κομμάτια. Σε κάθε διασταύρωση πρέπει να αποφασιστεί ποια διαδρομή θα ακολουθήσει το πακέτο ενώ μεταξύ των διασταυρώσεων πρέπει να ακολουθεί μια ειδική άπληστη λογική ώστε να αποφευχθεί η υπερπήδηση κόμβων που βρίσκονται στις διασταυρώσεις (συντονιστών). Ένας κόμβος γνωρίζει εκ των προτέρων αν είναι συντονιστής. Κατά την προώθηση πακέτων, αν ο κόμβος που τα προωθεί βρίσκεται σε δρόμο και όχι σε διασταύρωση, αυτά προωθούνται κατά μήκος του δρόμου και προς την επόμενη διασταύρωση. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη επιλογή γειτονικού κόμβου από τον κόμβο που προωθεί το πακέτο. Όσο κανείς από τους γειτονικούς κόμβους δεν είναι συντονιστής, επιλέγεται αυτός που απέχει το περισσότερο από τον κόμβο που προωθεί το πακέτο, ενώ αν εντοπιστούν συντονιστές, τότε επιλέγεται τυχαία ένας εξ αυτών και το πακέτο προωθείται σε αυτόν.



Εικόνα 10: Προώθηση πακέτου προς μια διασταύρωση στον GPCR

Σύμφωνα με αυτή τη λογική, δεν προωθούνται ποτέ πακέτα πέρα των διασταυρώσεων χωρίς να περάσουν αρχικά από συντονιστή. Αν ο κόμβος που προωθεί είναι συντονιστής, τότε πρέπει να καθοριστεί η διαδρομή η οποία θα ακολουθηθεί από το πακέτο με χρήση

του κανόνα του δεξιού χεριού στο επίπεδο γράφημα που αναπαριστά την τοπολογία της πόλης. Όταν όμως το πακέτο φτάσει σε 'τοπικό μέγιστο' (σε σημείο όπου ο κόμβος που βρίσκεται είναι αυτός με τη μικρότερη απόσταση από τον προορισμό σε σχέση με τους γειτονικούς του), μεταβαίνει σε κατάσταση επαναφοράς και ο συντονιστής επιλέγει να το προωθήσει στον δρόμο που είναι ο πρώτος που συναντάται κατά την αντίστροφη φορά από αυτή των δεικτών του ρολογιού. Ακολούθως, το πακέτο προωθείται κατά μήκος του δρόμου.



Εικόνα 11: Recovery mode στον GPCR

Όταν τελικά το πακέτο φτάσει στον επόμενο συντονιστή τότε αποφασίζεται η επόμενη διαδρομή του πακέτου. Σε αυτό το σημείο, αν η απόσταση του πακέτου από τον προορισμό είναι μικρότερη από εκείνη που είχε όταν ξεκίνησε η κατάσταση επαναφοράς, τότε το πακέτο επανέρχεται σε κατάσταση άπληστης προώθησης και συνεχίζει τη διαδρομή προς τον προορισμό του. Έτσι αποφεύγονται τα αδιέξοδα κατά την δρομολόγηση του πακέτου. Κατά κανόνα ο GPCR επιτυγχάνει καλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων σε σύγκριση με τον GPSR, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των κόμβων που επικοινωνούν, αλλά παράλληλα παρουσιάζει αυξημένο αριθμό μεταβάσεων του πακέτου και ταυτόχρονη αύξηση της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης.

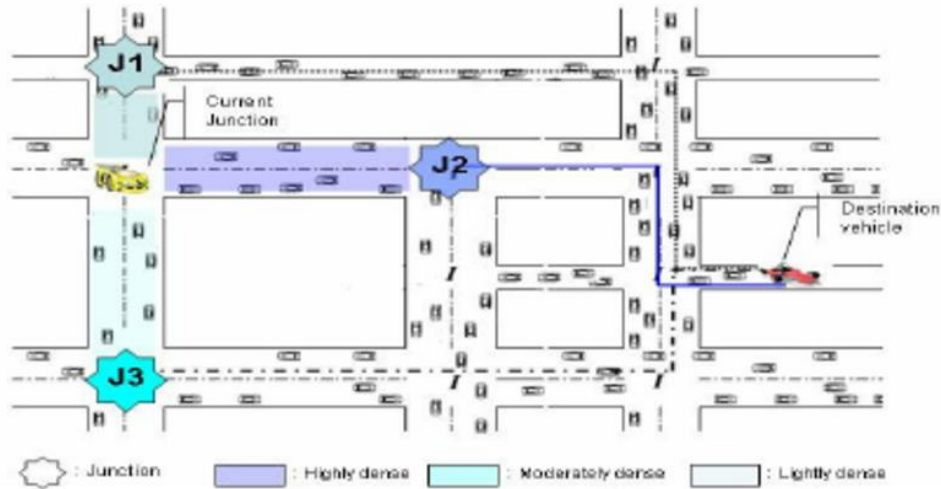
## 2.5 LOUVRE [6]

Το LOUVRE είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που βασίζεται στο Link State πρότυπο. Βασιζόμενο στο NAV system με το οποίο είναι εξοπλισμένο το όχημα, δημιουργείται ο χάρτης της ευρύτερης περιοχής. Ο χάρτης αυτός χρησιμοποιείται στο να κατασκευαστεί το γράφημα της οδικής τοπολογίας με τους δρόμους να αποτελούν τις

κορυφές και τις ακμές μεταξύ αυτών να υποδηλώνουν την συνδεσιμότητα. Κατά τη δημιουργία του πίνακα που διατηρεί τις πληροφορίες συνδέσεων, λαμβάνονται υπ' όψιν μόνο εκείνοι οι δρόμοι που έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από ένα προκαθορισμένο όριο και επιλέγεται η διαδρομή εκείνη της οποίας το συνολικό μήκος είναι το ελάχιστο και άρα περιέχει τις λιγότερες δυνατές μεταβάσεις ως τον προορισμό. Ο αλγόριθμος του Dijkstra χρησιμοποιείται για να κατασκευαστεί ο πίνακας συνδέσεων. Παρά το γεγονός ότι κάθε καταχώρηση στον πίνακα είναι ένας δρόμος αντί για έναν κόμβο, για την διασφάλιση της κλιμακωσιμότητας, ο αριθμός των δρόμων μπορεί να αυξηθεί αρκετά όταν ο χάρτης γίνει πολύ μεγάλος. Έτσι κρατείται η κατάσταση των συνδέσεων μέχρι ένα συγκεκριμένο μέγεθος πλέγματος και τα συνοριακά σημεία του διατηρούν πληροφορίες σύνδεσης για τα γειτονικά τους πλέγματα ώστε αν ένας κόμβος θέλει να προωθήσει ένα πακέτο σε έναν άλλο, που βρίσκεται εκτός του πλέγματος του, απλά το προωθεί στο συνοριακό σημείο και από εκεί αποφασίζεται η περαιτέρω προώθηση του εκτός του αρχικού πλέγματος. Το κατόφλι που ορίζει την πυκνότητα σε έναν δρόμο υπολογίζεται με τρόπο τέτοιο για οποιαδήποτε απόσταση μεταξύ δύο κόμβων ώστε να διασφαλίζεται η συνδεσιμότητα τους. Ακόμη, υποθέτει ομοιόμορφη κατανομή των οχημάτων στον δρόμο και σε περίπτωση που αυτά δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα τότε ο δρόμος θεωρείται εκτός σύνδεσης αν ο χρόνος που απαιτείται για την μεταφορά ενός πακέτου από ένα όχημα A σε ένα όχημα B είναι αντίστοιχος του χρόνου που χρειάζεται το A για να συναντήσει το B. Τότε αυτόματα στον δρόμο αυτό ανατίθεται πυκνότητα 0 και θεωρείται αποσυνδεδεμένος. Στο πρωτόκολλο LOUVRE διακρίνονται δύο είδη δρομολόγησης: αυτή που γίνεται μεταξύ των δρόμων και αυτή που γίνεται μέσα σε έναν δρόμο μεταξύ των οχημάτων. Πάντα χρησιμοποιείται η δρομολόγηση μεταξύ των δρόμων εκτός και αν δεν είναι δυνατόν να βρεθεί κόμβος που να βρίσκεται στον επόμενο δρόμο και τότε χρησιμοποιείται η δρομολόγηση μεταξύ οχημάτων ώστε να βρεθούν κατάλληλοι κόμβοι σε γειτονικό δρόμο. Σε περιπτώσεις αδιεξόδων, ανάλογα την εφαρμογή είναι πιθανές δύο στρατηγικές επανάκαμψης. Αν έχει σημασία η καθυστέρηση τότε το πακέτο δρομολογείται πίσω στον επόμενο καλύτερο δρόμο από αυτόν που προηγουμένως ακολούθησε. Όταν τέτοιος δρόμος δεν υπάρχει, τα πακέτα απορρίπτονται. Αν στην εφαρμογή δεν έχει σημασία η καθυστέρηση, τότε χρησιμοποιούνται store and forward τεχνικές για την προώθηση του πακέτου. Σε ότι αφορά την απόδοση του πρωτοκόλλου LOUVRE, αυτό βελτιώνει το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων σε σχέση με τα GPSR και GPCR ενώ παράλληλα εμφανίζει μειωμένο αριθμό μεταβάσεων σε σχέση με τον GPSR αλλά περισσότερες από τον GPCR. Τέλος, όσον αφορά την καθυστέρηση, ο LOUVRE αποδίδει καλύτερα από τον GPSR αλλά η καθυστέρηση που εισάγει είναι μεγαλύτερη από αυτή του GPCR.

## 2.6 GyTAR [7]

Το GyTAR είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που έχει την ικανότητα να βρίσκει αποδοτικές διαδρομές για την παράδοση πακέτων σε αστικό περιβάλλον. Στο GyTAR οι διασταυρώσεις από τις οποίες πρέπει να περάσει ένα πακέτο για να φτάσει στον προορισμό του αποφασίζονται η κάθε μία δυναμικά με σκοπό να ληφθεί υπ' όψιν η συνεχής αλλαγή των κυκλοφοριακών συνθηκών που επικρατούν κάθε στιγμή. Κατά την επιλογή της επόμενης διασταύρωσης, ένας κόμβος (το όχημα που αποστέλει το πακέτο ή ένα ενδιάμεσο όχημα σε διασταύρωση) αναζητά τη θέση των γειτονικών διασταυρώσεων με χρήση χάρτη. Σε κάθε διασταύρωση ανατίθεται ένα σκορ-βάρος που αντικατοπτρίζει την κυκλοφοριακή κίνηση σε αυτή και την οδική απόσταση από τον προορισμό. Η καλύτερη διασταύρωση-προορισμός είναι εκείνη με το μεγαλύτερο σκορ, σύμφωνα με τη συνάρτηση  $S(j) = \alpha \cdot x \cdot f(Tj) + \beta \cdot x \cdot g(Dj)$  όπου τα  $\alpha$  και  $\beta$  είναι συντελεστές βάρους.



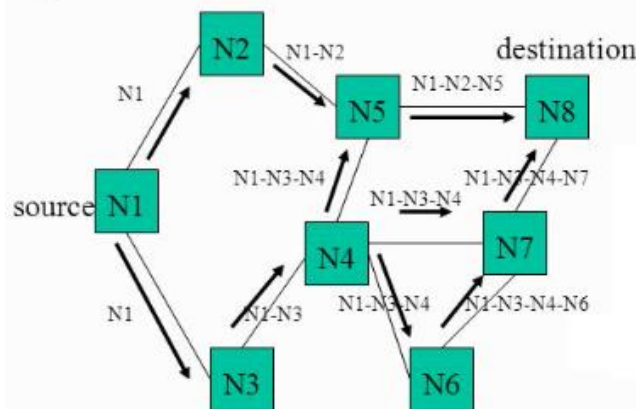
Εικόνα 12: Προώθηση πακέτου μέσω διασταυρώσεων στον GyTAR

Όταν αποφασιστεί η επόμενη διασταύρωση, η βελτιωμένη άπληστη στρατηγική χρησιμοποιείται για την προώθηση πακέτων σε αυτή με σήμανση των πακέτων με την τοποθεσία της διασταύρωσης αυτής. Κάθε όχημα διατηρεί έναν πίνακα γειτνίασης στα πεδία του οποίου καταγράφονται η θέση, η ταχύτητα και η κατεύθυνση κάθε γειτονικού οχήματος με τον πίνακα να ανανεώνεται περιοδικά με χρήση μηνυμάτων αναγνώρισης που ανταλλάσσονται μεταξύ των οχημάτων. Ως εκ τούτου, όταν ένα όχημα λαμβάνει ένα πακέτο, υπολογίζει τη νέα αναμενόμενη θέση των γειτονικών οχημάτων, σύμφωνα με τα στοιχεία τα οποία διαθέτει αποθηκευμένα και ύστερα επιλέγει την προώθηση του πακέτου σε εκείνο το γειτονικό όχημα που βρίσκεται πιο κοντά στον προορισμό. Παρά τη βελτιωμένη άπληστη στρατηγική, για την προώθηση πακέτων, που ακολουθείται, είναι δυνατόν το πακέτο να βρεθεί σε αδιέξοδο, όπου κανένας κόμβος δε βρίσκεται πιο

κοντά στον προορισμό από τον κόμβο που προωθεί το πακέτο και άρα απαιτείται μια στρατηγική επανάκαμψης από αυτό το σενάριο. Η στρατηγική αυτή βασίζεται στην ιδέα του “carry and forward” όπου το όχημα που επρόκειτο να προωθήσει το πακέτο το κρατά μέχρι να ανακαλυφθεί κάποιο όχημα ή κάποια διασταύρωση η οποία βρίσκεται πιο κοντά στον προορισμό. Σε ότι αφορά την παράδοση πακέτων, το GyTAR καταφέρνει αρκετά καλό ποσοστό σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα (DSR, LAR) καθώς δεν απαιτείται η γνώση του πλήρους μονοπατιού από άκρο σε άκρο κατά την μετάδοση πακέτων αλλά η διαδρομή αποφασίζεται σταδιακά λαμβάνοντας υπ’ όψιν την πυκνότητα της κυκλοφορίας και τα χαρακτηριστικά του αστικού περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα για το overhead που εισάγει το GyTAR αξιολογούνται ως ικανοποιητικά σε σχέση με τον αριθμό των μεταδιδόμενων πακέτων καθώς υπάρχουν μόνο τα αναγνωριστικά μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των οχημάτων. Με αυτό τον τρόπο το GyTAR αποδίδει καλύτερα σε σχέση με το LAR και ανταγωνιστικά σε σχέση με το DSR.

## 2.7 DSR [8]

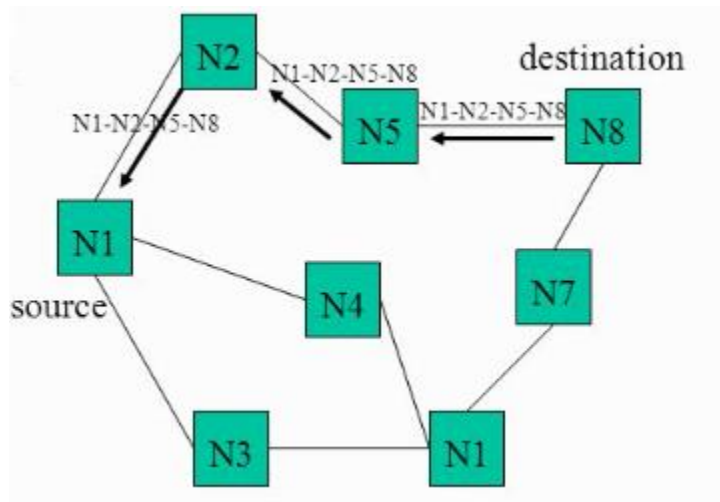
Όταν ένας κόμβος S θέλει να στείλει ένα πακέτο σε έναν κόμβο D ξεκινά μια διαδικασία ανακάλυψης μονοπατιού προς τον τελικό κόμβο. Αρχικά, ο S ξεκινά κατακλύζοντας το δίκτυο με αιτήματα για την εύρεση της διαδρομής (RREQ) τα οποία διαθέτουν τη διεύθυνση του αποστολέα, τη διεύθυνση του προορισμού και ένα μοναδικό αναγνωριστικό που καθορίζεται από τον αποστολέα. Κάθε κόμβος πριν προωθήσει το αίτημα αυτό, του προσαρτά το δικό του μοναδικό αναγνωριστικό.



Εικόνα 13: Διάδοση RREQ στον DSR

Σε περίπτωση που ο κόμβος εντοπίσει ένα αναγνωριστικό που έχει ξαναδεί στο αίτημα ή βρει τη δική του διεύθυνση σε αυτό, τότε το απορρίπτει, αλλιώς καταχωρεί τη δική του

διεύθυνση στο αίτημα και το προωθεί στους γειτονικούς του κόμβους. Αν το αίτημα καταφθάσει στον κόμβο προορισμού του, τότε εκείνος επιστρέφει μια απόκριση στον κόμβο-αποστολέα για να του γνωστοποιήσει το μονοπάτι που βρέθηκε. Στην απόκριση του αυτή (RREP) συμπεριλαμβάνεται το μονοπάτι (που βρέθηκε από το RREQ) το οποίο ο παραλήπτης αποθηκεύει στη μνήμη του για μελλοντική δρομολόγηση. Η δρομολόγηση του RREP προς τον αποστολέα μπορεί να γίνει μέσω του μονοπατιού που χρησιμοποιήθηκε αρχικά ενώ αν δεν είναι δυνατή η χρήση του μονοπατιού αυτού τότε θα πρέπει ο κόμβος D που αποστέλλει το μήνυμα RREP να το δρομολογήσει μέσω ενός μονοπατιού που ήδη γνωρίζει, προς τον S, είτε να ξεκινήσει μια διαδικασία εύρεσης μονοπατιού προς αυτόν με ταυτόχρονη προσάρτηση, σε αυτό το αίτημα, του αρχικού ζητούμενου μονοπατιού από τον S στον D.



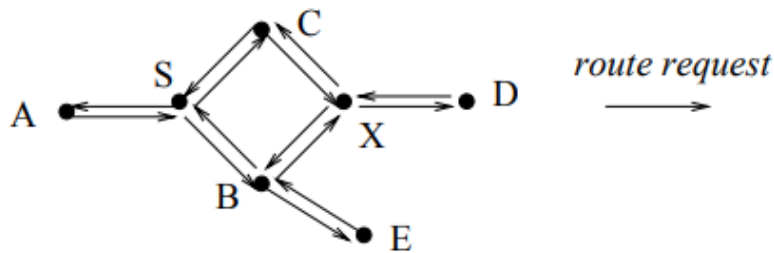
Εικόνα 14: Διάδοση RREP στον DSR

Κάθε κόμβος που προωθεί μηνύματα αποθηκεύει αντίγραφα των μηνυμάτων που δεν δύνανται να προωθηθούν και προσπαθεί ανά διαστήματα να τα αποστείλει. Αν η αποστολή τους δεν καταστεί δυνατή μετά από κάποιο προκαθορισμένο διάστημα τότε αυτά απορρίπτονται. Για τη μείωση της σπατάλης εύρους ζώνης οι προσπάθειες για ανακάλυψη διαδρομής, προς κόμβο που ήταν απρόσιτος, περιορίζονται. Κατά την αποστολή ενός πακέτου από τον S στον D, το πακέτο περιέχει στην κεφαλίδα του το πλήρες μονοπάτι που πρέπει να ακολουθηθεί και κατ' αυτό τον τρόπο κάθε κόμβος αποθηκεύει κάθε νέο μονοπάτι που μαθαίνει. Έτσι, αν διαπιστωθεί από έναν ενδιάμεσο κόμβο ότι μια διαδρομή από το S στο D είναι πλέον μη διαθέσιμη, μπορεί να ανατρέξει στην τοπική μνήμη του ώστε να παρέχει μια εναλλακτική διαδρομή. Ακόμη, ενδιάμεσοι κόμβοι οφείλουν, αν διαπιστώσουν ότι ένα μονοπάτι είναι πλέον μη διαθέσιμο, να ενημερώσουν τον S γι αυτό με ένα μήνυμα RERR που παράλληλα ενημερώνει τους

κόμβους από τους οποίους περνάει, για την μη ύπαρξη του μονοπατιού. Κατά την απάντηση ενός κόμβου για τη διαθεσιμότητα ενός μονοπατιού, εφαρμόζεται τυχαία καθυστέρηση αυτής για να αποφευχθεί η συμφόρηση στον κόμβο που έχει ζητήσει το μονοπάτι αυτό. Επίσης, κάθε μήνυμα RREQ διαθέτει και μέγιστο αριθμό μεταβάσεων μεταξύ κόμβων αλλά και κάθε κόμβος που αποστέλλει μήνυμα RREQ θέτει ένα ανώτατο χρονικό όριο προτού στείλει εκ νέου ένα RREQ μήνυμα χωρίς ανώτατο όριο μεταβάσεων. Όταν ένα πακέτο κατά τη δρομολόγηση του δε μπορεί να προωθηθεί σύμφωνα με αρχικό μονοπάτι, τότε σημαίνεται ειδικά μία φορά μόνο και επιχειρείται η επαναπροώθηση του. Ακόμη, ένα μονοπάτι δύναται να συμπτηχθεί όταν αυτό περιλαμβάνει κάποιον ενδιάμεσο κόμβο που είναι παραπανήσιος. Τέλος, για την ταχύτερη διάδοση μηνυμάτων λάθους, όταν ο αποστολέας S λάβει ένα μήνυμα RERR, τότε το προσαρτά σε ένα νέο μήνυμα RREQ που προωθεί στους γειτονικούς του κόμβους και ως εκ τούτου αυτοί διατηρούνται ενημερωμένοι. Από άποψη απόδοσης, ο DSR επιτυγχάνει υψηλό ποσοστό παράδοσης πακέτων, μικρή καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας, ενώ καταφέρνει να προσαρμοστεί σε αλλαγές του μεγέθους και της πυκνότητας του δικτύου. Ωστόσο, σε περιπτώσεις μεγάλου φόρτου, παρατηρείται μια πτώση της απόδοσης του πρωτοκόλλου σε ότι αφορά την παράδοση πακέτων και την καθυστέρηση.

## 2.8 LAR [9]

Το πρωτόκολλο LAR, για την προώθηση των πακέτων στον προορισμό τους, χρησιμοποιεί μια βελτιωμένη εκδοχή της μεθόδου που υπαγορεύει πως για την ανακάλυψη μονοπατιού από τον αποστολέα στον παραλήπτη, το δίκτυο 'πλημμυρίζει' από μηνύματα ανακάλυψης αυτής της διαδρομής που διαδίδονται μεταξύ των κόμβων. Ο αποστολέας αρχικά ξεκινά να αναζητά τη διαδρομή προς τον παραλήπτη διαδίδοντας το μήνυμα στους γειτονικούς του κόμβους οι οποίοι με τη σειρά τους εξετάζουν τον προορισμό του μηνύματος και αν δεν είναι οι ίδιοι, τότε το προωθούν και εκείνοι. Όταν το μήνυμα φτάσει στον προορισμό του, τότε ο κόμβος-προορισμός αποκρίνεται σε αυτό με ένα μήνυμα απάντησης, που χρησιμοποιεί το μονοπάτι που μόλις ανακαλύφθηκε, για να διαδοθεί στον αποστολέα.



Εικόνα 15: Flooding στον LAR

Σε περίπτωση που ο κόμβος-προορισμός δε μπορεί να λάβει το μήνυμα αίτησης μονοπατιού, ο αποστολέας πρέπει να είναι σε θέση να επαναλάβει τη διαδικασία ανακάλυψης του μονοπατιού. Γι' αυτό τον λόγο θέτει ένα χρονικό όριο αναμονής απάντησης και αν μέσα σε αυτό δεν λάβει απάντηση, τότε εκπέμπει ένα νέο μήνυμα ανακάλυψης μονοπατιού, διαφορετικό από το προηγούμενο. Η ανακάλυψη μονοπατιού χρησιμοποιείται όταν ο αποστολέας δε γνωρίζει μονοπάτι προς τον παραλήπτη, είτε όταν ένα προηγούμενο μονοπάτι είναι πλέον μη διαθέσιμο. Όταν κατά την προώθηση πακέτου διαπιστωθεί αδιέξοδος, τότε επιστρέφεται μήνυμα σφάλματος και επανεκκινείται νέα διαδικασία ανακάλυψης μονοπατιού. Η βελτίωση της παραπάνω μεθόδου έγκειται στη γνώση πληροφοριών σχετικά με την τοποθεσία και την κίνηση των κόμβων. Έστω ότι ο αποστολέας θέλει να βρει ένα μονοπάτι προς τον προορισμό και γνωρίζει ότι ο κόμβος-προορισμός βρίσκεται στην τοποθεσία  $L$  τη χρονική στιγμή  $t_0$ . Με χρήση αυτών των πληροφοριών, μπορεί να περιορίσει την περιοχή προς την οποία προωθεί τα μηνύματα, σε εκείνη που προβλέπεται να είναι ο κόμβος προορισμού. Αν δεν υπάρχει γνώση σχετικά με την κίνηση του κόμβου προορισμού, ο αλγόριθμος θεωρεί όλο το δίκτυο ως αναμενόμενη περιοχή και δεν λαμβάνει χώρα κάποια βελτίωση. Κατά την προώθηση αιτήσεων διαδρομής, η περιοχή στην οποία αυτά διαδίδονται περιλαμβάνει όλη τη ζώνη στην οποία προβλέπεται να είναι ο κόμβος-προορισμός αλλά και για να αυξηθεί η πιθανότητα το μήνυμα να φτάσει σε αυτόν, μπορούν να περιλαμβάνονται και περιοχές γύρω από τη ζώνη αυτή. Αυτό συμβαίνει ώστε να εξασφαλίζεται ότι ο κόμβος που στέλνει το μήνυμα περιλαμβάνεται στην ευρύτερη ζώνη που θα αποσταλεί το μήνυμα αλλά και για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο της μη ύπαρξης μονοπατιού μεταξύ των κόμβων. Αν η αρχική προσπάθεια εγκαθίδρυσης μονοπατιού αποτύχει, τότε γίνεται εκ νέου προσπάθεια, με διευρυμένη ζώνη αναζήτησης. Η υπόθεση αυτή απαιτεί κάθε κόμβος να μπορεί να προσδιορίσει αν βρίσκεται σε ζώνη στην οποία προωθείται κάποιο αίτημα για μονοπάτι. Σε ότι αφορά την απόδοση του αλγορίθμου, αυτός βελτιώνει τον flooding algorithm σε ότι αφορά το πλήθος των μηνυμάτων, ενώ σε μεγαλύτερες ταχύτητες κόμβων η κατάργηση μονοπατιών γίνεται συχνότερη και οι παραπληροφορίες αυξάνονται με μικρότερο ρυθμό πάντα από τη flooding λογική. Ακόμη, οι επιπλέον πληροφορίες μειώνονται περαιτέρω όταν αυξηθεί η ακτίνα μετάδοσης των κόμβων ενώ δε βελτιώνουν τόσο τον flooding algorithm όταν η ακτίνα μετάδοσης μειώνεται αρκετά καθώς μειώνονται οι γειτονικοί κόμβοι και πολλές προσπάθειες για ανακάλυψη μονοπατιού αποτυγχάνουν. Τέλος, όταν οι κόμβοι αυξάνονται, το πρωτόκολλο LAR αποδίδει καλύτερα ενώ και τα μηνύματα που απαιτούνται για την ανακάλυψη μονοπατιού είναι μειωμένα.

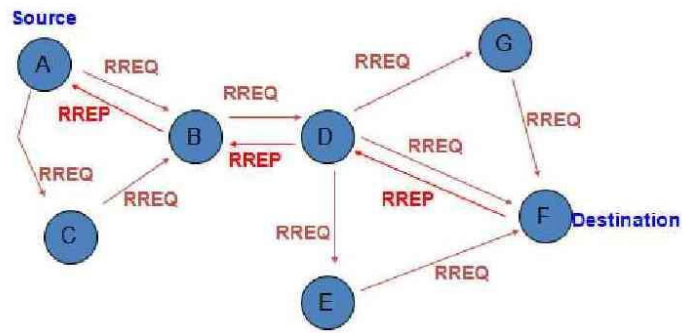


## 2.9 BMAR [10]

Το πρωτόκολλο BMAR υποθέτει ότι κάθε κόμβος γνωρίζει τη θέση, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του με χρήση GPS. Ακόμη, υποτίθεται ότι η ακτίνα εκπομπής σήματος κάθε κόμβου είναι καθορισμένη. Όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται εντός της ακτίνας εκπομπής ενός κόμβου θεωρούνται γειτονικοί του και ο κόμβος αυτός διαθέτει πληροφορίες για τους γειτονικούς του. Οι πληροφορίες αυτές λαμβάνονται μέσω ανταλλαγής πακέτων ή περιοδικών εκπομπών που κάνουν οι κόμβοι. Κάθε κόμβος εκπέμπει στους γειτονικούς του ένα μήνυμα που περιλαμβάνει την τοποθεσία του, την ταχύτητα του, την κατεύθυνση της κίνησης του και τον χρόνο που μεταδόθηκε το μήνυμα αυτό. Οι γειτονικοί κόμβοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τους εσωτερικούς κόμβους και τους συνοριακούς. Γειτονικοί κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται εντός του κύκλου που ορίζεται από την ακτίνα εκπομπής είναι εσωτερικοί ενώ αυτοί που βρίσκονται πάνω στην περιφέρεια του κύκλου χαρακτηρίζονται ως συνοριακοί. Κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται εκτός του κύκλου της ακτίνας εκπομπής ονομάζονται εξωτερικοί. Αφού πάρει τη λίστα των γειτονικών κόμβων, η πηγή πρέπει να αποφασίσει σε ποιόν από όλους θα προωθήσει το πακέτο. Οι καλύτεροι υποψήφιοι γειτονικοί κόμβοι είναι οι συνοριακοί καθώς βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο μακριά από την πηγή και όσο το δυνατόν κοντά στον προορισμό. Το πρωτόκολλο αποφασίζει τον επόμενο κόμβο στον οποίο θα προωθηθεί το πακέτο με την εξής λογική: Ο κόμβος-πηγή και ο κόμβος-προορισμός συνδέονται με μία νοητή ευθεία. Αν προκύπτουν πάνω από ένας συνοριακοί κόμβοι κατά την προώθηση ενός πακέτου, τότε η προβολή του γειτονικού κόμβου στη νοητή αυτή ευθεία καταδεικνύει την απόσταση του κόμβου από τον προορισμό με τον κοντινότερο κόμβο να επιλέγεται. Επιπρόσθετα, για την αποφυγή αδιεξόδων (π.χ. ίση απόσταση συνοριακών κόμβων από τον προορισμό), σε κάθε συνοριακό κόμβο ανατίθεται μία πιθανότητα ( $P_c$ ) να αλλάξει κατεύθυνση σε διασταύρωση ενώ ( $P_{nc}$ ) είναι η πιθανότητα να μην αλλάξει κατεύθυνση με  $P_c > P_{nc}$ . Με την υπόθεση ότι κάθε κόμβος διαθέτει ψηφιακό χάρτη, τότε κατά την προώθηση του πακέτου, θα εξετάσει την πορεία των δύο κόμβων και θα απορρίψει αυτόν ο οποίος πρόκειται να συναντήσει διασταύρωση καθώς είναι μεγαλύτερη η πιθανότητα να αλλάξει πορεία και άρα να προωθήσει το πακέτο προς μια λάθος κατεύθυνση. Τελικά, το πακέτο θα προωθηθεί σε εκείνο τον κόμβο ο οποίος δεν έχει διασταύρωση στην πορεία του ώστε να επιτευχθεί η παράδοση του πακέτου στον προορισμό του. Αν δεν υπάρχει κόμβος χωρίς διασταύρωση στην πορεία του, τότε επιλέγεται αυτός που έχει το μεγαλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων. Σε ότι αφορά την απόδοση του BMAR, επιτυγχάνει καλύτερο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων από άλλα πρωτόκολλα (GPSR, AMAR, BMFR) για διάφορα πλήθη κόμβων, έχει τη μικρότερη καθυστέρηση και το μεγαλύτερο throughput. Κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης και όσο περνά χρόνος, το BMAR διατηρεί το καλύτερο ποσοστό παράδοσης πακέτων και throughput αλλά υστερεί στην από άκρο σε άκρο καθυστέρηση σε σχέση με τα άλλα πρωτόκολλα.

## 2.10 AODV [11]

Το πρωτόκολλο AODV επιτρέπει την κατασκευή μονοπατιών προς συγκεκριμένους προορισμούς και δεν απαιτεί από τους κόμβους να θυμούνται αυτές τις διαδρομές όταν δε συμμετέχουν στην επικοινωνία. Ακόμη με χρήση μοναδικών αναγνωριστικών για κάθε προορισμό, το πρωτόκολλο αποφεύγει τα αδιέξοδα. Στο AODV ορίζονται τρεις τύποι μηνυμάτων : Route Requests (RREQs), Route Replies (RREPs), Route Errors (RERRs). Τα μηνύματα RREQ χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη διαδρομών προς κόμβους, τα μηνύματα RREP χρησιμοποιούνται ως απάντηση, όταν ένα μονοπάτι, το οποίο αιτήθηκε με RREQ, βρεθεί και τέλος τα μηνύματα RERR χρησιμοποιούνται ώστε να ειδοποιηθούν οι κόμβοι στο δίκτυο όταν χάνεται η σύνδεση μεταξύ κόμβων σε ενεργό μονοπάτι. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιείται όταν δύο κόμβοι δεν έχουν ένα γνωστό μονοπάτι μεταξύ τους. Κάθε κόμβος κρατά έναν πίνακα γειτνίασης των κόμβων που βρίσκονται 'γύρω' του και είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν κατά τη μεταφορά κάποιου μηνύματος. Οι πληροφορίες σχετικά με διαδρομές κρατούνται ακόμα και για εκείνες που έχουν μικρό χρόνο ζωής. Όταν ένας κόμβος A θέλει να στείλει ένα μήνυμα σε έναν άλλο κόμβο E πρέπει να βρει μια διαδρομή ώστε να το αποστείλει. Γι' αυτό προωθεί στους γειτονικούς του κόμβους ένα RREQ μήνυμα με TTL ίσο με 1, το οποίο περιέχει μεταξύ άλλων την διεύθυνση IP του A αλλά και τη διεύθυνση IP του E. Αν κάποιος γειτονικός κόμβος B που θα παραλάβει αυτό το μήνυμα γνωρίζει μια διαδρομή προς το E, θα απαντήσει με ένα RREP μήνυμα προς το A γνωστοποιώντας του τη διαδρομή. Υπάρχει η δυνατότητα με χρήση της κατάλληλης σημαίας στο RREQ μήνυμα, να στείλει ο κόμβος B το μήνυμα RREP και στο E σε περίπτωση που ο B χρειαστεί να στείλει πακέτα πίσω στον E (π.χ. σε μια TCP σύνδεση). Σε αυτή την περίπτωση τα μηνύματα RREP είναι unicast προς τους κόμβους που οδηγούν στον αποστολέα ή τον παραλήπτη. Αν ο A δε λάβει μια RREP απάντηση εντός ενός καθορισμένου χρονικού διαστήματος, τότε στέλνει ξανά το RREQ μήνυμα με μεγαλύτερο TTL αυτή τη φορά. Παράλληλα κατά τη προώθηση του RREQ μηνύματος, δημιουργούνται οι αντίστροφες διαδρομές καθώς αυτό περνά τους κόμβους.



Εικόνα 16: Διάδοση μηνυμάτων RREQ και RREP στον AODV

Για την αποφυγή αδιεξόδων κατά την προώθηση μηνυμάτων από τους κόμβους, οι μοναδικοί αριθμοί που διαθέτουν αλλάζουν όταν προωθούν μηνύματα RREP και όταν πληρείται ένας από τους παρακάτω όρους: ο αριθμός που έχουν ήδη είναι άκυρος, ο αριθμός που βρίσκεται στο RREP μήνυμα είναι μεγαλύτερος από τον αποθηκευμένο σε αυτούς, οι αριθμοί είναι ίδιοι αλλά η διαδρομή χαρακτηρίζεται ανενεργή ή οι αριθμοί είναι ίδιοι αλλά το πλήθος των μεταβάσεων είναι μικρότερο στο RREP μήνυμα. Οι κόμβοι μπορούν να κρατούν πληροφορίες συνδεσιμότητας με τους γειτονικούς τους μέσω μηνυμάτων RERR τα οποία παράγονται όταν ένας κόμβος ανιχνεύει ότι χάθηκε η σύνδεση σε μία ενεργή διαδρομή ή αν λάβει ένα πακέτο για το οποίο δε γνωρίζει διαδρομή ή λάβει ένα μήνυμα RERR, από γειτονικό του κόμβο, για διαδρομή που μέχρι πρότινος θεωρούσε ενεργή. Κατά την προώθηση RERR μηνυμάτων, οι κόμβοι πρέπει να αυξάνουν τον αριθμό ακολουθίας για τον προορισμό ώστε να ενημερώνουν κόμβους, από τους οποίους θα περάσει το μήνυμα, για την μη διαθεσιμότητα μιας διαδρομής. Τέλος, όταν ένας κόμβος ανιχνεύει την καταστροφή ενός μονοπατιού, δύναται να επιχειρήσει την επανασύνδεση του μονοπατιού με αποστολή RREQ μηνύματος και αν λάβει μήνυμα RREP τότε η επισκευή ήταν επιτυχής. Από πλευράς απόδοσης, το AODV εμφανίζει γενικά μικρότερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο σε σχέση με το DSR για διαφορετικό πλήθος κόμβων, παρόμοιο throughput για διάφορα μεγέθη πακέτων και παρόμοιο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων για διάφορα μεγέθη πακέτων.

## 2.11 HLAR [12]

Το πρωτόκολλο HLAR είναι ένας συνδυασμός τροποποιημένου AODV (AODV-EXT) με άπληστο γεωγραφικό αλγόριθμο προώθησης. Το AODV συνδυάζεται με τη μετρική EXT που παρέχει μια εκτίμηση για τον αριθμό των εκπομπών ενός πακέτου μέχρι αυτό να παραληφθεί στον προορισμό χωρίς σφάλματα. Για να μπορεί ένας κόμβος να γνωρίζει την ποιότητα της σύνδεσης του με τους γειτονικούς του κόμβους, χρειάζεται να παράγει

αναγνωριστικά μηνύματα ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Τα μηνύματα αυτά επιτρέπουν στους κόμβους να κατασκευάζουν τον πίνακα γειτνίασης τους που περιέχει τόσο το μοναδικό αναγνωριστικό του οχήματος αλλά και τις συντεταγμένες του τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Στον AODV-EXT τα ενδιάμεσα οχήματα δύνανται να επισκευάσουν τοπικά, διαδρομές που έχουν καταστραφεί εξοικονομώντας ενέργεια ώστε να μη χρειαστεί αναζήτηση νέου μονοπατιού από την πηγή στον προορισμό. Το HLAR ξεκινά την αναζήτηση μονοπατιού κατ' απαίτηση του κόμβου πηγή με δημιουργία ενός αιτήματος (RREQ) που περιέχει την τοποθεσία της πηγής και του προορισμού. Ο κόμβος-πηγή, ακολούθως, αναζητά γειτονικούς του κόμβους που βρίσκονται πιο κοντά στον προορισμό. Αν βρεθεί τέτοιος κόμβος, τότε το πακέτο προωθείται σε αυτόν. Αλλιώς, το μήνυμα προωθείται σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους και σε κάθε περίπτωση η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου το μήνυμα να φτάσει στον προορισμό του. Στο HLAR, τα πακέτα που προωθούνται φέρουν και έναν αριθμό time-to-live (TTL) το οποίο τίθεται από την πηγή ανάλογα με την εκτίμηση των μεταβάσεων που θα χρειαστούν ώστε να προσεγγιστεί ο προορισμός. Το TTL ενός πακέτου μειώνεται κατά ένα, όταν ένας κόμβος δε χρησιμοποιεί πληροφορίες τοποθεσίας για την προώθηση του αποφεύγοντας να πλημμυρίσει το δίκτυο μιας και όταν το TTL μηδενιστεί, το πακέτο εγκαταλείπεται. Ένας κόμβος-προορισμός απαντά σε ένα RREQ που έλαβε αν: 1) το RREQ αυτό είναι το πρώτο που λαμβάνει από το συγκεκριμένο όχημα, 2) το ληφθέν RREQ φέρει μοναδικό αριθμό ακολουθίας μεγαλύτερο από προηγούμενο RREQ το οποίο είχε ήδη ληφθεί (ο μοναδικός αυτός αριθμός αυξάνεται κάθε φορά που ο κόμβος-πηγή στέλνει ένα μήνυμα RREQ), 3) αν το RREQ που παρελήφθη έχει ίδιο αριθμό ακολουθίας με προηγούμενο αντίστοιχο μήνυμα αλλά το νέο RREQ καταδεικνύει μια, καλύτερης ποιότητας, διαδρομή. Σε ότι αφορά την επισκευή διαδρομών από ενδιάμεσα οχήματα, αυτά χρησιμοποιούν route repair (RRP) πακέτα αντί απλώς να αναφέρουν μη διαθέσιμες διαδρομές. Όταν ένας κόμβος εντοπίσει μια 'κατεστραμμένη' σύνδεση (αν δεν έχει λάβει αναγνωριστικό μήνυμα από γειτονικό του κόμβο για τρεις περιόδους) προς κάποιον προορισμό, αποθηκεύει προσωρινά λαμβανόμενα πακέτα για αυτόν. Ακολούθως, αναζητά γειτονικούς κόμβους πιο κοντά στον προορισμό. Αν βρεθεί τέτοιος κόμβος, τα πακέτα προωθούνται σε αυτόν αφού ο αρχικός κόμβος ενημερώσει τον πίνακα γειτνίασης του ενώ αν δε βρεθεί, ο αρχικός κόμβος παράγει RRP μηνύματα που έχουν TTL ίσο με τον αριθμό των εναπομείναντων μεταβάσεων ως τον προορισμό. Σε αυτό το σημείο, κάθε γειτονικός κόμβος ανατρέχει τον πίνακα γειτνίασης του για να βρει αν υπάρχει γειτονικός κόμβος πιο κοντά στον προορισμό. Τότε συμβαίνει ένα από τα εξής: 1) αν υπάρχει τέτοιος, τότε ο γειτονικός κόμβος απαντά με ένα μήνυμα route repair reply (RRRP) στον ενδιάμεσο κόμβο και τα πακέτα προωθούνται στον επόμενο κόμβο ενώ ο ενδιάμεσος ανανεώνει τον πίνακα γειτνίασης του 2) αν δε βρεθεί τέτοιος κόμβος, ο γειτονικός κόμβος μειώνει το TTL του RRP μηνύματος και ύστερα το προωθεί σε όλους τους γείτονές του με τη διαδικασία να επαναλαμβάνεται μέχρι το μήνυμα να φτάσει στον προορισμό του. Αν ο ενδιάμεσος κόμβος λάβει πάνω από ένα RRRP μήνυμα,

χρησιμοποιεί την διαδρομή που καταδεικνύει το πρώτο από αυτά. Αν ένας ενδιαμέσος κόμβος αποτύχει να επισκευάσει μια ‘κατεστραμμένη’ διαδρομή στέλνει ένα μήνυμα RERR στον κόμβο-πηγή. Το πρωτόκολλο HLAR βελτιώνει το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων συναρτήσει του πλήθους των οχημάτων σε σχέση με τον AODV-ETX ενώ παράλληλα μειώνει και την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.

## 2.12 SAR [13]

Στο SAR ένα όχημα μπορεί να αποκτήσει μια πρώτη εικόνα της τοπολογίας του δικτύου αν συμβουλευτεί το σύστημα χαρτών που διαθέτει, το οποίο μαρτυρά τη μορφή του οδικού δικτύου η οποία θεωρείται σταθερή και δε μεταβάλλεται. Ακολούθως, κατασκευάζεται ένα γράφημα  $G(E,V)$  που αποτελείται από κόμβους  $V$  που αναφέρονται σε σημαντικά σημεία και ακμές  $E$  που συμβολίζουν τις συνδέσεις μεταξύ τοποθεσιών. Οχήματα που κινούνται από ένα σημείο σε ένα άλλο μπορεί να θεωρηθεί ότι κινούνται από έναν κόμβο σε έναν άλλο, μέσω των ακμών. Διάφορα βάρη δύνανται να ανατεθούν σε ακμές ώστε να απεικονίσουν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων. Στο γράφημα το οποίο κατασκευάζεται, οι κόμβοι ‘ $v$ ’ χαρακτηρίζονται από το μοναδικό τους αναγνωριστικό και τις γεωγραφικές τους συντεταγμένες ενώ κάθε ακμή ορίζεται μέσω των κόμβων που βρίσκονται στα δύο άκρα της. Υποθέτουμε ότι το γράφημα είναι συνεκτικό, δηλαδή υπάρχει τουλάχιστον ένα μονοπάτι από έναν κόμβο προς κάθε άλλο κόμβο και η συνάρτηση βάρους που εφαρμόζεται για τις ακμές ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή. Το όχημα-πηγή ‘ $s$ ’ μπορεί να τοποθετήσει τον εαυτό του και το όχημα-προορισμό ‘ $d$ ’ στο γράφημα και ακολούθως να υπολογίσει τη συντομότερη διαδρομή ‘ $P$ ’ προς τον προορισμό με χρήση κάποιου αλγόριθμου π.χ. Dijkstra. Το ‘ $s$ ’ θέτει την  $P$  ως τη διαδρομή που πρόκειται να ακολουθηθεί και η οποία περιέχει μια λίστα με ενδιαμέσους κόμβους. Η διαδρομή αυτή θα ενσωματωθεί στην επικεφαλίδα όλων των πακέτων δεδομένων που αποστέλλονται από το όχημα ‘ $s$ ’. Ακόμη, όλα τα πακέτα σημαίνονται με την τοποθεσία του οχήματος-πηγή και του οχήματος-προορισμού καθώς και μια λίστα των κόμβων από τους οποίους θα περάσει το πακέτο. Αντί να προωθούνται τα πακέτα στους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται γεωγραφικά πιο κοντά στον προορισμό, στον SAR κάθε κόμβος χαρτογραφεί την τοποθεσία των γειτονικών του οχημάτων στο γράφημα που διαθέτει και επιλέγει τον γείτονα εκείνο ο οποίος βρίσκεται στο συντομότερο μονοπάτι προς τον προορισμό αλλά επί του γραφήματος. Αφού προσεγγιστεί ένας κόμβος στη λίστα, αφαιρείται από αυτή και το πακέτο ξεκινά να προωθείται προς τον επόμενο κόμβο στη λίστα. Με την προσέγγιση αυτή το πακέτο προωθείται ολοένα και πιο κοντά προς τον προορισμό από τον έναν κόμβο στον επόμενο. Καθώς όμως το SAR δε διασφαλίζει ότι μπορεί κάθε φορά να βρεθεί κατάλληλος γείτονας, εφαρμόζεται κάποια από τις ακόλουθες τεχνικές: 1) Παύεται προσωρινά η παράδοση του πακέτου και αυτό τοποθετείται σε ένα buffer με περιορισμένο

αποθηκευτικό χώρο. Πακέτα στο buffer ελέγχονται περιοδικά και προωθούνται αν αυτό είναι δυνατό, αλλιώς πακέτα που δε γίνονται να προωθηθούν απορρίπτονται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ή όταν γεμίσει το buffer, 2) Εναλλαγή σε άπληστη προώθηση. Το όχημα που προωθεί το πακέτο μπορεί να αφαιρέσει τη λίστα των κόμβων από το πακέτο και να το προωθήσει με άπληστη λογική ως τον προορισμό ή να προωθήσει άπληστα το πακέτο χωρίς να αποκοπεί η λίστα και να γυρίσει πάλι σε προώθηση με βάση τη λίστα αν αυτό καταστεί δυνατό, 3) Επαναυπολογισμός της λίστας των κόμβων με βάση την τωρινή του τοποθεσία προς τον προορισμό, αντικατάσταση της υπάρχουσας λίστας με τη νέα και προώθηση του πακέτου βάσει αυτής. Το SAR αποδίδει καλύτερα από τον GPSR στο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων, στην από άκρο σε άκρο καθυστέρηση και στο μέσο αριθμό hops του πακέτου αλλά, όσο μεγαλώνει η ακτίνα εκπομπής των οχημάτων δε βελτιώνει τον GPSR, σε ότι αφορά το μέγεθος πακέτων.

## 2.13 CBF [14]

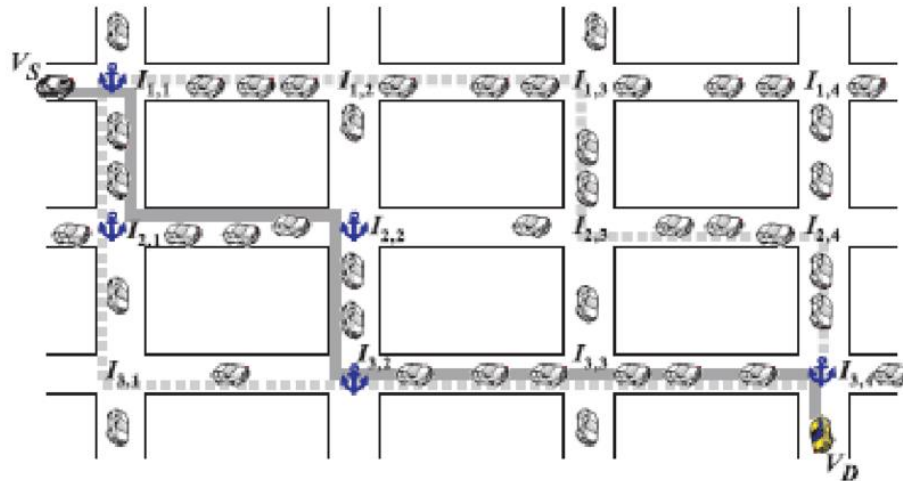
Στο πρωτόκολλο CBF υποτίθεται πως κάθε κόμβος γνωρίζει τη γεωγραφική του τοποθεσία. Επίσης, μέσω υπηρεσιών τοποθεσίας, ένας κόμβος γνωρίζει την τοποθεσία κάθε άλλου κόμβου που βρίσκεται μερικά hop μακριά είτε η θέση του προορισμού καθορίζεται μέσω κατάλληλης εφαρμογής ('geo-anycast'). Κάθε πακέτο στο CBF εμπεριέχει την τοποθεσία του κόμβου που μόλις το προώθησε (last-hop), το μοναδικό αναγνωριστικό και την τοποθεσία του τελικού προορισμού και ένα μοναδικό αναγνωριστικό πακέτου. Κόμβος ο οποίος παραλαμβάνει τέτοια πακέτα και δεν είναι ο τελικός προορισμός, θέτει ένα χρονόμετρο για να αποφασίσει πότε να προωθήσει το πακέτο. Η τιμή του χρονομέτρου υπολογίζεται με βάση την πρόοδο που επιφέρει ο κόμβος προς τον προορισμό του πακέτου. Για έναν κόμβο  $i$  η πρόοδος αυτή ορίζεται ως  $p_i = dist(l,d) - dist(i,d)$ , όπου  $dist$  είναι η ευκλείδεια απόσταση,  $l$  και  $d$  είναι οι θέσεις του 'last-hop' κόμβου και του τελικού προορισμού αντίστοιχα. Η τιμή του χρονομέτρου υπολογίζεται ως εξής:  $t = T(1 - (p_i/p_{max}))$  για  $0 \leq p_i < p_{max}$  ενώ το  $t$  απειρίζεται διαφορετικά. Το  $p_{max}$  συμβολίζει την μέγιστη ακτίνα εκπομπής του κόμβου και το  $T$  εκφράζει τη μέγιστη καθυστέρηση για να προωθηθεί το πακέτο. Η τελική τιμή του  $t$  αντικατοπτρίζει το πώς κάθε κόμβος συμμετέχει στην προσπάθεια προώθησης του πακέτου. Όταν το  $t$  είναι άπειρο, το πακέτο απορρίπτεται, αλλιώς ο κόμβος προωθεί το πακέτο μετά από  $t$  δευτερόλεπτα εκτός κι αν προηγηθεί η προώθηση πακέτου, με το ίδιο μοναδικό αναγνωριστικό, από άλλο κόμβο. Σε αυτή την περίπτωση, το χρονόμετρο ακυρώνεται. Επιπρόσθετα, κάθε κόμβος κρατά τα ID των πακέτων που έχουν προωθηθεί ώστε να αποφύγει την προώθηση των ίδιων πακέτων. Σε εφαρμογές δύο διαστάσεων είναι πιθανό οι κόμβοι που ανταγωνίζονται για την αποστολή του πακέτου, να μην μπορούν να αντιληφθούν την αποστολή του από άλλο κόμβο. Σε αστικό περιβάλλον, όμως, είναι

πρακτικά αδύνατο καθώς οι διαστάσεις του δρόμου θεωρούνται αμελητέες και ως εκ τούτου θεωρείται απίθανο να βρίσκονται κόμβοι σε σημεία που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε σενάρια ταυτόχρονης προώθησης του ίδιου πακέτου. Γι' αυτό, επιπλέον στρατηγικές, που επιλύουν αυτό το πρόβλημα, δεν έχουν την ίδια σημασία σε σχέση με τη γενική περίπτωση δύο διαστάσεων. Ακόμη, η διπλότυπη προώθηση πακέτων μπορεί να συμβεί όταν κατά την προώθηση του υπάρχει σύγκρουση πακέτων ή παρεμβολές. Σε αστικό περιβάλλον, ωστόσο, τα διπλότυπα αυτά έχουν μικρή διάρκεια ζωής καθώς το πακέτο φτάνει γρήγορα σε μια περιοχή όπου οι κόμβοι έχουν λάβει σωστά μια εκπομπή του, έχουν αποθηκεύσει το ID του και άρα αποφεύγουν να το προωθήσουν ξανά. Το πρωτόκολλο CBF επιτυγχάνει πολύ υψηλό ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων ενώ ταυτόχρονα όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταβάσεων κόμβων που πρέπει να πραγματοποιήσει ένα πακέτο, η επιβάρυνση που εισάγει το CBF φαίνεται να αυξάνεται ομαλώς και με πολύ χαμηλό ρυθμό.

## 2.14 CAR [15]

Το πρωτόκολλο CAR αποτελείται από τέσσερα κύρια στάδια: (1) ανακάλυψη μονοπατιού και τοποθεσίας προορισμού, (2) προώθηση πακέτων στο μονοπάτι, (3) συντήρηση των μονοπατιών με χρήση των guards και (4) επανάκαμψη από σφάλματα. Στο CAR, οι κόμβοι εκπέμπουν περιοδικά αναγνωριστικά μηνύματα που περιέχουν πληροφορίες για την κίνησή τους (διάνυσμα ταχύτητας). Όταν ένας κόμβος λάβει ένα τέτοιο μήνυμα, προσθέτει τον αποστολέα στον πίνακα γειτνίασης του, υπολογίζει το διάνυσμα ταχύτητας του και του αποστολέα και θέτει μια χρονική τιμή (timeout) στην καταχώρηση αυτή. Η καταχώρηση λήγει όταν δύο κόμβοι απομακρυνθούν περισσότερο από το 80% της περιοχής κάλυψής τους ή μετά από χρονικό διάστημα ίσο με δύο περιόδους αναγνωριστικών μηνυμάτων (για όποιο από τα δύο ενδεχόμενα συμβεί πρώτο). Νέα αναγνωριστικά μηνύματα ανανεώνουν την καταχώρηση. Στο CAR εισάγεται η έννοια του 'guard' ('standing' ή 'traveling') που συγκρατεί πληροφορίες που αφορούν μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Ο 'standing guard' (ή 'guard') διατηρείται από τους κόμβους που βρίσκονται στην περιοχή και αποτελεί μια καταχώρηση στο αναγνωριστικό μήνυμα που στέλνουν οι κόμβοι. Η καταχώρηση αυτή περιέχει ένα ID, ένα TTL, την τοποθεσία που βρίσκεται ο 'guard' και άλλες πληροφορίες που μεταδίδονται κανονικά μέσω των περιοδικών αναγνωριστικών μηνυμάτων. Κόμβοι με 'guard' μπορούν να μεταβάλλουν την πληροφορία των πακέτων κατά την προώθηση τους προς τον προορισμό. Το ID του 'guard' παράγεται από τον κόμβο που τον ενεργοποιεί και αποτελείται από την IP του κόμβου και τον μετρητή 'guards' του κόμβου που αυξάνεται κάθε φορά που ο κόμβος ενεργοποιεί έναν 'guard'. Η ηλικία του είναι μια TTL τιμή με ms που αρχικοποιείται από τον κόμβο που του τον ενεργοποίησε, ενώ

μειώνεται κάθε φορά που αναμεταδίδεται μέσω αναγνωριστικών μηνυμάτων. Κόμβοι που παραλαμβάνουν έναν ‘guard’, αλλά δε βρίσκονται εντός της εμβέλειας του, δε τον αναμεταδίδουν. Ένας ‘traveling guard’ διαθέτει ένα διάνυσμα ταχύτητας επιπλέον. Κάθε κόμβος στον οποίο αποστέλλεται, καταγράφει τη χρονική στιγμή που αυτός παρελήφθη. Όταν είναι η στιγμή για αναγνωριστικό μήνυμα, ο κόμβος υπολογίζει τη νέα θέση του ‘guard’ σε σχέση με την παλιά, το διάνυσμα ταχύτητας του και το χρόνο που παρήλθε από την παραλαβή του. Οι ‘traveling guards’ δύνανται να μεταφέρουν την πληροφορία κατά μήκος του δρόμου ενώ η ηλικία τους μειώνεται σε κάθε αναμετάδοση. Ένας κόμβος μπορεί να περιέχει διάφορους ‘guard’ για διαφορετικές εργασίες. Όταν αυτές ολοκληρωθούν, ο ‘guard’ μπορεί να απορριφθεί. Για την ανακάλυψη μονοπατιού προς τον προορισμό, ο κόμβος-πηγή εκδίδει ένα αίτημα. Οι ενδιαμέσοι κόμβοι προωθούν το αίτημα αυτό. Αν δύο κόμβοι βρίσκονται σε γωνία  $>18^\circ$  τότε τίθεται το anchor mode που περιέχει τις συντεταγμένες και το διάνυσμα ταχύτητας του τρέχοντος και του προηγούμενου κόμβου.



Εικόνα 17: Anchor mode στον CAR

Όταν ανακαλυφθεί η διαδρομή, μεταβιβάζεται στον κόμβο-πηγή. Κατά την άπληστη προώθηση ενός πακέτου, σε ένα ‘anchored’ μονοπάτι, επιλέγονται κόμβοι που βρίσκονται πιο κοντά στο επόμενο σημασμένο σημείο, παρά στον προορισμό. Αν ένας κόμβος-προορισμός αλλάξει θέση ή κατεύθυνση, τότε ένας ‘standing guard’ ενεργοποιείται για την διατήρηση του μονοπατιού, ενώ αν ένας κόμβος αρχίσει να κινείται αντίθετα από τη φορά της ροής πληροφοριών, ενεργοποιείται ένας ‘traveling guard’ που λειτουργεί ως η προηγούμενη θέση του κόμβου-προορισμού και προωθεί τα δεδομένα σε αυτόν. Για την επανάκαμψη από λάθη, υπάρχουν δύο τεχνικές στο πρωτόκολλο CAR. Αν ένας κόμβος εντοπίσει κάποιο κενό στην επικοινωνία αποθηκεύει τα πακέτα που παραλαμβάνει και προσπαθεί να εντοπίσει κάποιον κόμβο για να τα



προωθήσει. Ακόμη, αν ένας κόμβος αδυνατεί να εντοπίσει τον προορισμό στην εκτιμώμενη του θέση, ξεκινά μια διαδικασία ανακάλυψης μονοπατιού. Αν αποτύχει, ο κόμβος-πηγή ξεκινά μια νέα προσπάθεια ανακάλυψης μονοπατιού ενώ αν επιτύχει, το νέο μονοπάτι αποστέλλεται στον κόμβο-πηγή ο οποίος αναλύει το νέο μονοπάτι και ξεκινά μια νέα αναζήτηση μονοπατιού αν βρίσκεται πιο κοντά στον προορισμό από τον προηγούμενο κόμβο. Το πρωτόκολλο CAR αποδίδει καλύτερα σε αστικό περιβάλλον σε σχέση με το GPSR σε ότι αφορά το ποσοστό επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων, τη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση και τις επιπλέον πληροφορίες που επιβαρύνουν τα πακέτα. Η βελτίωση αυτή αφορά όλες τις πυκνότητες οδικής κυκλοφορίας.

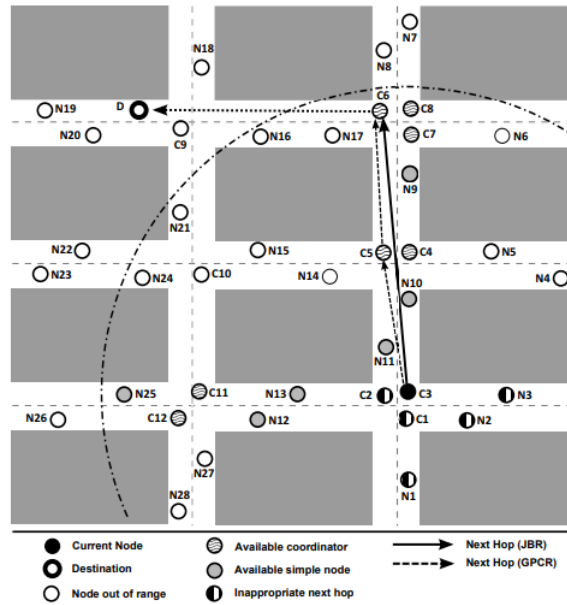
## 2.15 EBGR [16]

Στον EBGR υποτίθεται ότι όλοι οι κόμβοι διαθέτουν σύστημα GPS μέσω του οποίου δύνανται να προσδιορίσουν τη δική τους θέση και των υπόλοιπων κόμβων. Ακόμη, τα διαθέσιμα μονοπάτια επικοινωνίας είναι μόνο μέσω του ad-hoc δικτύου. Το EBGR έχει έξι βασικά λειτουργικά κομμάτια: 1) Το NNI, δηλαδή την αναγνώριση γειτονικών κόμβων μέσω λιστών γειτνίασης και περιοδικών αναγνωριστικών μηνυμάτων, που περιέχουν το μοναδικό αναγνωριστικό των κόμβων, την τοποθεσία τους και τη χρονική στιγμή που αυτό εκπέμφθηκε. Αν ένας κόμβος δεν εκπέμψει αναγνωριστικό μήνυμα για πάνω από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τότε διαγράφεται από τη λίστα. 2) Τον υπολογισμό της απόστασης και της θέσης των κόμβων η οποία μπορεί να υπολογιστεί μέσω συστημάτων GPS και να μεταδοθεί στους υπόλοιπους κόμβους μέσω μηνυμάτων. 3) Αναγνωρίζονται οι κόμβοι οι οποίοι κινούνται προς τον προορισμό μέσω του συνημιτόνου της γωνίας του διανύσματος της ταχύτητας τους με το διάνυσμα του προορισμού. Μια μεγάλη τιμή συνημιτόνου υποδεικνύει ότι ένας κόμβος κινείται προς τον προορισμό. 4) Κάθε κόμβος εκτιμά την σταθερότητα της σύνδεσης του με τους γειτονικούς του προτού επιλέξει αυτόν που θα προωθήσει τα δεδομένα. Αφού υπολογιστεί η σταθερότητα για κάθε γειτονικό κόμβο, ο EBGR επιλέγει τον κόμβο που έχει την μεγαλύτερη σταθερότητα ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η απώλεια πακέτων. 5) Το δυναμικό κάθε γειτονικού κόμβου υπολογίζεται και εκφράζει την πιθανότητα ένας κόμβος να μεταφέρει επιτυχώς τα δεδομένα στον προορισμό. Για να υπολογιστεί το δυναμικό, λαμβάνονται υπ' όψιν η απόσταση κάθε κόμβου από τον προορισμό, η κατεύθυνση της κίνησης των κόμβων αλλά και η σταθερότητα τους. 6) Επιλέγονται οι κόμβοι που τελικά θα προωθηθεί το πακέτο. Οι κόμβοι αυτοί απέχουν το λιγότερο από τον προορισμό και βρίσκονται σε διάφορες αποστάσεις από τον κόμβο αποστολέα. Η ακτίνα εκπομπής ενός κόμβου διαμερίζεται σε τέσσερα τμήματα και κόμβοι επιλέγονται για κάθε τμήμα ώστε να αποφευχθεί η απώλεια πακέτων λόγω της κινητικότητας των οχημάτων. Οι κόμβοι αυτοί αναλαμβάνουν να αποθηκεύουν τα πακέτα που έλαβαν και να τα προωθούν όταν βρουν νέους γειτονικούς κόμβους, με κύριο

σκοπό αυτά να προωθηθούν το συντομότερο δυνατό. Αν δε βρεθεί κάποιος κόμβος στην ακτίνα εκπομπής του κόμβου-πηγής, τότε το πακέτο αποθηκεύεται ώσπου να ανιχνευθεί νέος κόμβος εντός της ακτίνας εκπομπής. Ο EBGR βελτιώνει άλλους αλγόριθμους (GPSR, PDGR) σε ό,τι αφορά το ποσοστό των παραδιδόμενων πακέτων συναρτήσει της ακτίνας εκπομπής, της ταχύτητας αλλά και του πλήθους των κόμβων.

## 2.16 JBR [17]

Το πρωτόκολλο JBR καλεί κόμβους που βρίσκονται σε διασταυρώσεις ‘συντονιστές’ ενώ καλεί ‘απλούς’ τους κόμβους που βρίσκονται κατά μήκος ενός δρόμου. Υποθέτει ότι κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με ένα σύστημα GPS για να μπορεί να προσδιορίσει τη θέση του αλλά και ψηφιακό χάρτη του οδικού δικτύου στο οποίο κινείται. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω λειτουργιών από τον κόμβο, του παρέχει τη γνώση για το αν είναι συντονιστής ή απλός κόμβος και ως εκ τούτου δεν απαιτούνται αναγνωριστικά μηνύματα, σε αντίθεση με άλλα πρωτόκολλα, ώστε να προσδιοριστεί ο τύπος του κόμβου. Κάθε κόμβος εκπέμπει περιοδικά αναγνωριστικά μηνύματα τα οποία περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τις συντεταγμένες του καθώς και ένα πεδίο (iscoord\_) που δηλώνει το αν ο κόμβος αυτός είναι συντονιστής ή όχι. Όταν ληφθεί από έναν κόμβο ένα αναγνωριστικό μήνυμα εκείνος αποθηκεύει την IP διεύθυνση, τις συντεταγμένες, τη χρονική στιγμή που λήφθηκε το μήνυμα καθώς και την τιμή του πεδίου iscoord\_ του κόμβου που το έστειλε. Αν σε επόμενη χρονική στιγμή ληφθεί νέο μήνυμα από τον ίδιο κόμβο, τότε ο παραλήπτης ανανεώνει την καταχώρηση που ήδη έχει ενώ αν δε λάβει μήνυμα από τον συγκεκριμένο κόμβο για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, τότε η καταχώρηση για αυτό τον κόμβο σβήνεται από τη λίστα γειννίας. Ακόμη, κάθε κόμβος για να στείλει ένα μήνυμα πρέπει να ξέρει την ακριβή θέση του προορισμού κάθε στιγμή γι’ αυτό κάθε κόμβος-προορισμός εκπέμπει πολλά περιοδικά μηνύματα που περιέχουν τις συντεταγμένες του ώστε ο αποστολέας να ξέρει τη θέση του. Κατά την προώθηση ενός μηνύματος από έναν κόμβο προς τον προορισμό και αν ο δεύτερος δεν είναι εντός της , διακρίνονται δύο περιπτώσεις : 1) Αν ο κόμβος είναι απλός, τότε ψάχνει τους κόμβους που βρίσκονται πλησιέστερα στον προορισμό από τον ίδιο και αυτοί χωρίζονται σε συντονιστές και απλούς. Αν υπάρχουν διαθέσιμοι συντονιστές, τότε το πακέτο προωθείται σε αυτόν που βρίσκεται πιο κοντά στον προορισμό αλλιώς το πακέτο προωθείται στον απλό κόμβο που βρίσκεται πιο κοντά στον προορισμό. 2) Αν ο κόμβος είναι συντονιστής, εξετάζεται η λίστα γειννίας, απομονώνονται οι κόμβοι που βρίσκονται πιο κοντά στον προορισμό και χωρίζονται σε συντονιστές που βρίσκονται σε διαφορετικές διασταυρώσεις και σε απλούς κόμβους. Από αυτούς επιλέγεται αρχικά ένας συντονιστής που βρίσκεται πιο κοντά στον προορισμό και αν δεν υπάρχει συντονιστής τότε το πακέτο προωθείται στον απλό κόμβο που βρίσκεται πιο κοντά στον προορισμό.



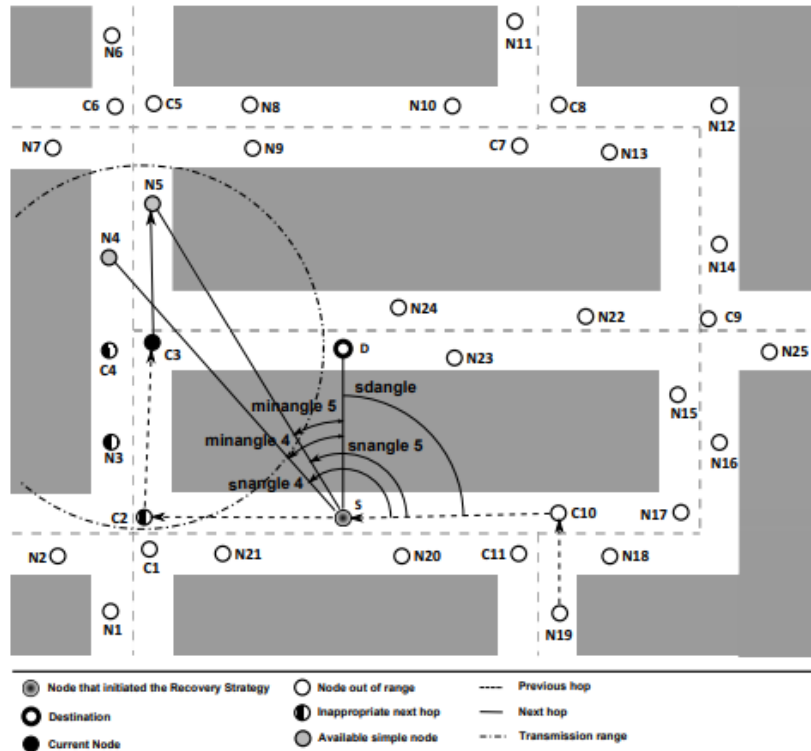
Εικόνα 18: Επιλογή Next Hop στον JBR

Η στρατηγική επανάκαμψης από αδιέξοδα που χρησιμοποιείται από το JBR ελέγχει αρχικά αν ο προορισμός βρίσκεται εντός της εμβέλειας αλλιώς διακρίνει δύο περιπτώσεις επανάκαμψης. Από απλό κόμβο ή από κόμβο-συντονιστή. 1) Αν ο κόμβος είναι απλός και εκπέμπει το μήνυμα, τότε διαχωρίζει τους γειτονικούς του σε συντονιστές και απλούς κόμβους και επιλέγει αρχικά συντονιστές αλλιώς απλούς κόμβους. 2) Αν ο κόμβος είναι απλός και προωθεί το μήνυμα, τότε ανατρέχει στη λίστα γειτνίασης του και διαχωρίζει τους κόμβους που βρίσκονται μπροστά από αυτόν στη φορά κατά την οποία λήφθηκε το πακέτο. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$(nldis > cldis) \text{ AND } (nldis > mndis) ,$$

όπου  $cldis$  είναι η απόσταση μεταξύ του τρέχοντος και του προηγούμενου κόμβου,  $nldis$  είναι η απόσταση μεταξύ του προηγούμενου κόμβου και του υποψήφιου για προώθηση κόμβου και  $mndis$  είναι η απόσταση μεταξύ του τρέχοντος και του υποψήφιου κόμβου. Αφού διαχωριστούν οι κόμβοι κατ' αυτό το κριτήριο και σε συντονιστές και απλούς, το πακέτο προωθείται κατά σειρά στον πλησιέστερο στον προορισμό συντονιστή, αν είναι διαθέσιμος, αλλιώς στον πλησιέστερο απλό κόμβο στον προορισμό. 3) Αν ένας συντονιστής είναι και εκπομπός του μηνύματος, τότε διαχωρίζει τους κόμβους σε απλούς και συντονιστές σε διαφορετικές διασταυρώσεις και προωθεί αρχικά σε συντονιστή αλλιώς σε απλό κόμβο. 4) Αν ένας συντονιστής προωθεί ένα μήνυμα τότε ελέγχει αρχικά αν βρίσκεται στον ίδιο δρόμο με τον προορισμό. Αν δε βρίσκεται, τότε απομονώνει τους γειτονικούς του κόμβους που δε βρίσκονται πίσω του και τους διαχωρίζει σε συντονιστές και απλούς κόμβους. Αν βρεθούν συντονιστές που πληρούν τα παραπάνω κριτήρια, τότε





Εικόνα 20: Recovery mode στον JBR όταν δεν υπάρχουν άλλοι συντονιστές

Αν δεν υπάρχουν τέτοιοι συντονιστές ή απλοί κόμβοι, τότε δεν υπάρχουν κόμβοι μεταξύ του τρέχοντα συντονιστή και του προορισμού. Τότε, ακυρώνονται οι παραπάνω διαχωρισμοί και επιλέγεται ο κόμβος που σχηματίζει τη μικρότερη γωνία με τον προορισμό. Τέλος, αν δεν υπάρχει κανένας κατάλληλος γειτονικός κόμβος, το πακέτο απορρίπτεται. Το JBR βελτιώνει τον GPCR σε ότι αφορά την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση για εμβέλεια μεγαλύτερη των 250μ, βελτιώνει κατά πολύ το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων και δεν παρουσιάζει μεγάλη βελτίωση σε ότι αφορά τον μέσο αριθμό των hops για κάθε πακέτο και για διάφορες εμβέλειες.

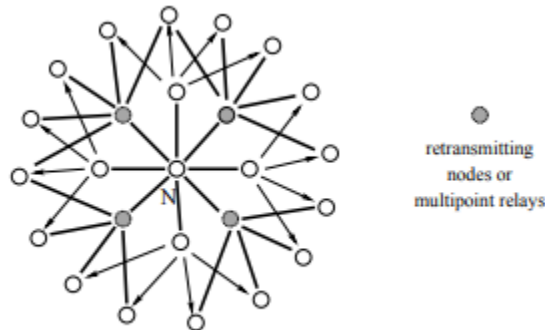
## 2.17 GPSR-N [18]

Το πρωτόκολλο GPSR-N αποτελεί μια τροποποίηση του πρωτοκόλλου GPSR που αντί να εστιάζει στην εύρεση του κόμβου προορισμού, προσπαθεί να βρει τις συντεταγμένες του τελικού κόμβου. Η κεντρική ιδέα είναι ότι μετά την εύρεση της θέσης του κόμβου προορισμού, η δρομολόγηση των δεδομένων σε αυτόν είναι δεδομένη. Έτσι, οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους με τελικό σκοπό να βρουν τις συντεταγμένες του προορισμού και όχι τον τελικό κόμβο. Το κύριο πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει ο

αλγόριθμος είναι η επιλογή της καλύτερης διασταύρωσης. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός μερικών υποπεριπτώσεων. Αν το πακέτο προσανατολίζεται στις ίδιες συντεταγμένες με τον τελικό προορισμό, τότε η δρομολόγηση είναι εύκολη. Αν το πακέτο κινείται σε δρόμο με συντεταγμένες κάθετες σε αυτές του τελικού προορισμού, τότε δρομολογείται προς τον τελικό προορισμό εως ότου βρει τις τελικές συντεταγμένες του προορισμού. Αν ο κόμβος περάσει αυτές τις συντεταγμένες χωρίς να βρει κάποιο όχημα σε διασταύρωση, τότε επιλέγεται το πακέτο να γυρίσει προς τα πίσω και να δρομολογηθεί μέσω διασταυρώσεων με την καλύτερη πυκνότητα κόμβων. Αν το πακέτο βρει τις συντεταγμένες του προορισμού, τότε η δρομολόγηση ολοκληρώνεται εύκολα. Στην περίπτωση που το πακέτο κινείται σε συντεταγμένες παράλληλες του προορισμού, τότε ο κόμβος προσπαθεί να βρει τη διασταύρωση με την καλύτερη πυκνότητα κόμβων που έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να φτάσει σε συντεταγμένες που είναι κάθετες στον προορισμό και να δράσει σύμφωνα με τα παραπάνω. Αν το πακέτο δεν μπορεί να δρομολογηθεί στην κατεύθυνση των τελικών συντεταγμένων, επιλέγονται τυχαίες συντεταγμένες και ξεκινά μια αναζήτηση για τη διασταύρωση με την καλύτερη πυκνότητα κόμβων και ακολούθως το πακέτο δρομολογείται όπως περιγράφηκε παραπάνω. Το πρωτόκολλο GPSR-N βελτιώνει σημαντικά, σε ότι αφορά το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων, τα GPSR, GPCR, GPSR-M ενώ διατηρεί χαμηλά την από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση συγκριτικά με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα σε διαφορετικά σενάρια τοπολογιών αλλά και με διάφορες πυκνότητες κόμβων. Ακόμη, ο αλγόριθμος εμφανίζει μεγαλύτερη σταθερότητα στα αποτελέσματα που παράγει.

## 2.18 OLSR [19]

Το πρωτόκολλο OLSR βασίζεται στην εκπομπή περιοδικών μηνυμάτων (HELLO messages) για τη συλλογή πληροφορίας από κάθε κόμβο σχετικά με τους γειτονικούς του. Ακόμη, κάθε κόμβος επιλέγει έναν αριθμό από γειτονικούς του κόμβους ως “Multipoint Relays” (MPR) ώστε κάθε μήνυμα από τον κόμβο αυτό, να διαδοθεί σε όλους τους γειτονικούς που βρίσκονται σε απόσταση 2 hops.



Εικόνα 21: Multi-Point Relay στον OLSR

Με αυτό τον τρόπο, κάθε κόμβος είναι σε θέση να διαμορφώσει τον πίνακα δρομολόγησής του. Το OLSR υλοποιεί την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιώντας μια ενοποιημένη μορφή πακέτου για όλα τα δεδομένα με σκοπό να διευκολύνει την επεκτασιμότητα του δίχως να αναιρεί την «αντίστροφη» συμβατότητα. Κατ' αυτό τον τρόπο είναι πιο εύκολη η προσαρμογή των μηνυμάτων ώστε να καταλαμβάνουν όλο το μέγεθος του πλαισίου που τους διατίθεται. Κάθε πακέτο που μεταδίδεται, ενθυλακώνει ένα ή περισσότερα μηνύματα τα οποία έχουν κοινή μορφή κεφαλίδας γεγονός που διευκολύνει τους κόμβους να δεχθούν τα μηνύματα αυτά και (αν μπορούν) να τα προωθήσουν. Μηνύματα μπορούν να διαδοθούν (μέσω flooding) σε ολόκληρο το δίκτυο ή να περιοριστούν σε συγκεκριμένη απόσταση, εκφρασμένη σε αριθμό hops, από τον κόμβο-πηγή. Όταν ένας κόμβος παραλαμβάνει ένα πακέτο, εξετάζει τις επιμέρους κεφαλίδες των μηνυμάτων και αποφασίζει εάν αυτά απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία ή θα αν θα συνεχιστεί η προώθηση τους στο δίκτυο. Η προώθηση του μηνύματος θα γίνει μόνο εάν αυτό δεν έχει διέλθει ξανά από τον συγκεκριμένο κόμβο ή αν δεν έχει μεταδοθεί προγενέστερα και αν αυτό προέρχεται από μια πηγή στην οποία ο τρέχων κόμβος έχει επιλεγεί να είναι MPR, με το μήνυμα να έχει τιμή του TTL μεγαλύτερη του '1'. Αν πληρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις, τότε το TTL μηνύματος μειώνεται κατά 1 και το hop-count αντίστοιχα, αυξάνεται κατά 1. Το πρωτόκολλο OLSR εμφανίζει ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε ότι αφορά το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων, για διάφορες πυκνότητες κόμβων, σε σχέση με τον AODV ενώ επίσης βελτιώνει και την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση που εισάγεται κατά την προώθηση των πακέτων από τον κόμβο-πηγή στον τελικό προορισμό.





## Κεφάλαιο 3

### Αξιολόγηση Απόδοσης των πρωτοκόλλων

#### 3.1 Παράμετροι Προσομοίωσης

Για την αξιολόγηση της απόδοσης των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε διάφορα σενάρια στον προσομοιωτή δικτύου NS3. Στις προσομοιώσεις αυτές δημιουργήθηκαν 3 διαφορετικά μοντέλα πόλης τύπου Manhattan grid, σε μεγέθη 4x4, 6x6 και 8x8. Σε κάθε σενάριο, το μήκος του δρόμου ήταν 130 μέτρα, το πλάτος του 20 μέτρα ενώ έγιναν προσομοιώσεις για 4 διαφορετικές πυκνότητες κόμβων-οχημάτων στο πλέγμα.

Για την παραγωγή του σεναρίου κίνησης των κόμβων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Bonnmotion [20], το οποίο είναι ένα εργαλείο για Mobility Scenario Generation and Analysis. Οι κόμβοι κινούνται με μέση ταχύτητα 11 m/s και ορίστηκαν 5 ζευγάρια κόμβων οι οποίοι θα επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Κάθε ζευγάρι κόμβων στέλνει από 100 πακέτα δεδομένων μεγέθους 128 bytes ανά 0,1 δευτερόλεπτα.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία προσομοιώθηκαν είναι τα AODV, DSR, GPSR, GPCR, GPSR-N και οι μετρικές για τις οποίες θα αξιολογηθούν είναι το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων που πέτυχαν αλλά και η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση που εισάγουν. Το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων (PDR) εκφράζει τον αριθμό των πακέτων που παραδίδονται στον κόμβο-προορισμό με επιτυχία ως προς το συνολικό αριθμό των πακέτων που αρχικά αποστέλλονται. Η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση δηλώνει τον χρόνο που απαιτείται για τη δρομολόγηση ενός πακέτου από τον κόμβο-πηγή στον κόμβο-προορισμό. Η τιμή της συγκεκριμένης μετρικής προκύπτει από πολλαπλές εκτελέσεις των ίδιων σεναρίων σε κάθε περίπτωση. Περισσότερες εκτελέσεις του ίδιου σεναρίου οδηγούν σε σταθεροποίηση των τιμών των αποτελεσμάτων αυξάνοντας την αξιοπιστία.

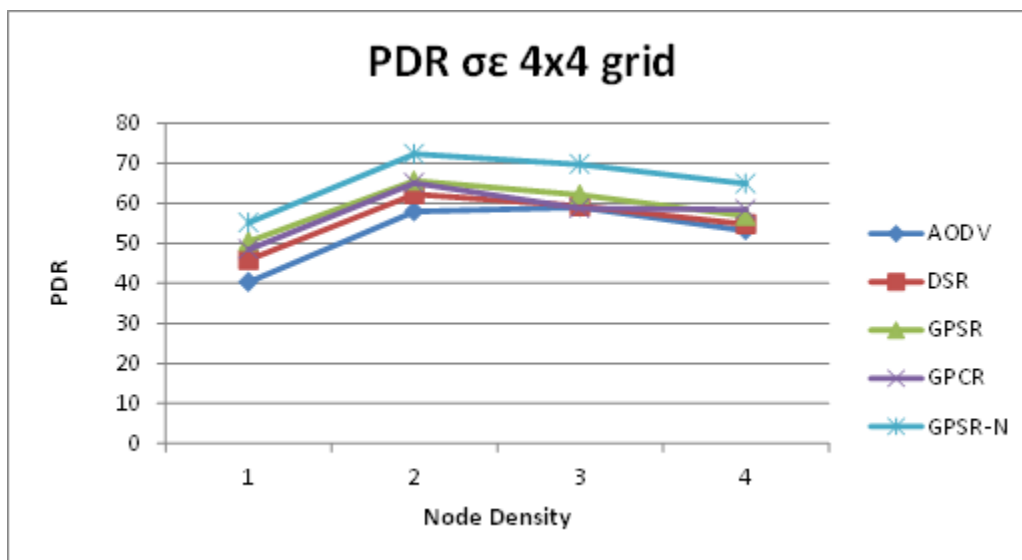
Λόγω της τυχαιότητας των τοπολογιών που παρήχθησαν και για να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα, η κάθε προσομοίωση με συγκεκριμένο πλήθος κόμβων και συγκεκριμένο πρωτόκολλο έγινε 5 φορές με διαφορετικό σενάριο κίνησης κάθε φορά. Με χρήση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επαναληπτική εκτέλεση των πρωτοκόλλων, εξάγονται μέσοι όροι των μετρικών αξιολόγησης των πρωτοκόλλων. Έτσι επιτυγχάνεται μια πιο ακριβής προσέγγιση της πραγματικότητας και εξαλείφονται ακραίες περιπτώσεις που πιθανόν να τυχαίνουν σε κάποια από τις εκτελέσεις της προσομοίωσης.

Οι παράμετροι της προσομοίωσης φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα

Παράμετροι Προσομοίωσης	
Πλήθος κόμβων που επικοινωνούν	10 κόμβοι (5 ζευγάρια)
Μέγεθος πακέτων	128 bytes
Πλήθος πακέτων ανά ζεύγος κόμβων	100 πακέτα
Συνολικό πλήθος πακέτων	500 πακέτα
Είδος τοπολογίας	Manhattan Grid
Μεγέθη πόλης	4x4 , 6x6, 8x8
Μήκος δρόμου	130 m
Πλάτος δρόμου	20 m
Μέση ταχύτητα κόμβων	11 m/s

## 3.2 Αποτελέσματα σε μικρό Grid

### 3.2.1 PDR σε μικρό Grid



Εικόνα 22: PDR σε 4x4 Manhattan Grid, ο GPSR-N αποδίδει βέλτιστα

Στην περίπτωση του 4x4 Manhattan Grid παρατηρείται ότι ο GPSR-N αποδίδει καλύτερα από τα άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης σε ότι αφορά το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων. Ακολουθούν με λίγο χαμηλότερα ποσοστά, τα πρωτόκολλα GPSR και GPCR με πολύ παρόμοια απόδοση. Τα πρωτόκολλα AODV και DSR εμφανίζουν ελαφρώς χειρότερη απόδοση σε σχέση με τα GPSR και GPCR ενώ είναι λιγότερο αποτελεσματικά σε σχέση με το GPSR-N παρουσιάζοντας μια διαφορά της τάξεως του 10-15% στο ποσοστό επιτυχημένων παραδόσεων.

Ο GPSR-N προσπαθεί να βρει όλες τις δυνατές διαδρομές προς τον τελικό προορισμό αντί να στοχεύει σε αυτόν, καθώς μετά την εύρεση των διαδρομών είναι αναπόφευκτη η δρομολόγηση του πακέτου προς αυτόν. Ως εκ τούτου, σε αραιές τοπολογίες όπου η πυκνότητα των οχημάτων είναι σχετικά χαμηλή, τα οχήματα στις διασταυρώσεις προσπαθούν να ανακαλύψουν τις πιθανές διαδρομές προς τον προορισμό παρέχοντας κατ' αυτό τον τρόπο υψηλό PDR παρά την αραιή τοπολογία. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα των οχημάτων στο πλέγμα, η απόδοση του GPSR-N βελτιώνεται καθώς σχηματίζονται πολλά μονοπάτια προς τον προορισμό. Κατ' αυτό τον τρόπο, αυξάνεται το PDR καθώς το πρωτόκολλο είναι σε θέση να διαλέξει το μονοπάτι δρομολόγησης από πολλά διαφορετικά και να εγγυηθεί εν τέλει την παράδοση του πακέτου με μεγαλύτερη πιθανότητα.

Ο GPSR δρομολογεί τα πακέτα με άπληστη προώθηση κινούμενα προς τον τελικό προορισμό. Καταφέρνει να διατηρήσει σχετικά υψηλό ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων σε χαμηλές πυκνότητες οχημάτων χάρη στο recovery mode που διαθέτει όταν συναντώνται αδιέξοδα κατά την προώθηση πακέτου, το οποίο εξασφαλίζει την παράδοση του από εναλλακτικά μονοπάτια με μεγαλύτερο μήκος. Οι αραιές τοπολογίες κόμβων οδηγούν το πρωτόκολλο σε ελαφρώς μειωμένο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων καθώς η απουσία κόμβων ικανών να προωθήσουν το πακέτο ή να εξασφαλίσουν εναλλακτικό μονοπάτι για την προώθηση του, οδηγεί σε απόρριψη του. Σε πυκνότερες –σε κόμβους- τοπολογίες, το πρωτόκολλο μπορεί να εντοπίσει με μεγαλύτερη πιθανότητα εκείνους που βρίσκονται πιο κοντά στον προορισμό ή να καταφέρει να προωθήσει το πακέτο σε recovery mode με επιτυχία. Συνεπώς, ένα πακέτο είναι πιθανότερο να παραδοθεί σε μεγαλύτερες πυκνότητες κόμβων. Πιθανή μείωση του ποσοστού παραδιδόμενων πακέτων σε τοπολογίες υψηλής πυκνότητας οφείλεται σε «κενά» του δικτύου που οδηγούν σε απώλεια συνδεσιμότητας των κόμβων και άρα απόρριψης μερικών πακέτων.

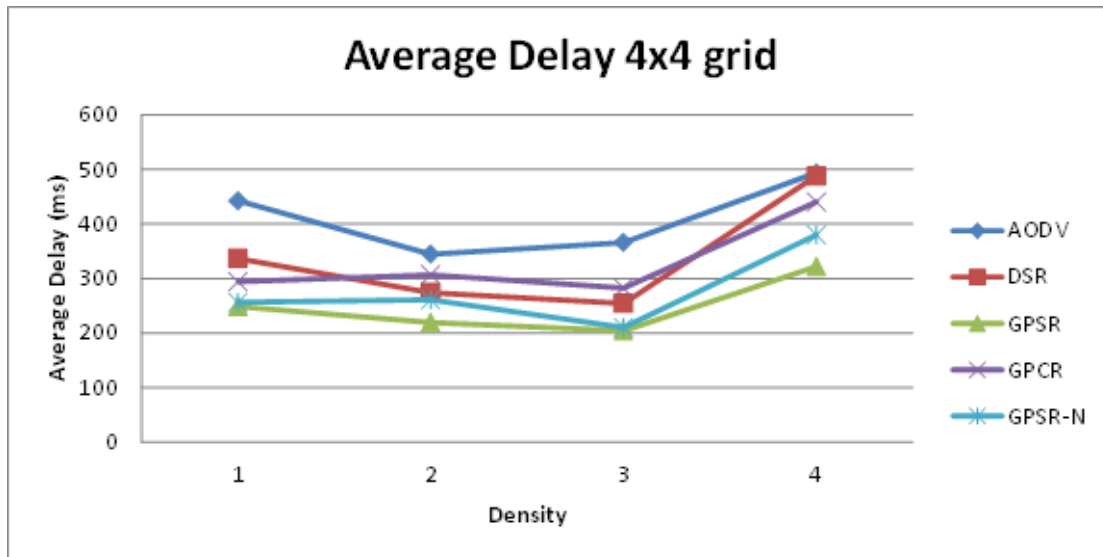
Ο GPCR, λόγω των συντονιστών που χρησιμοποιεί στις διασταυρώσεις, είναι πιθανόν να παρουσιάσει χαμηλότερο PDR σε πιθανή απουσία συντονιστή. Επίσης, αν δεν υπάρχει κόμβος σε διασταύρωση ώστε να λειτουργήσει ως συντονιστής, τότε το πακέτο μεταβαίνει σε recovery mode ώσπου να φτάσει σε πλησιέστερο κόμβο. Κατ' αυτό τον τρόπο, γίνεται μια προσπάθεια να δρομολογηθεί το πακέτο, η οποία σε αραιές τοπολογίες είναι πιθανό να αποτύχει. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων, αυξάνεται και ανάλογα η πιθανότητα επιτυχημένης παράδοσης πακέτων και άρα η τιμή του PDR. Η

τιμή αυτή μπορεί να επηρεαστεί σε πυκνότερες τοπολογίες από τη συμπτωματική απουσία συντονιστών από τις διασταυρώσεις και άρα την αδυναμία της περαιτέρω προώθησης πακέτων.

Σε ότι αφορά τον DSR, τα μονοπάτια που ανακαλύπτονται μέσω των RREQ είναι ικανά να παρέχουν με σχετική αξιοπιστία μια διαδρομή για τη δρομολόγηση του πακέτου, ωστόσο σε χαμηλές πυκνότητες είναι πιθανό να μην υφίσταται το απαραίτητο connectivity μεταξύ των κόμβων. Ακόμη, είναι πιθανό ένα μονοπάτι να καταρριφθεί και η εκ νέου εγκαθίδρυση σύνδεσης να είναι αδύνατη με συνέπεια την απώλεια πακέτων και τη μείωση του PDR. Η αύξηση της πυκνότητας των κόμβων παρατηρείται πως επιφέρει και παράλληλη αύξηση των παραδιδόμενων πακέτων καθώς δημιουργούνται πιο «ισχυρά» μονοπάτια τα οποία ακόμα και σε περίπτωση που καταστούν ανενεργά μπορούν να επισκευαστούν με μεγαλύτερη επιτυχία και το πακέτο να παραδοθεί με μεγαλύτερη πιθανότητα.

Τέλος, ο AODV λειτουργεί αρκετά παρόμοια με τον DSR στη φιλοσοφία της ανακάλυψης μονοπατιών. Στις αραιές τοπολογίες, το μονοπάτι που σχηματίζεται, είναι πολύ αδύναμο σε περίπτωση βλάβης σε αυτό καθώς είναι πιθανή η αδυναμία εύρεσης εναλλακτικού μονοπατιού. Αυτό οδηγεί σε μικρότερο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων. Επιπρόσθετα, όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος σε ένα μονοπάτι κινείται και χαλάει τη σύνδεση, τότε αυτή πρέπει να επιδιορθωθεί με πιθανό κόστος στο PDR ενώ εμφανίζονται περιπτώσεις ασυνέπειας στα μονοπάτια μετάδοσης όταν ο αύξων αριθμός των δεδομένων της πηγής είναι αρκετά παλιός και οι ενδιάμεσοι κόμβοι έχουν μεγαλύτερο αλλά όχι τον τελευταίο αύξων αριθμό. Έτσι μπορεί το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων να μειωθεί περαιτέρω. Όταν αυξάνεται το πλήθος των κόμβων, ο AODV αντίστοιχα με τον DSR μπορεί να δημιουργεί μονοπάτια που θα παραδώσουν τα πακέτα με μεγαλύτερη επιτυχία. Η κινητικότητα των κόμβων που συμμετέχουν σε μονοπάτια μπορεί ακόμη να επηρεάσει την πιθανότητα παράδοσης ενός πακέτου.

### 3.2.2 Average Delay σε μικρό Grid



Εικόνα 23: Average Delay σε 4x4 Manhattan Grid. Οι GPSR-N και GPSR αποδίδουν καλύτερα σε σχέση με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα

Σε ό,τι αφορά τη μέση καθυστέρηση, οι GPSR και GPSR-N καταφέρνουν να αποδώσουν καλύτερα σε σχέση με τα άλλα πρωτόκολλα. Η άπληστη προώθηση πακέτων στον GPSR στοχεύει την όσο το δυνατόν γρηγορότερη προσέγγιση του τελικού κόμβου ενώ και ο GPSR-N μέσω της προσέγγισης της θέσης του τελικού κόμβου προορισμού, καταφέρνει την παράδοση του πακέτου συντομότερα από τα υπόλοιπα πρωτόκολλα. Σε αραιές τοπολογίες, είναι πιθανόν τα δύο προαναφερθέντα πρωτόκολλα να μεταβούν σε recovery mode και άρα να εμφανίσουν μεγαλύτερη καθυστέρηση μέχρι την παράδοση του πακέτου. Όσο η πυκνότητα των κόμβων αυξάνεται, ανακαλύπτονται πιθανώς συντομότερα μονοπάτια προς τον προορισμό που δύνανται να μειώσουν την καθυστέρηση παράδοσης του πακέτου. Πιθανή αύξηση του χρόνου παράδοσης ενός πακέτου σε πυκνότερες τοπολογίες είναι πιθανό να οφείλεται σε παρουσία «κενών» κατά τη δρομολόγηση του πακέτου και άρα σε ανάγκη μετάβασης σε recovery mode που εισάγει καθυστέρηση στην προώθηση του πακέτου.

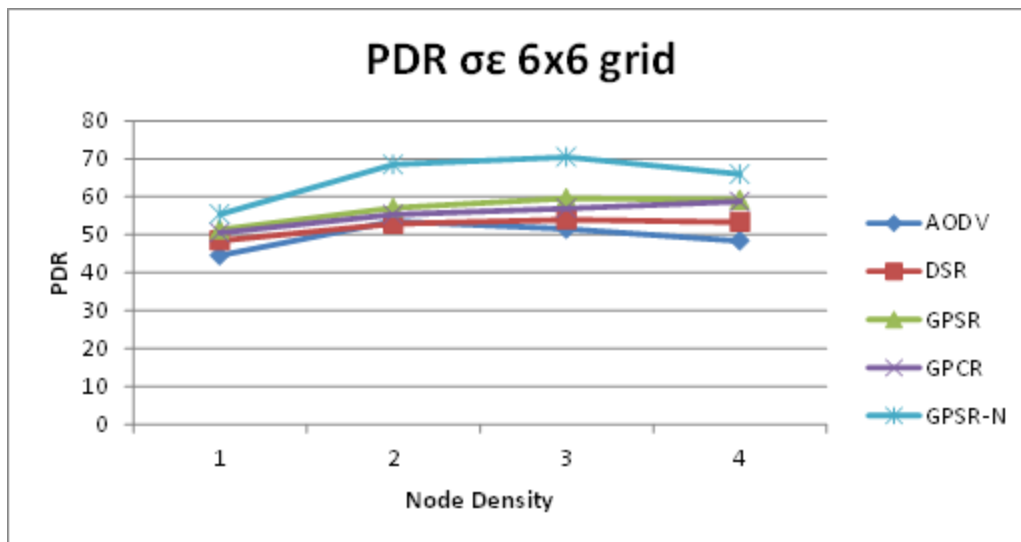
Σε ό,τι αφορά τον GPCR, παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων και η παρουσία των συντονιστών στις διασταυρώσεις, η καθυστέρηση παραμένει σταθερά χαμηλή καθώς το πακέτο μπορεί να δρομολογηθεί μέσω αυτών προς τον τελικό προορισμό. Η αύξηση που παρατηρείται στον χρόνο καθυστέρησης για μεγάλη πυκνότητα οχημάτων, είναι πιθανό να οφείλεται στη μορφή της τοπολογίας που απαιτεί την παράδοση πακέτων απομακρυσμένων κόμβων και άρα από μεγαλύτερες διαδρομές.

Ακολουθώς, ο DSR παρουσιάζει αρχικά σχετικά χαμηλή καθυστέρηση για την παράδοση ενός πακέτου και συγκρίσιμη με τους χρόνους των παραπάνω αλγορίθμων. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα των οχημάτων, ο DSR μπορεί να ανακαλύψει καλύτερα μονοπάτια και πιο «ισχυρά» ώστε να παραδώσει το πακέτο στον τελικό προορισμό. Μονοπάτια τα οποία «καταστρέφονται» είναι δυνατόν να επισκευαστούν άμεσα και με μικρό κόστος στον χρόνο παράδοσης χωρίς να επηρεαστεί η προώθηση του πακέτου με επιλογή εναλλακτικού μονοπατιού. Η περίπτωση υψηλής καθυστέρησης με παράλληλη υψηλή πυκνότητα κόμβων μπορεί να προκύπτει από την επικοινωνία κόμβων που βρίσκονται πιο σε πιο μεγάλη απόσταση μεταξύ τους σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια, αυξάνοντας την καθυστέρηση ελαφρώς.

Τέλος, ο AODV, διαθέτοντας παρόμοια φιλοσοφία προώθησης πακέτων με τον DSR, παρουσιάζει αυξημένη από άκρο σε άκρο καθυστέρηση σε σχέση με τα άλλα πρωτόκολλα. Όσο αυξάνεται το πλήθος των κόμβων που λαμβάνουν μέρος στην προώθηση των πακέτων, τόσο μειώνεται η μέση καθυστέρηση της παράδοσης πακέτου από την πηγή στον προορισμό ως απόρροια της ύπαρξης πολλών πιθανών κόμβων που θα συμμετάσχουν τόσο στην μετάδοση του πακέτου όσο και στην επισκευή των μονοπατιών που «καταστρέφονται». Η αυξημένη καθυστέρηση στην περίπτωση πυκνής τοπολογίας, οδηγεί στο συμπέρασμα πως ορισμένα ζεύγη κόμβων πηγής και προορισμού πιθανώς να είχαν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια, αυξάνοντας ελαφρώς τη μέση καθυστέρηση.

### 3.3 Αποτελέσματα σε μεσαίο Grid

#### 3.3.1 PDR σε μεσαίο Grid



Εικόνα 24: PDR σε 6x6 Manhattan Grid με τον GPSR-N να έχει την καλύτερη απόδοση

Στο 6x6 Manhattan Grid ο GPSR-N αποδίδει σαφώς καλύτερα από τους υπόλοιπους αλγόριθμους δρομολόγησης αναφορικά με το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων. Ο GPSR αποδίδει ελαφρώς χειρότερα του GPSR-N ενώ πολύ παρόμοια αποτελέσματα με τον GPSR εμφανίζει και ο GPCR. Τα AODV και DSR βρίσκονται αρκετά κοντά σε απόδοση στα GPSR και GPCR σε ότι αφορά το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων, παρουσιάζοντας όμως ελαφρώς χαμηλότερα ποσοστά επιτυχημένων παραδόσεων.

Ο GPSR-N καταφέρνει να αποδώσει καλύτερα από τα άλλα πρωτόκολλα σε αυτό το σενάριο για τις διάφορες πυκνότητες κόμβων. Το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων που επιτυγχάνει κρίνεται αρκετά υψηλό ανεξαρτήτως πυκνότητας κόμβων, ωστόσο, η χαμηλή πυκνότητα φαίνεται πως επιδρά στην απόδοση του πρωτοκόλλου μειώνοντας το ποσοστό πακέτων που παραδίδονται μιας και εμφανίζονται πιθανές απώλειες στο connectivity του δικτύου, οδηγώντας στην απόρριψη ορισμένων πακέτων. Σε αυξημένες πυκνότητες κόμβων στο δίκτυο, η απόδοση του πρωτοκόλλου βελτιώνεται κατά 10-15% σε ότι αφορά το πλήθος των πακέτων που παραδίδονται καθώς το πρωτόκολλο έχει περισσότερες επιλογές στην εύρεση μονοπατιών προς τον τελικό προορισμό και λιγότερες πιθανότητες να μεταβεί σε recovery mode που ίσως οδηγήσει και στην απόρριψη του πακέτου.

Ο αλγόριθμος GPSR ακολουθεί τον GPSR-N σε απόδοση πετυχαίνοντας ένα ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων το οποίο διαφέρει ελάχιστα από του GPSR-N στις αραιότερες και πυκνότερες τοπολογίες αλλά διαφέρει σημαντικά στις ενδιάμεσες πυκνότητες κόμβων. Το recovery mode που διαθέτει ο GPSR, εξασφαλίζει την παράδοση πακέτων με μεγάλη πιθανότητα ακόμη και σε αραιές τοπολογίες χωρίς όμως να μπορεί να αποφύγει την απόρριψη πακέτων λόγω της απουσίας ενδιάμεσων κόμβων για την προώθησή τους, που οδηγεί σε μείωση του PDR. Όσο η τοπολογία πυκνώνει από κόμβους, ο GPSR μπορεί να προωθήσει με μεγαλύτερη ευκολία τα πακέτα καθώς μπορούν να σχηματιστούν πολλαπλά μονοπάτια προς τον προορισμό αλλά και να προκύψουν εναλλακτικά μονοπάτια μέσω του recovery mode. Παρατηρείται τελικά μια βελτίωση της απόδοσης του πρωτοκόλλου καθώς αυξάνεται το πλήθος των κόμβων.

Ο GPCR ακολουθεί σε απόδοση τον GPSR παρουσιάζοντας παρόμοια αποτελέσματα και βελτιώνοντας την απόδοση του με την αύξηση της πυκνότητας κόμβων. Σε αραιές τοπολογίες και λόγω του recovery strategy που διαθέτει ο GPCR, μπορεί να εντοπίσει εναλλακτικές διαδρομές προς τον τελικό κόμβο περνώντας από συντονιστές. Η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει τελικά στην παράδοση του πακέτου στον τελικό προορισμό εφόσον υπάρχει συντονιστής σε διασταύρωση που διέρχεται το πακέτο. Σε αντίθετη περίπτωση, η προώθηση του δε μπορεί να συνεχιστεί και το πακέτο απορρίπτεται, γεγονός που μειώνει το ποσοστό του PDR του πρωτοκόλλου. Με την αύξηση της πυκνότητας κόμβων στον χάρτη, αυξάνεται ο αριθμός των υποψήφιων συντονιστών και άρα των πιθανών μονοπατιών που μπορεί να ακολουθήσει το πακέτο, συνεπώς παρατηρείται ταυτόχρονη αύξηση του PDR. Ακόμα κι αν ένας κόμβος-συντονιστής

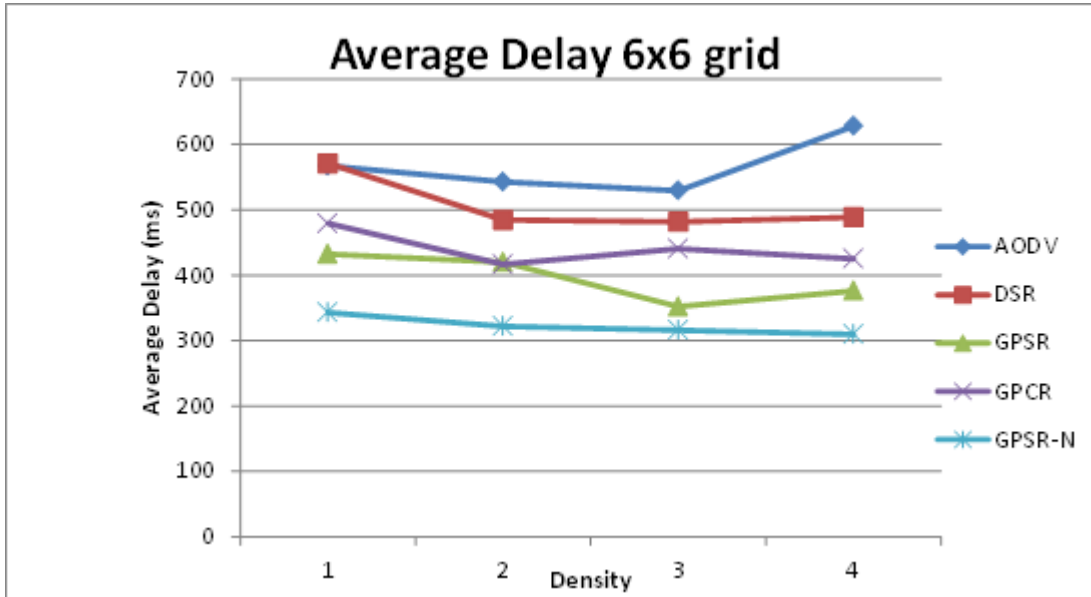
εγκαταλείψει μια διασταύρωση, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βρεθεί νέος κόμβος που θα παίξει τον ρόλο του συντονιστή και άρα θα καταστήσει δυνατή την επιτυχή προώθηση του πακέτου.

Ο DSR αποδίδει λίγο χειρότερα συγκριτικά με την απόδοση των GPSR και GPCR ενώ εμφανίζει σαφώς χειρότερη απόδοση από τον GPSR-N σε ότι αφορά το PDR. Σε χαμηλά densities, η εύρεση και συντήρηση μονοπατιών για τη μετάδοση του πακέτου είναι πιο δύσκολη και ως εκ τούτου εμφανίζεται χαμηλότερο PDR σε σχέση με τις υπόλοιπες πυκνότητες κόμβων. Με την αύξηση των κόμβων στην τοπολογία, καθίσταται πιο εύκολη η δημιουργία μονοπατιών προς τον τελικό κόμβο ενώ είναι ευκολότερη και η επιδιόρθωση μονοπατιού που καθίσταται μη διαθέσιμο πλέον, καθώς το μεγάλο πλήθος κόμβων οδηγεί σε πολλούς υποψήφιους που μπορούν να αντικαταστήσουν κάποιον που δεν είναι πλέον μέρος του μονοπατιού.

Σε ό,τι αφορά τον AODV, παρουσιάζει την χειρότερη απόδοση σε σχέση με τα άλλα πρωτόκολλα για το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων. Η απόδοση του είναι αρκετά κοντινή με αυτή του DSR λόγω της παρόμοιας φιλοσοφίας που ακολουθεί η δρομολόγηση πακέτων. Χαμηλές πυκνότητες κόμβων δε μπορούν να υποστηρίξουν επαρκώς την προώθηση των πακέτων, εμφανίζοντας χαμηλά ποσοστά παράδοσης (<45%). Ακόμη, πιθανή απώλεια ενδιάμεσου κόμβου σε ένα μονοπάτι θα δυσχεράνει τη διαδικασία προώθησης του πακέτου καθώς η πιθανότητα επισκευής του μονοπατιού είναι χαμηλή. Κατά την αύξηση του πλήθους των κόμβων στην τοπολογία, παρατηρείται μια μικρή αύξηση του ποσοστού παραδιδόμενων πακέτων από το πρωτόκολλο καθώς τα μονοπάτια που δημιουργούνται είναι πιο πιθανό να προωθήσουν το πακέτο. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση βλάβης σε ένα μονοπάτι, από την έλλειψη κόμβων για την προώθηση, είναι πιθανότερο το μονοπάτι αυτό να επισκευαστεί επιτυχώς καθώς υπάρχουν περισσότεροι υποψήφιοι κόμβοι για να λάβουν μέρος στην προώθηση του πακέτου, επιδιορθώνοντας το μονοπάτι



### 3.3.2 Average Delay σε μεσαίο Grid



Εικόνα 25: Average Delay σε 6x6 Manhattan Grid. Ο GPSR-N εμφανίζει την ελάχιστη καθυστέρηση

Η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση είναι η βέλτιστη στην περίπτωση του GPSR-N ενώ ακολουθεί ο GPSR με ελαφρώς μεγαλύτερη καθυστέρηση. Η ανεξαρτησία, από τον τελικό κόμβο, του μονοπατιού που θα προωθηθεί το πακέτο στον GPSR-N επιτυγχάνει χαμηλή μέση καθυστέρηση καθώς αναζητούνται οι συντεταγμένες του τελικού προορισμού. Ως εκ τούτου, προκύπτουν μονοπάτια που μπορούν να μεταδώσουν το πακέτο με την ελάχιστη καθυστέρηση. Οι αραιές τοπολογίες εμφανίζουν ελαφρώς μεγαλύτερη καθυστέρηση από τις πυκνότερες, χωρίς όμως να παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση στις τιμές τους. Συμπερασματικά, ο αλγόριθμος καταφέρνει να επιτύχει μια καλή δρομολόγηση εντός του δικτύου στοχεύοντας σε διασταυρώσεις με υψηλές πυκνότητες κόμβων και επιτυγχάνει τη διάδοση της πληροφορίας χωρίς τη συνεχή ανάγκη επαναδρομολόγησης πακέτων και άρα αύξηση της μέσης καθυστέρησης.

Ο GPSR εμφανίζει γενικά αυξημένη από άκρο σε άκρο καθυστέρηση σε σχέση με τον GPSR-N ενώ η καθυστέρηση που εισάγει είναι μεγαλύτερη όταν το πλήθος των κόμβων είναι μικρό. Συγκεκριμένα, στη λιγότερο πυκνή τοπολογία παρατηρείται η μέγιστη καθυστέρηση, ενώ αντίστοιχη είναι και η καθυστέρηση για την αμέσως επόμενη πυκνότητα κόμβων με την τιμή της καθυστέρησης να μειώνεται όσο αυξάνονται οι κόμβοι. Όταν το δίκτυο είναι αραιό, το πρωτόκολλο μεταβαίνει σε κατάσταση επαναφοράς (recovery mode) με μεγαλύτερη πιθανότητα από μεγαλύτερες πυκνότητες. Συνεπώς, εισάγεται μεγαλύτερη καθυστέρηση για τη δρομολόγηση του πακέτου καθώς

πρέπει να απομακρυνθεί στιγμιαία από τον προορισμό ώστε να φτάσει στον τελικό κόμβο με επιτυχία. Ο μηχανισμός επιβαρύνει τη διάρκεια της διαδικασίας δρομολόγησης, παρατηρείται όμως ότι μειώνεται η χρησιμοποίησή του όσο αυξάνονται οι κόμβοι του δικτύου καθώς μειώνεται η μέση καθυστέρηση.

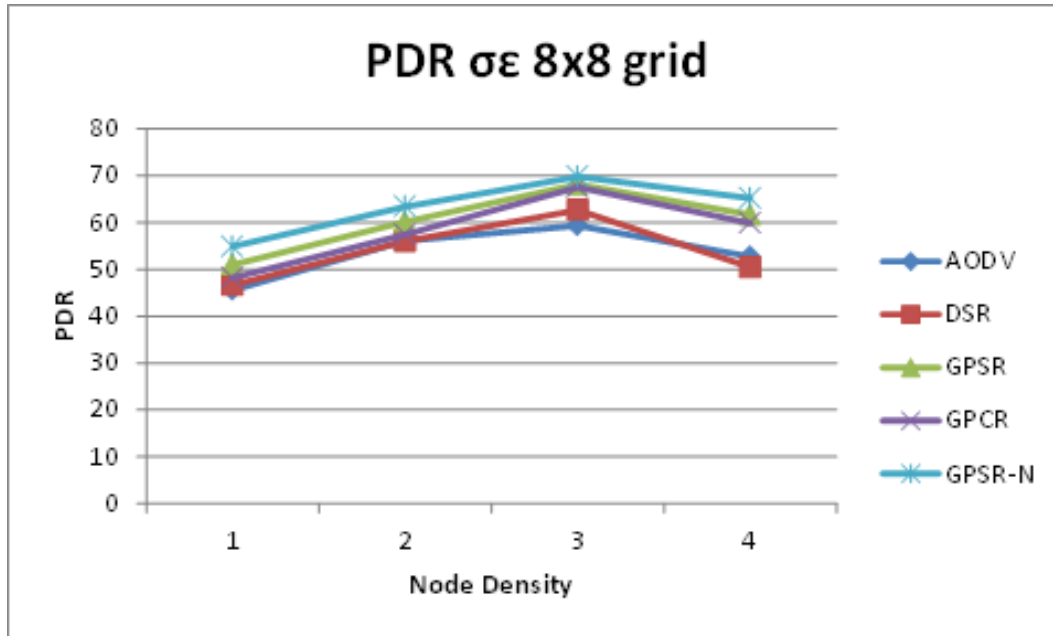
Ο GPCR εμφανίζει αυξημένη καθυστέρηση συγκριτικά με τον GPSR ενώ φαίνεται πως αυτή επηρεάζεται από το πλήθος των κόμβων, καθώς μειώνεται ελαφρά όσο οι κόμβοι αυξάνονται. Σε μικρό πλήθος κόμβων, το πρωτόκολλο καθυστερεί να παραδώσει τα πακέτα λόγω πιθανής απουσίας συντονιστών από τις διασταυρώσεις και άρα ανάγκης για επαναφορά του πακέτου και εκ νέου αναζήτησης μονοπατιών μέσω διασταυρώσεων που διαθέτουν συντονιστή. Με την αύξηση των κόμβων, αυξάνεται και η πιθανότητα ύπαρξης συντονιστή στις διασταυρώσεις από τις οποίες διέρχεται το πακέτο. Έτσι διευκολύνεται η προώθησή του, μειώνεται η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση, ενώ παράλληλα μειώνεται και η πιθανότητα να χρειαστεί το πακέτο να αναζητήσει εναλλακτικά μονοπάτια για τον τελικό προορισμό.

Στην περίπτωση του DSR παρατηρείται αρχικά αυξημένος χρόνος παράδοσης ενός πακέτου, ενώ αυτός μειώνεται όσο αυξάνεται το πλήθος των κόμβων. Τα μονοπάτια που δημιουργούνται σε αραιές τοπολογίες απαιτούν πιο συχνά επισκευή, μια διαδικασία χρονοβόρα με ανταλλαγή πολλών μηνυμάτων. Έτσι, η καθυστέρηση είναι μεγάλη σε αυτές τις περιπτώσεις. Με την αύξηση της πυκνότητας των κόμβων, παρατηρείται μείωση του απαιτούμενου χρόνου για την παράδοση ενός πακέτου, καθώς η μεγαλύτερη διαθεσιμότητα κόμβων οδηγεί σε ευκολότερη εγκαθίδρυση μονοπατιών και κάνει μικρότερη την πιθανότητα «σπασίματος» ενός τέτοιου μονοπατιού. Σε περίπτωση που υπάρχουν μονοπάτι καταστραφεί, η υψηλότερη διαθεσιμότητα κόμβων καθιστά την επισκευή του ευκολότερη και άρα ταχύτερη την προώθηση του πακέτου.

Ο AODV λειτουργώντας παρόμοια με τον DSR αλλά εμφανίζοντας μεγαλύτερη ευαισθησία στην κινητικότητα κόμβων που συμμετέχουν στα μονοπάτια δρομολόγησης, εμφανίζει τη μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση μεταξύ των πρωτοκόλλων. Η κύρια διαφορά του με τον DSR είναι η επανέναρξη της αναζήτησης μονοπατιού όταν αυτό δεν είναι πλέον διαθέσιμο όταν στον DSR ο κόμβος που εκκινεί την αναζήτηση διατηρεί μια λίστα με όλα τα δυνατά μονοπάτια επιλέγοντας ένα από αυτά (βάσει προκαθορισμένου κριτηρίου). Ως εκ τούτου, σε αραιές τοπολογίες εμφανίζει αυξημένη καθυστέρηση λόγω της δημιουργίας μεγαλύτερων μονοπατιών σε μήκος. Η καθυστέρηση μειώνεται όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων ενώ η αυξημένη τιμή της που εμφανίζεται για τη μέγιστη πυκνότητα κόμβων πιθανώς οφείλεται στη συμπτωματική καταστροφή πολλαπλών μονοπατιών και στη χρονοβόρα αποκατάστασή τους από τον αλγόριθμο με τη μετάδοση εκ νέου μηνυμάτων RREQ και την αναμονή απάντησης για αποστολή του πακέτου από την αρχή.

### 3.4 Αποτελέσματα σε μεγάλο Grid

#### 3.4.1 PDR σε μεγάλο Grid



Εικόνα 26: PDR σε 8x8 Manhattan Grid. Τα πρωτόκολλα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά

Σε 8x8 Manhattan Grid παρατηρείται ξανά το υψηλότερο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων από τον GPSR-N σε σχέση με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Ακολουθούν με λίγο χαμηλότερη απόδοση ο GPSR και ο GPCR εμφανίζοντας παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ τους αναφορικά με τη χρησιμοποιούμενη μετρική. Οι αλγόριθμοι AODV και DSR ακολουθούν με ακόμη χαμηλότερο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων σε σχέση με τα GPSR και GPCR και αρκετά χαμηλότερα από την απόδοση του GPSR-N.

Συγκεκριμένα, ο GPSR-N πετυχαίνει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα άλλα πρωτόκολλα σε αυτό το μέγεθος πόλης, για τα διαφορετικά πλήθη κόμβων. Σε αραιές τοπολογίες εμφανίζει σχετικά χαμηλό ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων που δεν ξεπερνά το 55% καθιστώντας το δίκτυο δυσλειτουργικό και την επιτυχή μετάδοση πακέτων αβέβαιη. Το γεγονός προκύπτει από την αραιή τοπολογία που δυσχεραίνει την προώθηση του πακέτου μέσω διασταυρώσεων που να διαθέτουν ικανοποιητική πυκνότητα κόμβων και άρα το πρωτόκολλο οδηγείται σε απόρριψη των πακέτων αυτών καθώς η δρομολόγηση τους καθίσταται αδύνατη. Κατά την αύξηση του πλήθους των κόμβων στο δίκτυο παρατηρείται παράλληλη αύξηση του PDR που επιτυγχάνει το πρωτόκολλο. Η αυξημένη πυκνότητα των κόμβων παρέχει αξιόπιστα μονοπάτια σε ένα πακέτο για τη δρομολόγηση του, ενώ οι διασταυρώσεις διαθέτουν πλέον παραπάνω κόμβους για την

παροχή εναλλακτικών μονοπατιών σε πακέτα που μεταβαίνουν σε recovery mode.

Ο GPSR πετυχαίνει την αμέσως καλύτερη απόδοση σε ότι αφορά το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων μετά τον GPSR-N ενώ διατηρεί μια σχετικά σταθερή διαφορά της τάξης του 4-5% στα πακέτα που τελικά παραδίδονται. Η μεταβολή της απόδοσης του πρωτοκόλλου ακολουθεί την αύξηση των κόμβων στις διάφορες τοπολογίες βελτιώνοντας το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων. Η διαφοροποίηση της απόδοσης οφείλεται στη διαθεσιμότητα περισσότερων κόμβων, κατά την προώθηση πακέτου, που μπορούν να λάβουν μέρος τόσο στην άπληστη προώθηση του όσο και στην προώθηση πακέτων μέσω της διαδικασίας επαναφοράς που διαθέτει το πρωτόκολλο. Σε περιπτώσεις χαμηλότερης πυκνότητας κόμβων, ο GPSR ίσως χρειαστεί να βασιστεί στο recovery mode που διαθέτει ώστε να επιτύχει την παράδοση του πακέτου. Η χαμηλή συγκέντρωση κόμβων ωστόσο οδηγεί πολλές φορές στην αποτυχία παράδοσης ενός πακέτου. Κατά την αύξηση του πλήθους των οχημάτων εντός της τοπολογίας, προκύπτει αυξημένη πιθανότητα επιτυχημένης παράδοσης πακέτου. Η αύξηση αυτή οφείλεται στη διευκόλυνση της μετάδοσης του είτε μέσω άπληστης προώθησης (με την παρουσία περισσότερων κόμβων κατά μήκος του μονοπατιού προώθησης, που οδηγούν σε εξάλειψη των «κενών» στο δίκτυο) είτε μέσω της διαδικασίας επαναφοράς όπου η παρουσία πολλών κόμβων διευκολύνει την περάτωση της και τη συνέχιση της άπληστης προώθησης που θα καταλήξει σε επιτυχημένη παράδοση.

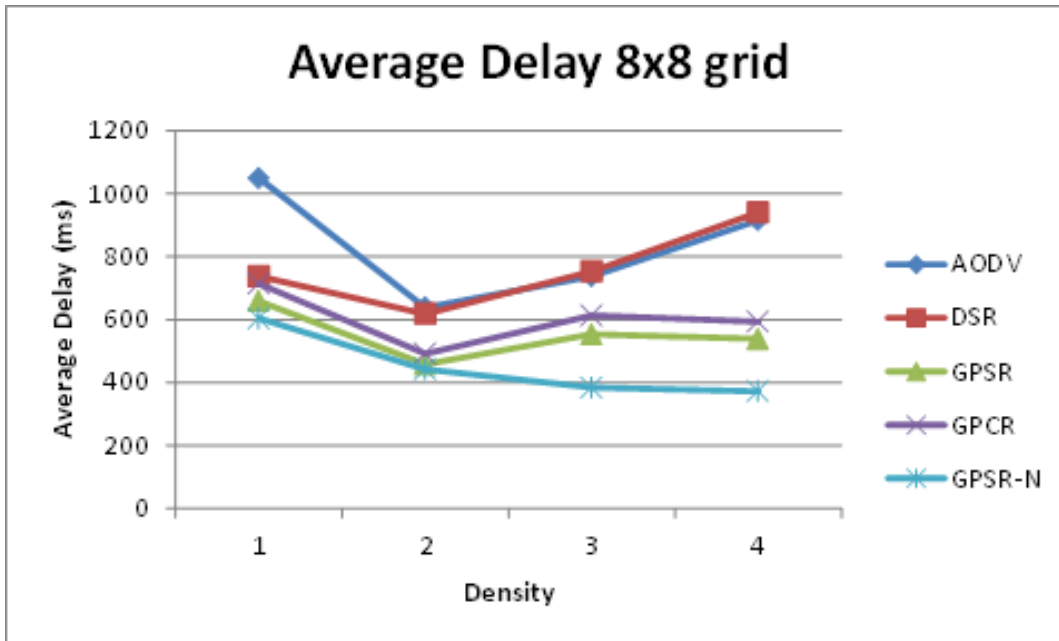
Παρόμοιος σε απόδοση με τον GPSR είναι ο GPCR ο οποίος εμφανίζει οριακά χειρότερη απόδοση από τον πρώτο. Σε χαμηλές πυκνότητες κόμβων το πρωτόκολλο αδυνατεί να δρομολογήσει αξιόπιστα τα πακέτα μεταξύ των κόμβων στο δίκτυο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ελλιπή παρουσία συντονιστών στις διασταυρώσεις που θα αναλάβουν να προωθήσουν το πακέτο από αυτές. Επιπρόσθετα, οι αραιές τοπολογίες αδυνατούν να υποστηρίξουν επαρκώς τη διαδικασία επαναφοράς από αδιέξοδα που διαθέτει το πρωτόκολλο ελλείψει συντονιστών που θα παρέχουν εναλλακτικά μονοπάτια στο πακέτο, ως τον κόμβο προορισμού του. Η αύξηση του πλήθους των κόμβων επιφέρει ταυτόχρονη αύξηση στο PDR που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος, καθώς η επαρκέστερη παρουσία συντονιστών στις διασταυρώσεις καθιστά ευκολότερη την προώθηση ενός πακέτου όσο και την επιτυχημένη ολοκλήρωση της αναζήτησης διαφορετικού μονοπατιού δρομολόγησης μέσω του recovery mode του πρωτοκόλλου. Περισσότεροι συντονιστές βρίσκονται σε περισσότερες διασταυρώσεις όσο πυκνώνουν οι τοπολογίες και άρα είναι πιθανότερη η δρομολόγηση του πακέτου στον τελικό προορισμό με επιτυχία και η αντικατάσταση κάποιου κόμβου-συντονιστή σε περίπτωση που ένας προηγούμενος επιλεγμένος τέτοιος κόμβος, καταστεί πλέον μη διαθέσιμος.

Ο DSR ακολουθεί σε απόδοση τους GPSR και GPCR αναφορικά με το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων. Χαμηλές πυκνότητες κόμβων οδηγούν το πρωτόκολλο σε χαμηλά ποσοστά παραδιδόμενων πακέτων καθώς η ανακάλυψη μονοπατιών

δυσχεραίνεται λόγω των αραιών κόμβων. Τα μονοπάτια που δημιουργούνται είναι «ασθενή» και δεν παρουσιάζουν την απαραίτητη συνοχή ώστε να επιτύχουν σε κάθε περίπτωση την παράδοση πακέτων απαιτώντας πολλές φορές επισκευή μέσω μηνυμάτων RERR ή την αίτηση νέων μονοπατιών από τον κόμβο-πηγή με εκ νέου μηνύματα RREQ. Όταν αυξάνονται οι κόμβοι στο δίκτυο, το πρωτόκολλο είναι σε θέση να σχηματίζει «ασχυρότερα» μονοπάτια προς τον προορισμό που μπορούν να μεταφέρουν το πακέτο με μεγαλύτερη αξιοπιστία σε αυτόν. Επιπρόσθετα, όταν τέτοια μονοπάτια καθίστανται μη διαθέσιμα πλέον, λόγω της μετακίνησης ενός οχήματος εκτός εμβέλειας των υπόλοιπων κόμβων, τότε το πρωτόκολλο δύναται να επισκευάσει ευκολότερα το μονοπάτι ή να δρομολογήσει το πακέτο μέσω εναλλακτικής διαδρομής που ήδη γνωρίζει. Οι εναλλακτικές αυτές διαδρομές βρίσκονται ήδη στην κατοχή του κόμβου-πηγή και το πλήθος τους μπορεί να αυξηθεί όσο αυξάνονται και οι κόμβοι. Συνεπώς, σε τοπολογίες με υψηλότερες πυκνότητες κόμβων, το πρωτόκολλο μπορεί να επιτύχει υψηλότερο PDR.

Το πρωτόκολλο AODV αποδίδει αντίστοιχα με το DSR στο συγκεκριμένο μέγεθος πλέγματος. Σε αραιότερες τοπολογίες, το πρωτόκολλο καταφέρνει να επιτύχει ένα ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων γύρω από το 50%. Τα μονοπάτια που δημιουργούνται είναι ασθενή και δε μπορούν να υποστηρίξουν αξιόπιστα τη μετάδοση του πακέτου προς τον προορισμό. Ακόμη, σε πολλές περιπτώσεις, είναι πιθανό να μη μπορεί να σχηματιστεί μονοπάτι προς τον προορισμό ή το μονοπάτι αυτό να έχει μεγαλύτερη πιθανότητα καταστροφής του. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να σχηματιστεί νέο μονοπάτι με την εκπομπή μηνυμάτων RREQ από την πηγή. Είναι αρκετά πιθανό οι αραιές τοπολογίες να μη μπορούν να παρέχουν τέτοια εναλλακτικά μονοπάτια και άρα να μην ολοκληρώνεται ποτέ η μεταφορά των πακέτων στον προορισμό. Η αύξηση των κόμβων στην τοπολογία, επιφέρει ταυτόχρονη αύξηση του PDR που επιτυγχάνει το πρωτόκολλο καθώς μπορεί να προκύψει ευκολότερα διαδρομή προς τον τελικό προορισμό ή να δύναται μια τέτοια διαδρομή να επισκευαστεί με μεγαλύτερη πιθανότητα. Όταν ένας κόμβος, που συμμετέχει σε μονοπάτι, κινηθεί εκτός της εμβέλειας των υπολοίπων το πρωτόκολλο εκκινεί μια διαδικασία εκ νέου αναζήτησης μονοπατιού προς τον προορισμό. Οι μεγαλύτερες πυκνότητες κόμβων στο δίκτυο διευκολύνουν αυτή τη διαδικασία και της παρέχουν μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχίας. Ως εκ τούτου, αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχημένης παράδοσης ενός πακέτου και άρα το πρωτόκολλο εμφανίζει μεγαλύτερο PDR.

### 3.4.2 Average Delay σε μεγάλο Grid



Εικόνα 27: Average Delay σε 8x8 Manhattan Grid με τους GPSR-N, GPCR και GPSR να έχουν παρόμοια απόδοση

Παρατηρείται πως η μέση καθυστέρηση παράδοσης πακέτου είναι βέλτιστη στην περίπτωση του GPSR-N, με τους GPSR και GPCR να ακολουθούν με ελαφρώς αυξημένη καθυστέρηση. Ο GPSR-N καταφέρνει να διατηρήσει χαμηλά τον μέσο χρόνο που απαιτεί για την παράδοση ενός πακέτου χάρη στη φιλοσοφία δρομολόγησης που διαθέτει. Αυτή υπαγορεύει την προώθηση του πακέτου στις συντεταγμένες του τελικού προορισμού παρά στον ίδιο τον τελικό κόμβο. Σε αραιές τοπολογίες, τα μονοπάτια που ανακαλύπτονται και μπορούν να προωθήσουν το πακέτο έχουν μεγάλη πιθανότητα να είτε να είναι μεγάλου μήκους, είτε να οδηγούν σε αδιέξοδο λόγω της απώλειας συνδεσιμότητας και να απαιτείται εκ νέου δρομολόγηση του πακέτου από διαφορετικό μονοπάτι γεγονός που αυξάνει τη μέση καθυστέρηση που απαιτείται για τη δρομολόγηση του πακέτου. Καθώς αυξάνονται οι κόμβοι του δικτύου, η προώθηση του πακέτου διευκολύνεται καθώς προκύπτουν συντομότερα μονοπάτια προς τον τελικό προορισμό ενώ τα μονοπάτια που επιλέγονται έχουν μικρότερη πιθανότητα να καταστραφούν με αποτέλεσμα να απαιτείται η επιλογή κάποιου νέου μονοπατιού.

Η απόδοση του GPSR αναφορικά με τη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση κατατάσσεται ως η αμέσως καλύτερη μετά τον GPSR-N. Σε αραιές τοπολογίες εμφανίζει παρεμφερή απόδοση με τον GPSR-N γεγονός το οποίο οφείλεται στη λειτουργία της προώθησης πακέτων. Η έλλειψη κόμβων για άπληστη προώθηση πακέτων οδηγεί με

μεγάλη πιθανότητα το πρωτόκολλο σε μια προσπάθεια εύρεσης ενός κόμβου που βρίσκεται πλησιέστερα στον κόμβο προορισμού μέσω του recovery mode. Η λειτουργία αυτή καθυστερεί την άπληστη προώθηση του πακέτου προς τον προορισμό αυξάνοντας τη μέση καθυστέρηση. Κατά την αύξηση των κόμβων στο δίκτυο, ο μηχανισμός αυτός απαιτείται να χρησιμοποιηθεί σημαντικά λιγότερο μειώνοντας την καθυστέρηση που εισάγει το πρωτόκολλο. Το πακέτο ακολουθεί διαδρομές που μεταβαίνουν με μικρότερη πιθανότητα σε κατάσταση επαναφοράς και άρα παραδίδεται στον τελικό κόμβο με χαμηλότερη καθυστέρηση.

Ο GPCR αποδίδει αντίστοιχα με τον GPSR εμφανίζοντας ίδιο μοτίβο χρόνων καθυστέρησης αλλά ελαφρώς αυξημένες τιμές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη λογική συντονιστών που διαθέτει για την προώθηση των πακέτων. Όταν το πλήθος των κόμβων δεν επαρκεί για να καλύψει την ανάγκη για ύπαρξη συντονιστών στις διασταυρώσεις, τότε το πρωτόκολλο αναγκάζεται να μεταβεί σε κατάσταση επαναφοράς αναζητώντας εναλλακτική διασταύρωση για να προχωρήσει με τη δρομολόγηση του. Το γεγονός αυτό καθυστερεί σημαντικά τη διαδικασία προώθησης. Με την αύξηση των κόμβων, η πιθανότητα να υπάρχει συντονιστής σε μια διασταύρωση αυξάνεται ενώ είναι πιθανότερη και η αντικατάσταση ενός κόμβου, που παύει να είναι πλέον συντονιστής, με κάποιον νέο. Ως εκ τούτου, η ανάγκη επαναφοράς του πακέτου σε διασταυρώσεις για την αναζήτηση διαφορετικών μονοπατιών μειώνεται, βελτιώνοντας και επιταχύνοντας τη διαδικασία προώθησης.

Σε ότι αφορά τον DSR, η καθυστέρηση που εισάγει σε αραιές τοπολογίες εξαρτάται σημαντικά από τη συνοχή των σχηματιζόμενων μονοπατιών. Κόμβοι που δε διαθέτουν συνεκτικά μονοπάτια για την επικοινωνία τους, είναι πιθανό να χρειαστεί να αναζητήσουν εναλλακτικό μονοπάτι για την προώθηση του πακέτου, αυξάνοντας τον μέσο χρόνο παράδοσης του πακέτου. Καθώς οι κόμβοι αυξάνονται, τα μονοπάτια που δημιουργούνται είναι πιο συνεκτικά ενώ δύνανται να επισκευαστούν ευκολότερα, λόγω της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας κόμβων, αν αυτό απαιτηθεί. Συνεπώς, ο χρόνος που απαιτείται για την προώθηση του πακέτου από τον κόμβο-πηγή στον προορισμό, μειώνεται. Η αύξηση της καθυστέρησης σε πυκνές τοπολογίες είναι πιθανό να οφείλεται σε μεγάλες αποστάσεις κόμβων που επικοινωνούν και άρα είτε σε μεγαλύτερο μήκος μονοπατιών ή σε ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών οδών προς τον προορισμό, που καθυστερούν σημαντικά την παράδοση του.

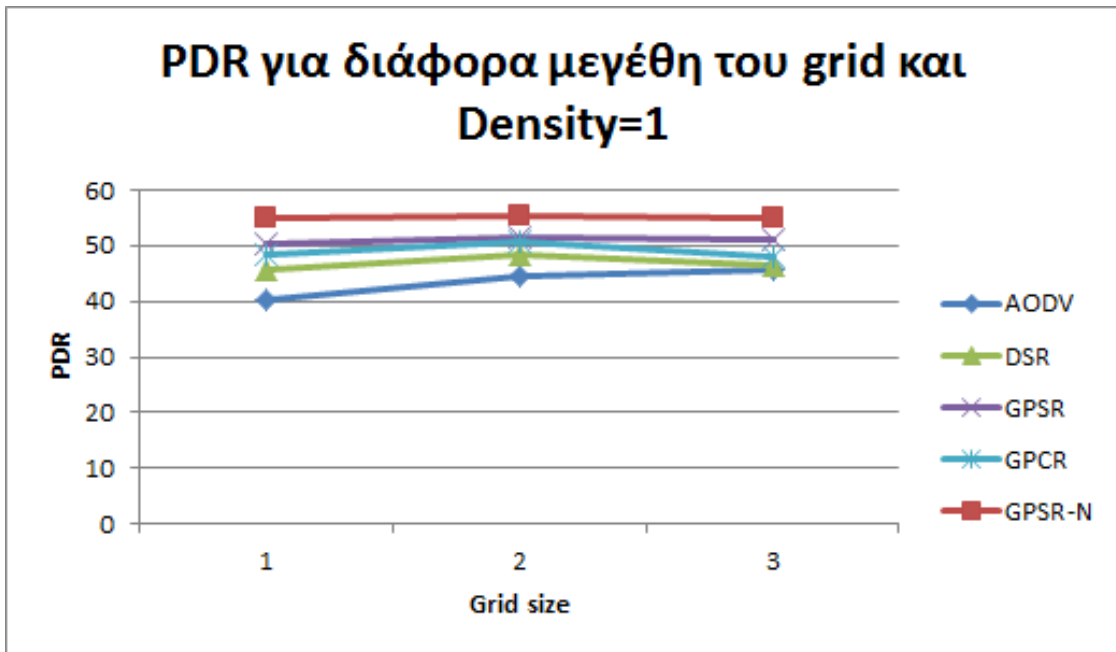
Τέλος, ο AODV, προσεγγίζει αρκετά την απόδοση του DSR, διαφοροποιούμενος σημαντικά στην περίπτωση της πιο αραιής τοπολογίας. Η ευαισθησία του AODV στην κινητικότητα των κόμβων, με την ανάγκη ανακάλυψης εκ νέου ενός μονοπατιού, εισάγει σημαντική καθυστέρηση όταν χρησιμοποιείται συχνά. Οι αραιές τοπολογίες δημιουργούν μονοπάτια τα οποία είναι πιθανό να έχουν μεγάλο μήκος αλλά ταυτόχρονα σπάνε με μεγαλύτερη πιθανότητα. Σε τέτοια περίπτωση, ο κόμβος που θέλει να αποστείλει πακέτα πρέπει να επανεκκινήσει τη διαδικασία ανακάλυψης νέου μονοπατιού προς τον

προορισμό, για να προχωρήσει στην αποστολή πακέτων, με τη διαδικασία αυτή να επιβαρύνει σημαντικά τον συνολικό χρόνο που απαιτεί το πρωτόκολλο. Όσο αυξάνονται οι κόμβοι στην τοπολογία, διευκολύνεται η διαδικασία σχηματισμού μονοπατιών. Συγκεκριμένα, προκύπτουν συντομότερα αλλά και συνεκτικότερα μονοπάτια, που είναι ικανά να δρομολογήσουν το πακέτο χωρίς επιπλέον καθυστέρηση. Η ολοένα αραιότερη αναζήτηση εναλλακτικών μονοπατιών, απαλλάσσει το πρωτόκολλο από επιβαρύνσεις στο χρόνο παράδοσης πακέτων. Η μικρή αύξηση που παρατηρείται στον χρόνο παράδοσης πακέτων για πυκνές τοπολογίες μπορεί να αιτιολογηθεί από πιθανή μεγάλη απόσταση των κόμβων που πραγματοποιούν την επικοινωνία, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους που απαιτούνται για την παράδοση του πακέτου αλλά και σε σπάσιμο υπάρχοντων μονοπατιών με μεγαλύτερη πιθανότητα. Τα ενδεχόμενα αυτά αυξάνουν τη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση που επιτυγχάνει το πρωτόκολλο.

### 3.5 Συγκριτική μελέτη Πρωτοκόλλων

#### 3.5.1 PDR για μικρό Density

Ακολούθως, εξετάζεται η συμπεριφορά κάθε πρωτοκόλλου διατηρώντας σταθερή την πυκνότητα των οχημάτων και μεταβάλλοντας το μέγεθος του πλέγματος.



Εικόνα 28: PDR στα τρία grid για Density=1. Ο AODV εμφανίζει χειρότερη απόδοση από τα υπόλοιπα πρωτόκολλα



Παρατηρείται πως ο GPSR-N διατηρεί σταθερή την απόδοση του σε κάθε περίπτωση ανεξάρτητα από το μέγεθος του πλέγματος, επιτυγχάνοντας ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων περί το 55%.

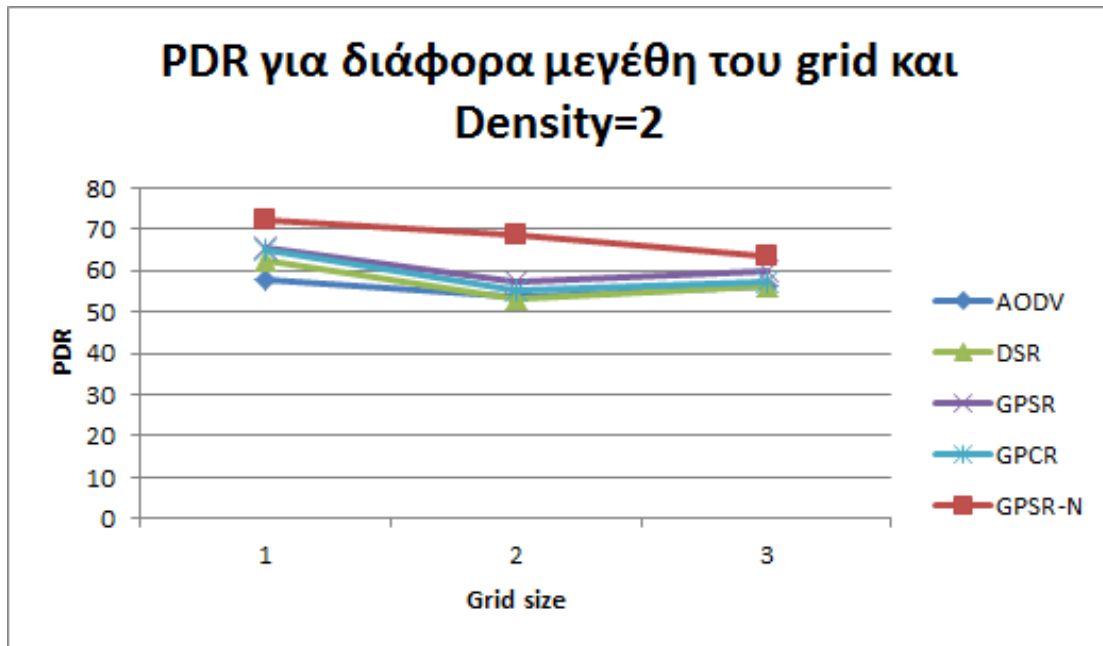
Ακολουθεί σε απόδοση ο GPSR, ο οποίος εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά αλλά με ελαφρώς χειρότερο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων σε σχέση με τον GPSR-N.

Ο GPCR αποδίδει καλύτερα για το μεσαίο μέγεθος πλέγματος, ενώ στις άλλες περιπτώσεις παρουσιάζει μικρή ελάττωση του ποσοστού παραδιδόμενων πακέτων της τάξεως του 5%, σε σχέση με την καλύτερη περίπτωση.

Ομοίως, ο DSR, φαίνεται να επιτυγχάνει μεγαλύτερο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων στην περίπτωση του μεσαίου μεγέθους πλέγματος με τις περιπτώσεις του 4x4 και 8x8 πλέγματος να έχουν λίγο χαμηλότερο PDR.

Τέλος, ο AODV καταφέρνει να βελτιώσει ελαφρώς την απόδοση του αναφορικά με το PDR όσο αυξάνεται το μέγεθος του πλέγματος. Ωστόσο, κατά μέσο όρο, εμφανίζει το χαμηλότερο PDR από όλες τις περιπτώσεις πρωτοκόλλων ακόμα και στην καλύτερη του περίπτωση.

### 3.5.2 PDR για μεσαίο Density



Εικόνα 30: PDR στα τρία grid για Density=2 με τον GPSR-N να ξεχωρίζει σε απόδοση από τα υπόλοιπα

Κατά την αύξηση της πυκνότητας των οχημάτων στο πλέγμα, παρατηρείται πως ο GPSR-N παραμένει ο καλύτερος αλγόριθμος για την προώθηση πακέτων επιτυγχάνοντας αρκετά υψηλά ποσοστά παραδιδόμενων πακέτων. Παράλληλα, παρατηρείται πως η αύξηση του μεγέθους πόλης του σεναρίου επιφέρει μια αναμενόμενη μείωση του ποσοστού παραδιδόμενων πακέτων από το πρωτόκολλο.

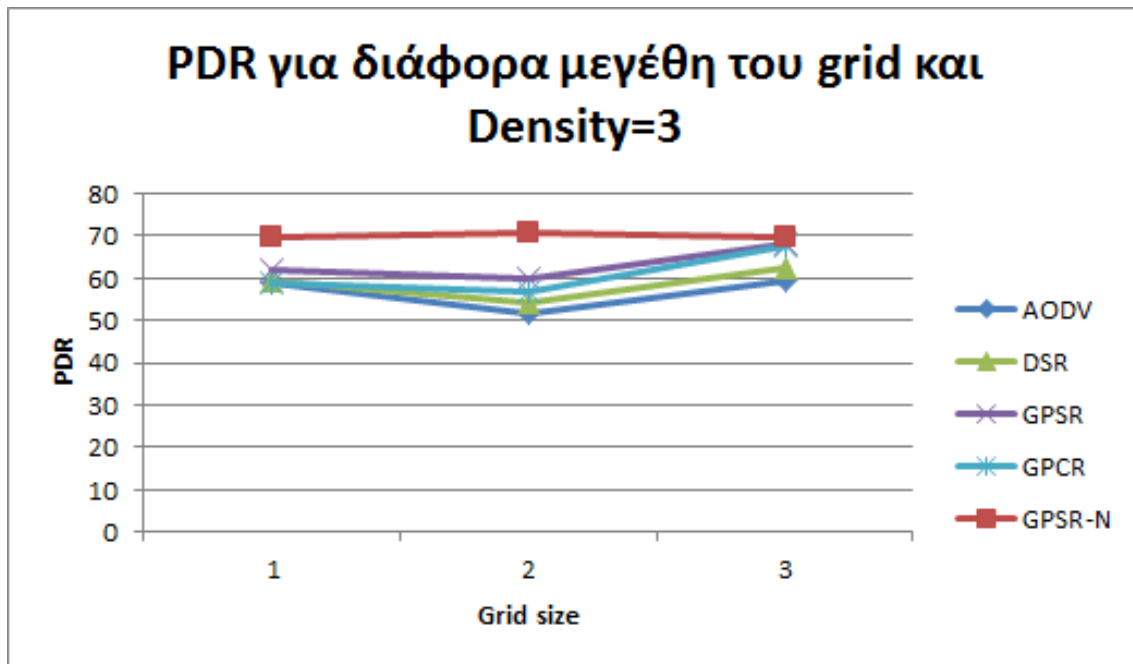
Ακολουθεί σε απόδοση ο GPSR έχοντας ελαφρώς χειρότερο ποσοστό παράδοσης πακέτων από τον GPSR-N. Η αύξηση του μεγέθους του grid μειώνει, φυσιολογικά, τον αριθμό των πακέτων που παραδίδονται από το πρωτόκολλο.

Ο GPCR αποδίδει πανομοιότυπα με τον GPSR έχοντας αμελητέες αποκλίσεις στην απόδοση του. Ομοίως και σε αυτή την περίπτωση, η αύξηση του μεγέθους του πλέγματος, μειώνει το PDR που επιτυγχάνει το πρωτόκολλο.

Με λίγο χειρότερη απόδοση από τα δύο προαναφερθέντα πρωτόκολλα ακολουθεί ο DSR. Οι διαφορές στο ποσοστό των πακέτων που παραδίδονται κρίνεται μικρή ενώ η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου καθώς αυξάνεται το μέγεθος της πόλης ακολουθεί το μοτίβο των προηγούμενων πρωτοκόλλων.

Ο AODV έχει σχεδόν την ίδια απόδοση με τον DSR. Εμφανίζει μόνο στην πρώτη περίπτωση μια μικρή πτώση της απόδοσης του σε σχέση με το DSR ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις το PDR που επιτυγχάνουν τα δύο πρωτόκολλα είναι το ίδιο. Ο AODV φαίνεται να επηρεάζεται λιγότερο από τη μεταβολή του μεγέθους του πλέγματος, η οποία έχει μικρότερο αντίκτυπο στο PDR του σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις πρωτοκόλλων.

### 3.5.3 PDR για μεγάλο Density



Εικόνα 32: PDR στα τρία grid για Density=3. Ο GPSR-N αποδίδει καλύτερα στα δύο μικρότερα μεγέθη πλέγματος

Ο GPSR-N διατηρεί το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων σχεδόν σταθερό, ανεξάρτητα από τη μεταβολή του μεγέθους του πλέγματος. Η πυκνότητα των οχημάτων επαρκεί ώστε να επιτύχει αξιόπιστη προώθηση των πακέτων εντός του πλέγματος με σχετικά μεγάλο PDR.

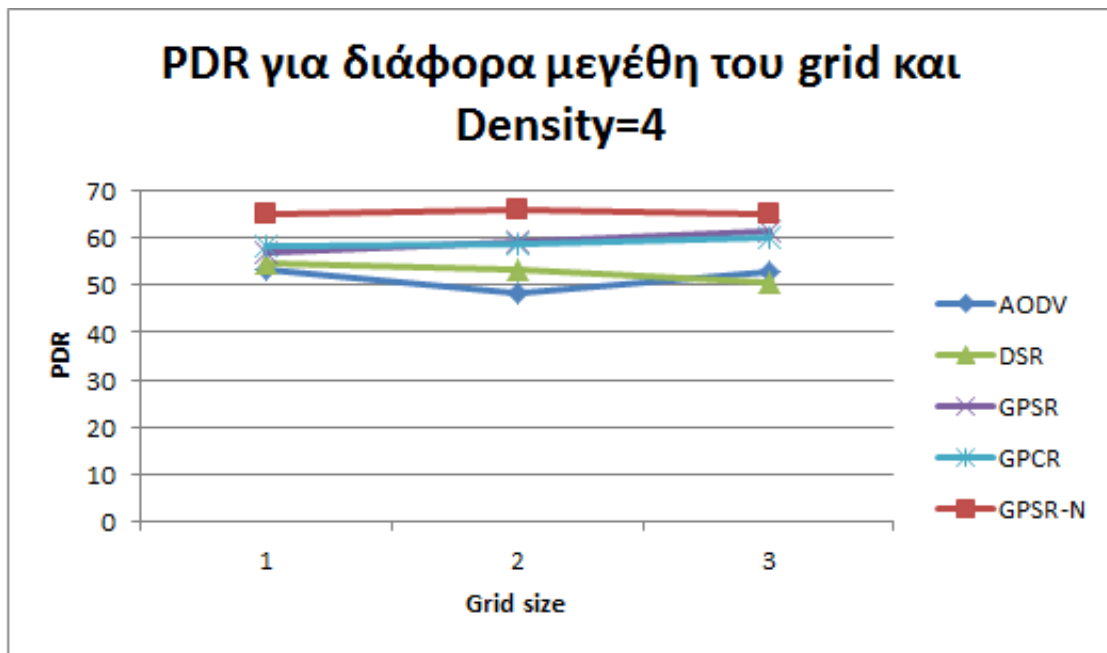
Ακολουθεί σε απόδοση ο GPSR που επίσης καταφέρνει να διατηρήσει την απόδοση του σε καλά επίπεδα όσο αυξάνεται το μέγεθος του πλέγματος. Η αύξηση του PDR του πρωτοκόλλου στην περίπτωση του μεγαλύτερου μεγέθους πλέγματος ίσως οφείλεται στην ιδιαιτερότητα της τοπολογίας, όπου κατέστη δυνατή η παράδοση περισσότερων πακέτων μεταξύ των οχημάτων που επικοινωνούσαν.

Με ελαφρώς χειρότερη απόδοση ακολουθεί ο GPCR ο οποίος έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον GPSR Το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων που επιτυγχάνει είναι ελαφρώς χαμηλότερο. Ομοίως, παρατηρείται πως παρουσιάζει αύξηση του PDR στο μεγαλύτερο δυνατό μέγεθος πόλης.

Ο DSR συμπεριφέρεται παρόμοια με τον GPCR σε ότι αφορά την υπό εξέταση μετρική. Η αύξηση του μεγέθους του πλέγματος επιφέρει αρχικά μείωση του PDR που επιτυγχάνει το πρωτόκολλο ενώ ακολούθως παρατηρείται αύξηση του ποσοστού παραδιδόμενων πακέτων, όμοια με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Τέλος, ο AODV έχει σχεδόν ίδια συμπεριφορά με τον DSR αλλά με ελαφρώς χειρότερη απόδοση. Όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, η αύξηση του μεγέθους πόλης μειώνει το PDR του πακέτου ενώ για το μεγαλύτερο μέγεθος, το PDR αυξάνεται όπως παρατηρήθηκε και στις υπόλοιπες περιπτώσεις.

### 3.5.4 PDR για μέγιστο Density



Εικόνα 34: PDR στα τρία grid για Density=4. Ο GPSR-N παραμένει ο βέλτιστος αλγόριθμος ενώ οι GPSR και GPCR προσεγγίζουν την απόδοσή του.

Ο GPSR-N αποδίδει σταθερά και με αρκετά υψηλό PDR για κάθε μέγεθος του πλέγματος. Η προσπάθεια του πρωτοκόλλου να προσεγγίσει τις συντεταγμένες του

τελικού προορισμού δημιουργούν προϋποθέσεις για καλύτερα μονοπάτια ή για περισσότερες εναλλακτικές σε περίπτωση που κάποιο μονοπάτι καταστραφεί.

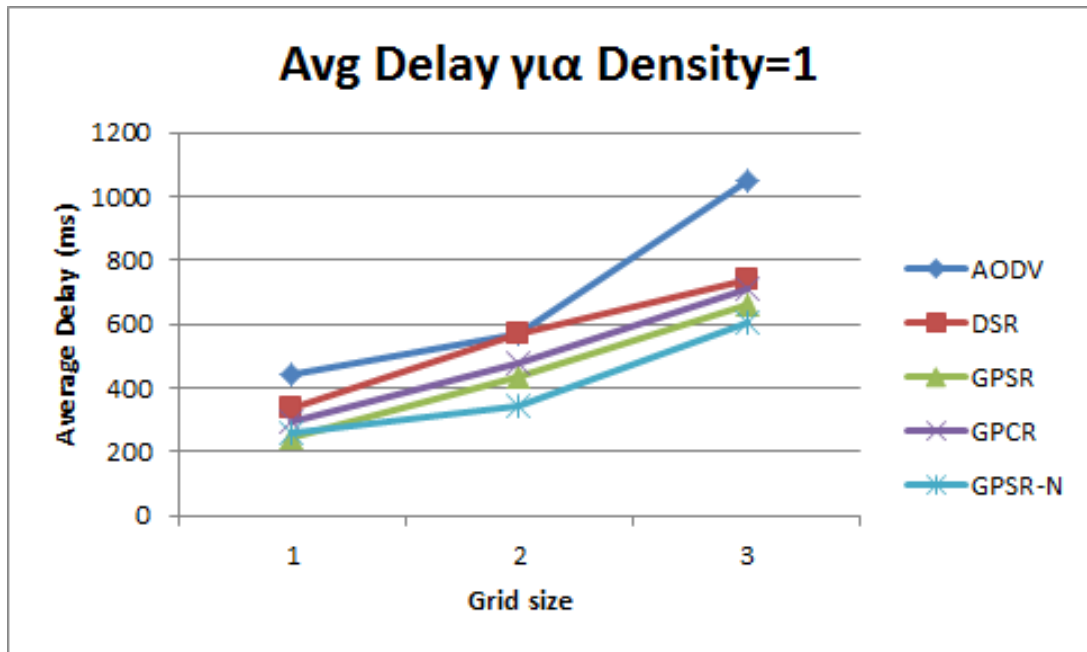
Ο GPSR ακολουθεί με χαμηλότερη απόδοση της τάξεως του 5-10%. Παρατηρείται επίσης μια σταθερότητα στις τιμές που επιτυγχάνει, πιθανώς λόγω της ύπαρξης πολλών διαφορετικών κόμβων που μπορούν να εγγυηθούν την επιτυχή παράδοση του πακέτου.

Ίδια απόδοση με τον GPSR παρουσιάζει ο GPCR, μεταβάλλοντας την απόδοση του με τον ίδιο τρόπο όσο αυξάνεται το μέγεθος του πλέγματος. Η επαρκής παρουσία συντονιστών στις διασταυρώσεις λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης οχημάτων, επιτρέπει την επιτυχημένη παράδοση των πακέτων.

Ο DSR έχει ελαφρώς χειρότερη απόδοση συγκριτικά με τους GPSR και GPCR. Επιπρόσθετα, η αύξηση του μεγέθους του πλέγματος οδηγεί σε μικρή μείωση του PDR του πρωτοκόλλου καθώς αυξάνεται η πιθανότητα να «σπάσει» κάποιο μονοπάτι που είχε προηγουμένως δημιουργηθεί και είχε αναλάβει την προώθηση πακέτων.

Ο AODV επιτυγχάνει χαμηλότερο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων σε σχέση με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα. Ακόμη, η αύξηση του μεγέθους του πλέγματος, φαίνεται να έχει μικρή επίδραση στην απόδοση του καθώς παρουσιάζονται μεταβολές της τάξεως του 3-4% που δεν αποτελούν σημαντική διαφοροποίηση.

### 3.5.5 Average Delay για μικρό Density



Εικόνα 29: Average Delay στα τρία grid για Density=1. Τα πρωτόκολλα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά

Ο GPSR-N επιτυγχάνει τη μικρότερη μέση καθυστέρηση ανάμεσα στα πρωτόκολλα παρουσιάζοντας μια φυσιολογική αύξησή της καθώς το πλέγμα μεγαλώνει. Μεγαλύτερα μεγέθη πλέγματος οδηγούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των κόμβων και εν τέλει σε περισσότερο χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση του πακέτου από τον κόμβο-πηγή στον προορισμό.

Ακολουθεί σε απόδοση ο GPSR ο οποίος εισάγει ελαφρώς μεγαλύτερη καθυστέρηση από τον GPSR-N και η αύξηση της καθυστέρησης αυτής ακολουθεί όπως αναμενόταν και την αύξηση του μεγέθους του πλέγματος.

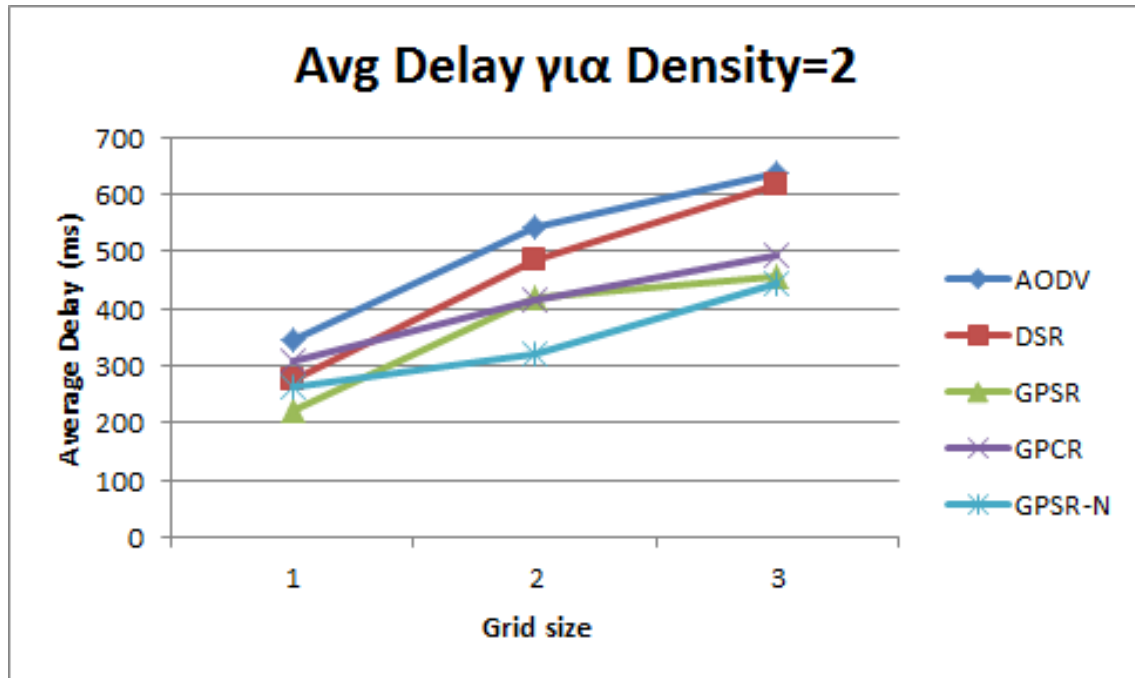
Ο GPCR εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με τον GPSR ακολουθώντας ίδια αύξηση της μέσης από άκρο σε άκρο καθυστέρησης έχοντας όμως σχετικά μεγαλύτερη τιμή για κάθε περίπτωση μεγέθους πλέγματος.

Ακολουθώς, ο DSR εισάγει μεγαλύτερη καθυστέρηση από τα προηγούμενα πρωτόκολλα έχοντας παράλληλα παρόμοια συμπεριφορά και αυξάνοντας την καθυστέρηση όσο αυξάνεται το μέγεθος του πλέγματος.

Τέλος, ο AODV παρουσιάζει την χειρότερη απόδοση αναφορικά με την καθυστέρηση που εισάγει κατά την παράδοση του πακέτου. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις, η

καθυστέρηση που εμφανίζει το πρωτόκολλο είναι παρόμοια με των υπόλοιπων, αν και χειρότερη. Στην τελευταία περίπτωση, παρατηρείται πως η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση αυξάνεται ραγδαία και διαφοροποιείται αρκετά από τις καθυστερήσεις που εισάγουν τα άλλα πρωτόκολλα.

### 3.5.6 Average Delay για μεσαίο Density



Εικόνα 31: Average Delay στα τρία grid για Density=2. Τα GPSR-N και GPSR έχουν τις χαμηλότερες καθυστερήσεις.

Η μέση καθυστέρηση που επιτυγχάνει ο GPSR-N είναι η χαμηλότερη μεταξύ των πρωτοκόλλων. Η αύξηση του μεγέθους του πλέγματος αυξάνει την πιθανότητα να υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των κόμβων και άρα να απαιτείται περισσότερος χρόνος για την κάλυψη αυτών των αποστάσεων κατά τη διάδοση του πακέτου καθώς δημιουργούνται μονοπάτια μεγαλύτερου μήκους.

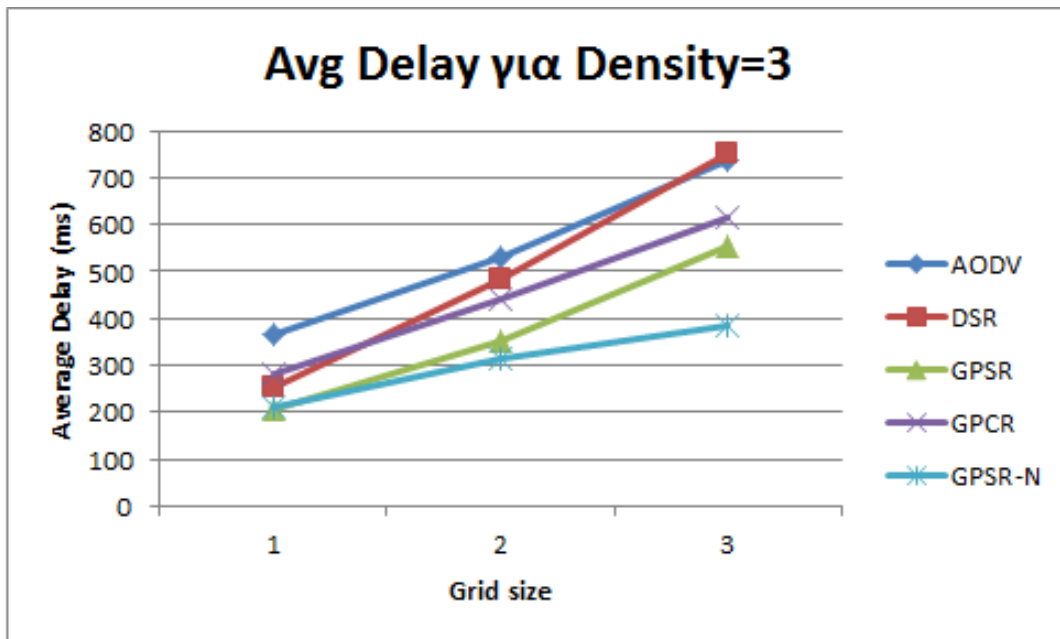
Ο GPSR παρουσιάζει την επόμενη καλύτερη επίδοση από τον GPSR-N αναφορικά με την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση. Η αύξηση του μεγέθους πόλης προκαλεί απότομη αύξηση της καθυστέρησης που εισάγει το πρωτόκολλο κατά την μετάδοση του πακέτου ενώ η μετάβαση από το μεσαίο στο μεγάλο μέγεθος πόλης, η μετάβαση αυτή είναι ομαλότερη με μικρότερη αύξηση της καθυστέρησης.

Ο GPCR είναι ο αμέσως χειρότερος αλγόριθμος δρομολόγησης. Εμφανίζει μεγαλύτερους χρόνους παράδοσης πακέτων συγκριτικά με τα προαναφερθέντα πρωτόκολλα με παράλληλη γραμμική αύξηση της καθυστέρησης όσο αυξάνεται και το μέγεθος του πλέγματος-πόλης.

Ο DSR επιτυγχάνει πολύ χαμηλή καθυστέρηση για την περίπτωση του μικρότερου πλέγματος πόλης. Κατά την αύξηση του μεγέθους του πλέγματος, οι χρόνοι παράδοσης πακέτων, από άκρο σε άκρο, αυξάνονται σημαντικά. Οι μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των κόμβων δημιουργούν μεγάλα μονοπάτια για τη δρομολόγηση των πακέτων που εν τέλει αυξάνουν την καθυστέρηση που εισάγεται.

Τέλος, ο AODV εμφανίζει τη μεγαλύτερη καθυστέρηση σε σχέση με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα για όλες τις περιπτώσεις μεγέθους πόλης. Ακόμη, η μεταβολή της καθυστέρησης σε κάθε περίπτωση ακολουθεί αυτή του μεγέθους της πόλης, με μεγαλύτερα μεγέθη πλέγματος να οδηγούν σε μεγαλύτερες καθυστερήσεις μετάδοσης πακέτου.

### 3.5.7 Average Delay για μεγάλο Density



Εικόνα 33: Average Delay στα τρία grid για Density=2. Τα πρωτόκολλα έχουν ίδια συμπεριφορά με το GPSR-N να αποδίδει σημαντικά καλύτερα.



Αρχικά, ο GPSR-N επιτυγχάνει την ταχύτερη παράδοση πακέτων από τον κόμβο-πηγή στον προορισμό. Ακόμη, η αύξηση στο χρόνο που παρουσιάζει είναι ομαλότερη και διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα χάρη στην επαρκή παρουσία κόμβων που δημιουργούν βέλτιστα μονοπάτια.

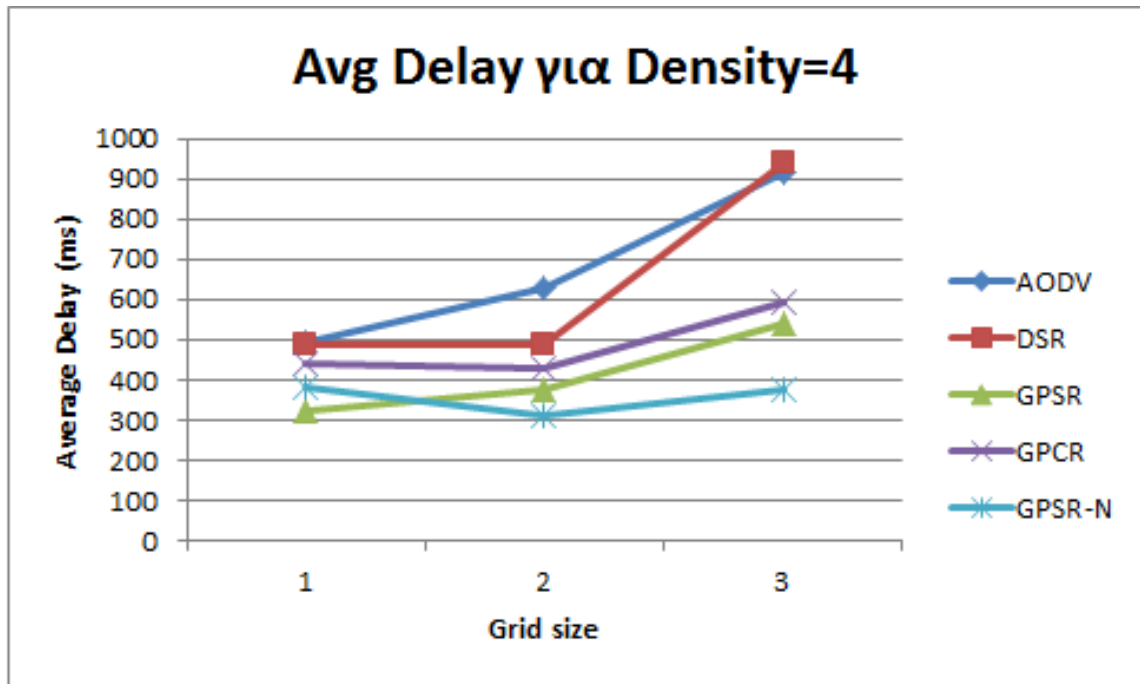
Ο GPSR αποδίδει χειρότερα συγκριτικά με τον GPSR-N και με σχετικά απότομη αύξηση της καθυστέρησης, όταν αυξάνεται το μέγεθος του πλέγματος. Σε τοπολογίες μεγαλύτερου μεγέθους είναι πιθανό να είναι τέτοια η διάταξη των κόμβων που δημιουργούνται κενά στο connectivity του δικτύου και είναι αναγκαία η μετάβαση σε recovery mode από το πρωτόκολλο. Αυτή η διαδικασία επιβαρύνει τον χρόνο παράδοσης ενός πακέτου.

Ο GPCR επιτυγχάνει μεγαλύτερη από άκρο σε άκρο καθυστέρηση για την προώθηση του πακέτου σε σχέση με τα προηγούμενα πρωτόκολλα. Ακόμη, η μεταβολή της καθυστέρησης αυτής είναι γραμμική, ακολουθώντας τη μεταβολή του μεγέθους της πόλης.

Η καμπύλη που απεικονίζει την καθυστέρηση του DSR εμφανίζει χαμηλή τιμή για το μικρότερο σενάριο. Η κλίση της όμως καταδεικνύει απότομη αύξηση της μέσης από άκρο σε άκρο καθυστέρησης καθώς το μέγεθος του πλέγματος αυξάνεται.

Τέλος, ο AODV εμφανίζει τη μεγαλύτερη καθυστέρηση, κατά μέσο όρο, συγκριτικά με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα. Η καθυστέρηση αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος του πλέγματος της πόλης καθώς μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των κόμβων που επικοινωνούν οδηγούν και σε μεγαλύτερο απαιτούμενο χρόνο για την επιτυχή παράδοση ενός πακέτου.

### 3.5.8 Average Delay για μέγιστο Density



Εικόνα 35: Average Delay στα τρία grid για Density=4. Οι GPSR-N, GPCR και GPSR εμφανίζουν τις χαμηλότερες καθυστερήσεις και παρόμοια συμπεριφορά

Ο GPSR-N εμφανίζει την καλύτερη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση ανάμεσα στα πρωτόκολλα. Καταφέρνει να διατηρήσει χαμηλή καθυστέρηση ενώ αυτή φαίνεται να μην επηρεάζεται από το μέγεθος του πλέγματος. Η διαθεσιμότητα πολλών κόμβων στην τοπολογία οδηγεί στη δημιουργία σύντομων μονοπατιών για τη μετάδοση των πακέτων.

Ο GPSR είναι ο επόμενος καλύτερος αλγόριθμος αναφορικά με τη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση καθώς διατηρείται σε σχετικά χαμηλές τιμές. Ακόμη, η αύξηση του μεγέθους του πλέγματος έχει μικρή επίδραση στον απαιτούμενο χρόνο για την παράδοση ενός πακέτου χωρίς όμως να αποφεύγεται η αύξηση του χρόνου αυτού.

Ο GPCR εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με τον GPSR, με την καθυστέρηση όμως που εισάγει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Ταυτόχρονα, επηρεάζεται και από την αύξηση του μεγέθους του πλέγματος καθώς αυξάνεται η καθυστέρηση που παρατηρείται σε κάθε περίπτωση.

Ο DSR παρουσιάζει αυξημένη καθυστέρηση συγκριτικά με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα. Η αύξηση του μεγέθους του πλέγματος φαίνεται να μην επηρεάζει τους χρόνους που επιτυγχάνει το πρωτόκολλο στη δεύτερη περίπτωση. Αντίθετα, στην τρίτη περίπτωση με

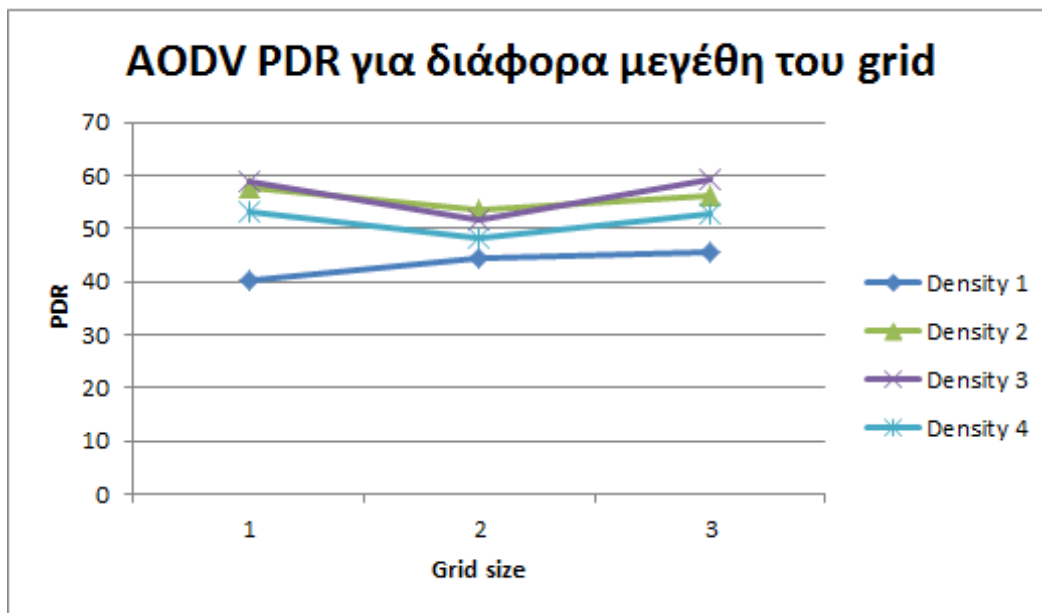
το μεγαλύτερο πλέγμα, παρατηρείται απότομη αύξηση της καθυστέρησης που εισάγει το πρωτόκολλο.

Τέλος, ο AODV εμφανίζει τη μεγαλύτερη μέση καθυστέρηση από όλα τα πρωτόκολλα. Ακόμη, παρατηρείται απότομη αύξηση του χρόνου που απαιτείται για την προώθηση του πακέτου όταν αυξάνεται το μέγεθος της πόλης καθώς σχηματίζονται μονοπάτια μεγάλου μήκους μεταξύ απομακρυσμένων κόμβων και ως εκ τούτου αυξάνεται ανάλογα ο απαιτούμενος χρόνος που χρειάζεται το πρωτόκολλο για να μεταδώσει το πακέτο από τον κόμβο-πηγή στον προορισμό.

### 3.6 Απόδοση πρωτοκόλλων για διάφορα Grid size/densities

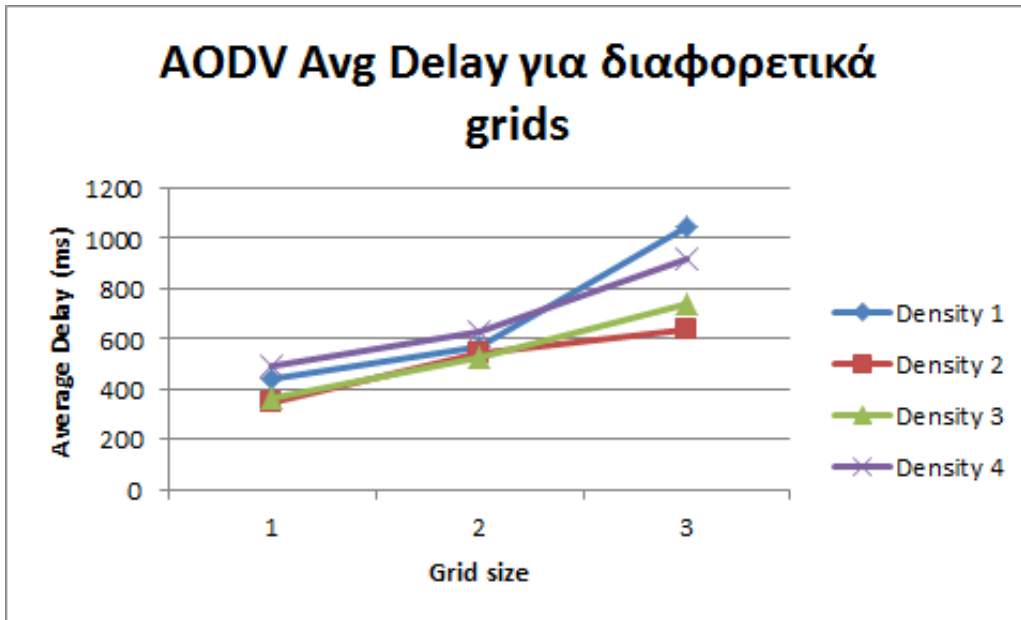
Εξετάζοντας κάθε πρωτόκολλο ξεχωριστά, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του καθώς αλλάζει το μέγεθος του πλέγματος ή η πυκνότητα των κόμβων.

#### 3.6.1 AODV



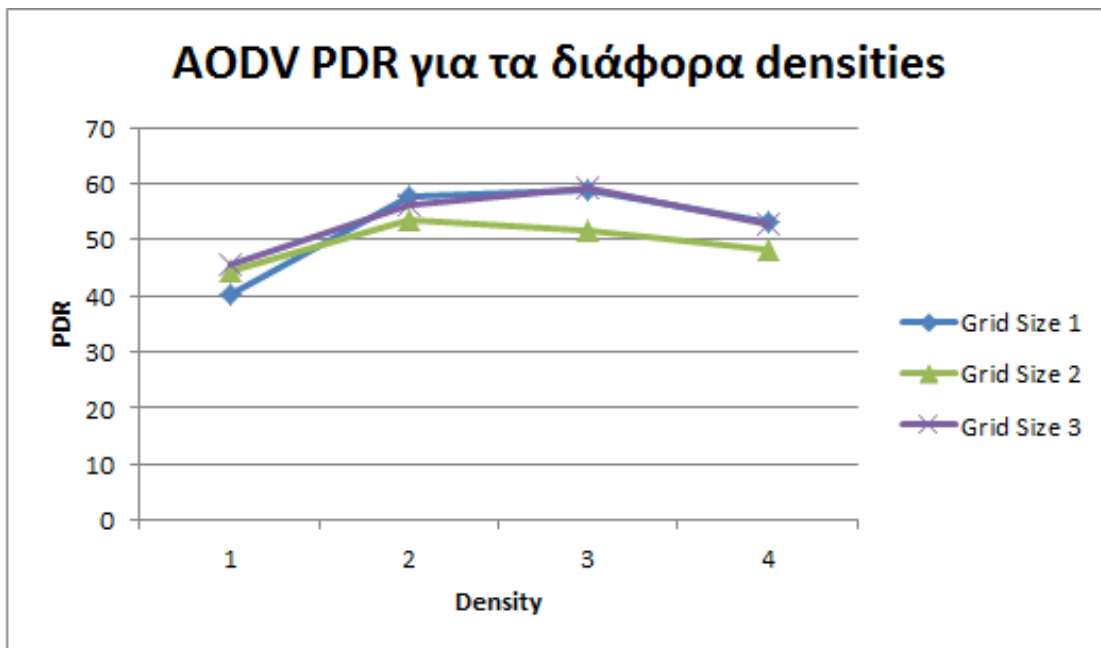
Εικόνα 36: AODV PDR στα διάφορα grid με τις ενδιάμεσες πυκνότητες να έχουν την καλύτερη απόδοση

Για τον AODV παρατηρείται καλή απόδοση για τις δύο ενδιάμεσες πυκνότητες κόμβων. Για χαμηλότερες πυκνότητες, το πρωτόκολλο έχει τη χειρότερη απόδοση ενώ για πολύ υψηλή πυκνότητα κόμβων η απόδοση του σε ότι αφορά το PDR εμφανίζει μικρή πτώση.



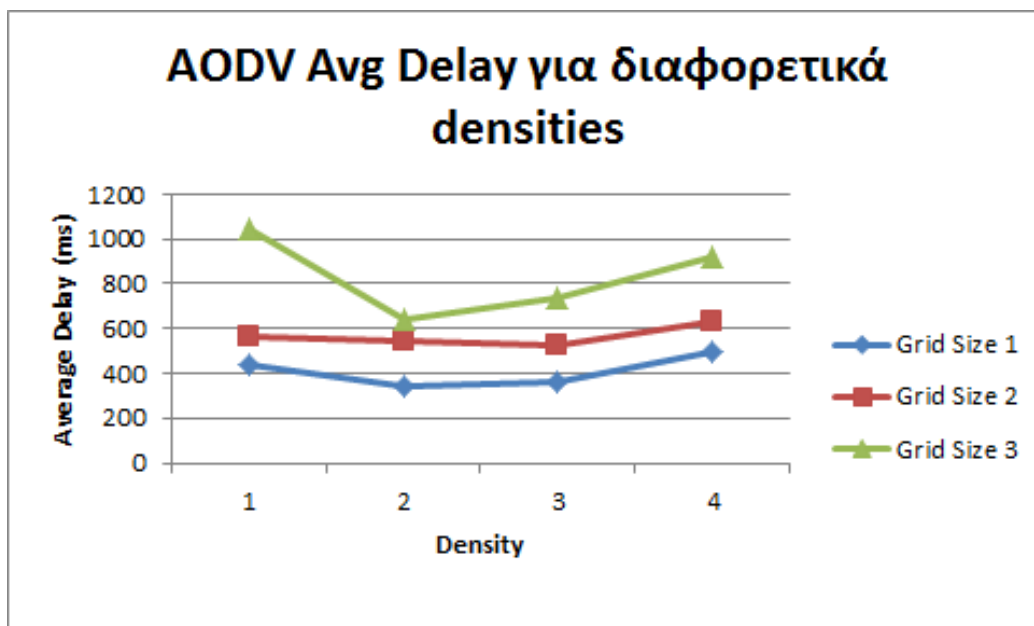
Εικόνα 37: AODV Average Delay στα διάφορα grid. Οι μεσαίες πυκνότητες εμφανίζουν τις χαμηλότερες καθυστερήσεις

Αναφορικά με τη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση παρατηρείται αναμενόμενη αύξηση της καθώς μεγαλώνει το μέγεθος του πλέγματος, για όλες τις πυκνότητες κόμβων. Η αραιότερη τοπολογία εμφανίζει και τη μεγαλύτερη καθυστέρηση.



Εικόνα 38: AODV PDR για τα διάφορα Densities. Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά σε όλες τις περιπτώσεις

Στο μικρότερο μέγεθος πλέγματος, ο AODV εμφανίζει αρχικά τη χαμηλότερη τιμή του PDR ενώ κατά την αύξηση της πυκνότητας κόμβων, αυξάνεται σημαντικά η απόδοση του, η οποία εμφανίζει πτώση στην περίπτωση της πιο πυκνής τοπολογίας. Ακολούθως, στο μεσαίο μέγεθος πλέγματος, παρατηρείται αρχικά καλύτερη απόδοση η οποία όμως δεν ακολουθεί την αύξηση της προηγούμενης τοπολογίας ενώ κι αυτή φθίνει για τη μέγιστη πυκνότητα κόμβων. Τέλος, η περίπτωση του μεγάλου μεγέθους πλέγματος προσεγγίζει αρκετά πιστά αυτή του μικρότερου μεγέθους εμφανίζοντας αρχικά μεγαλύτερο PDR αλλά με ακολούθως ομαλότερη αύξηση του που οδηγεί στην οριακή ταύτιση των δύο περιπτώσεων.

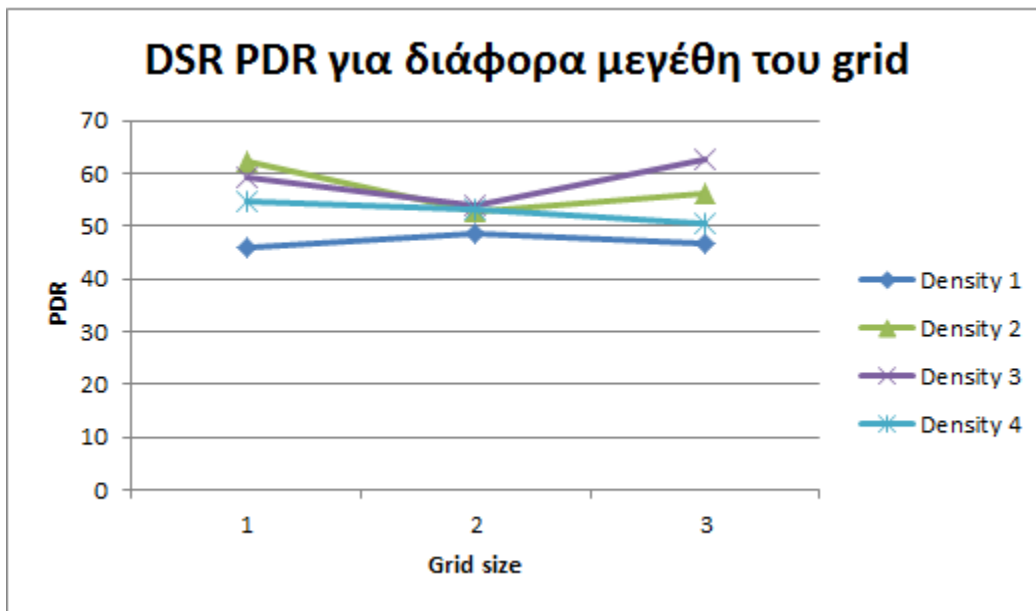


Εικόνα 39: AODV Average Delay για τα διάφορα Densities. Όσο μικρότερο είναι το πλέγμα, η καθυστέρηση είναι και αναμενόμενα μικρότερη

Σε ότι αφορά την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση, παρατηρείται πως ο AODV εμφανίζει τις μικρότερες τιμές στην περίπτωση του μικρότερου μεγέθους πόλης. Μικρά μεγέθη πόλης σημαίνουν πως οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων που επικοινωνούν θα είναι μικρές και άρα ο χρόνος παράδοσης των πακέτων από την πηγή στον προορισμό θα είναι μικρός. Ακόμη, παρατηρούνται οι μικρότερες τιμές της μετρικής στις ενδιάμεσες πυκνότητες κόμβων ενώ παρατηρείται ελαφρά αύξηση στις δύο ακραίες περιπτώσεις πυκνότητας κόμβων. Καθώς το μέγεθος της πόλης αυξάνεται, σημειώνεται αύξηση στον μέσο χρόνο που απαιτείται για τη διάδοση του πακέτου από την πηγή στον προορισμό καθώς αυξάνεται ταυτόχρονα και η απόσταση των κόμβων μεταξύ τους. Τέλος, στην

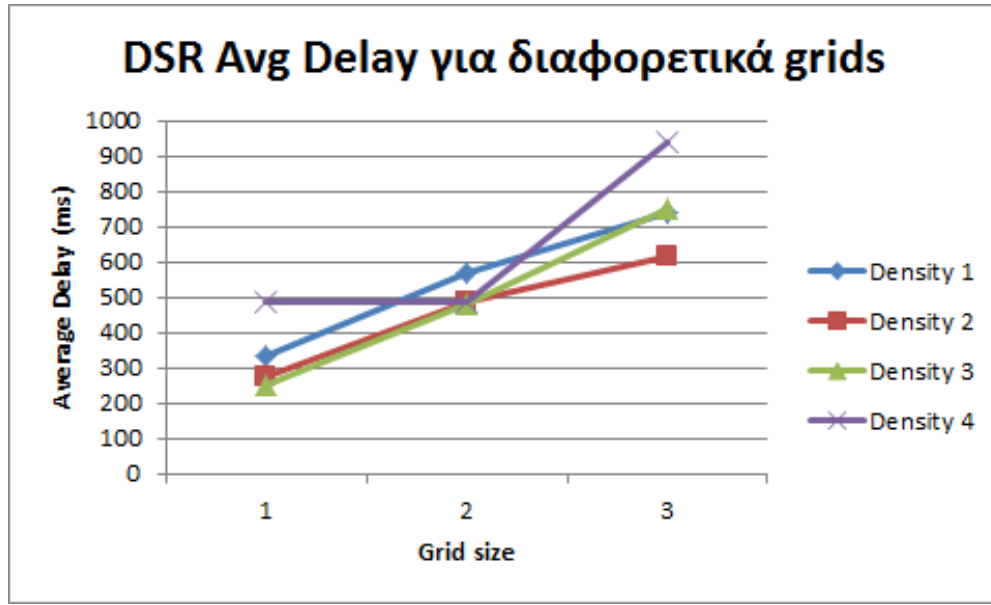
περίπτωση του μεγάλου πλέγματος, οι χρόνοι παράδοσης πακέτων είναι εμφανώς αυξημένοι σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, οι ακραίες περιπτώσεις πυκνότητας κόμβων σημειώνουν τις μεγαλύτερες καθυστερήσεις με τις ενδιάμεσες περιπτώσεις να είναι σαφώς καλύτερες σε απόδοση. Στη γενική περίπτωση, με την αύξηση του μεγέθους της πόλης και ενώ η τοπολογία δε διαθέτει επαρκή αριθμό κόμβων για τη δημιουργία ισχυρών μονοπατιών φυσιολογικά δε δημιουργούνται ισχυρά μονοπάτια τα οποία είναι πιθανό να χρειαστούν επισκευή, επιβαρύνοντας σημαντικά τον χρόνο παράδοσης ενός πακέτου, γεγονός που αποτυπώνεται στο διάγραμμα.

### 3.6.2 DSR



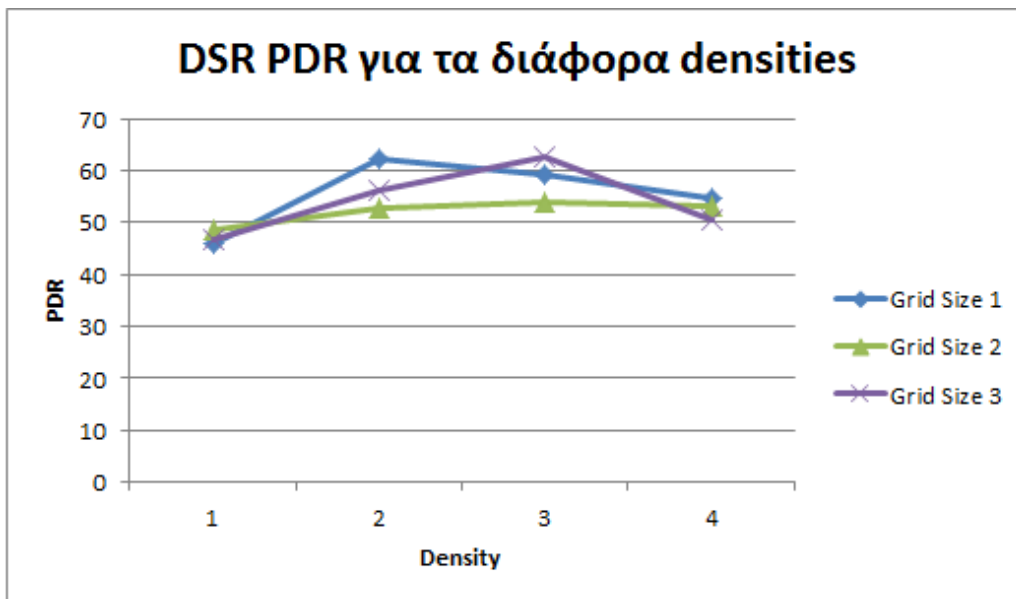
Εικόνα 40: DSR PDR για διάφορα grid. Οι ενδιάμεσες πυκνότητες αποδίδουν καλύτερα

Ομοίως με τον AODV, ο DSR εμφανίζει καλύτερη απόδοση για τις ενδιάμεσες πυκνότητες κόμβων με τη χαμηλότερη και υψηλότερη πυκνότητα να μην αποδίδουν εξίσου καλά.



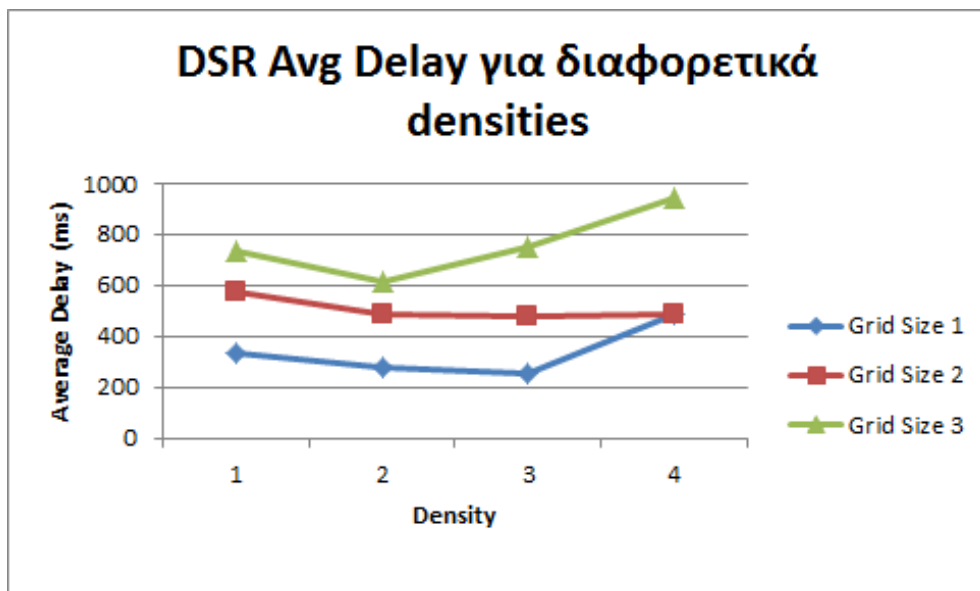
Εικόνα 41: DSR Average Delay για διάφορα grids. Οι διάφορες πυκνότητες πέραν της μεγαλύτερης, έχουν παρόμοια απόδοση.

Στην περίπτωση της μέσης καθυστέρησης παρατηρείται φυσιολογική αύξηση της όσο μεγαλώνει το μέγεθος του grid με την περίπτωση της μέγιστης πυκνότητας να εμφανίζει σταθερή καθυστέρηση στις δύο πρώτες τοπολογίες και να αυξάνεται ραγδαία στην τελευταία. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη κενών στη συνδεσιμότητα των κόμβων αλλά και τη δημιουργία μεγάλων σε μήκος μονοπατιών για τη δρομολόγηση πακέτων μεταξύ πολύ απομακρυσμένων κόμβων.



Εικόνα 42: DSR PDR για διάφορα densities.

Στην περίπτωση του DSR για το μικρότερο μέγεθος πλέγματος παρατηρείται αρχικά χαμηλό PDR το οποίο αυξάνεται και παραμένει σχετικά υψηλό στις δύο ενδιάμεσες πυκνότητες κόμβων. Η μέγιστη τιμή του PDR εμφανίζεται για τη δεύτερη κατά σειρά πυκνότητα κόμβων με τις μεγαλύτερες πυκνότητες να εμφανίζουν μικρή πτώση της τιμής του PDR διατηρώντας πάντα μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την αραιότερη τοπολογία. Στο μεσαίο μέγεθος πόλης παρατηρείται μικρή αύξηση του PDR καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων, με το μικρότερο ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων να καταγράφεται στην αραιότερη περίπτωση. Τέλος, στο μέγιστο μέγεθος πόλης, σημειώνεται σταδιακή αύξηση του PDR με εξαίρεση την τελευταία περίπτωση όπου παρατηρείται ραγδαία μείωση του ποσοστού παραδιδόμενων πακέτων. Η μείωση αυτή πιθανώς να οφείλεται σε συμπτωματικές απώλειες στην επικοινωνία των κόμβων λόγω της παρουσίας κενών στο δίκτυο. Τα κενά αυτά δημιουργούνται από τη μη βέλτιστη διασκόρπιση των κόμβων εντός του δικτύου που οδηγούν σε δημιουργία μη ισχυρών μονοπατιών για την προώθηση των πακέτων.



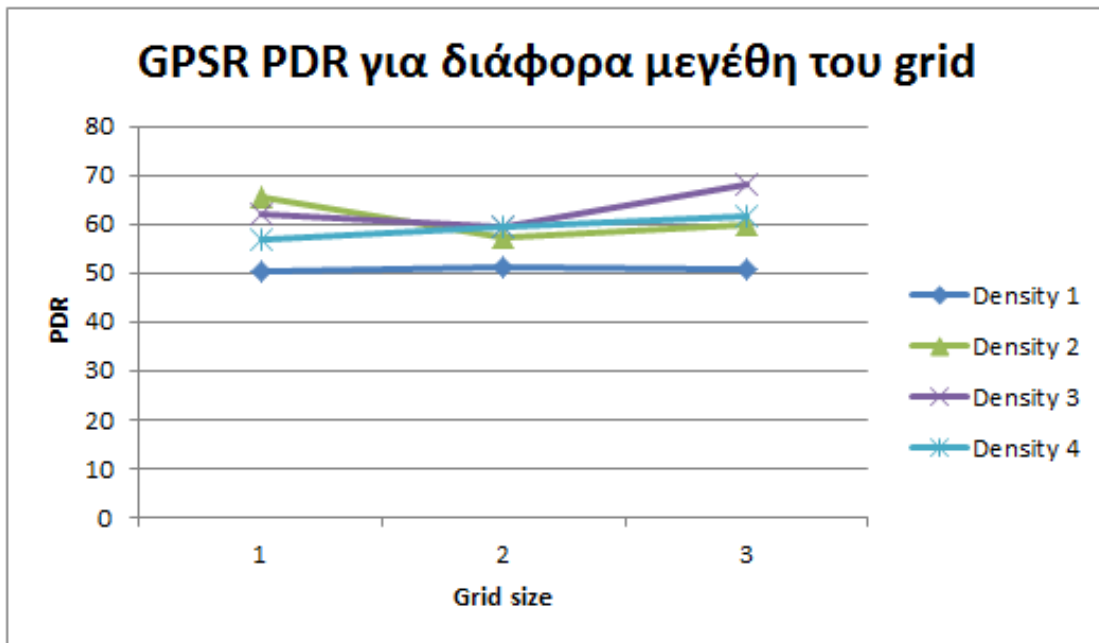
Εικόνα 42: DSR Average Delay για διάφορα densities. Το μεγαλύτερο μέγεθος πλέγματος εμφανίζει σημαντικά αυξημένη καθυστέρηση.

Ο DSR εμφανίζει τη μικρότερη καθυστέρηση σε όλες τις πυκνότητες στην περίπτωση του μικρότερου μεγέθους πλέγματος. Η μικρή απόσταση μεταξύ των κόμβων που επικοινωνούν σημαίνει πως τα μονοπάτια που σχηματίζονται θα είναι επίσης μικρά σε μήκος και άρα ο χρόνος για να τα διασχίσει ένα πακέτο θα είναι μικρός. Για μεσαίο μέγεθος πλέγματος, η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση. Σε μικρότερες πυκνότητες, ο χρόνος παράδοσης είναι



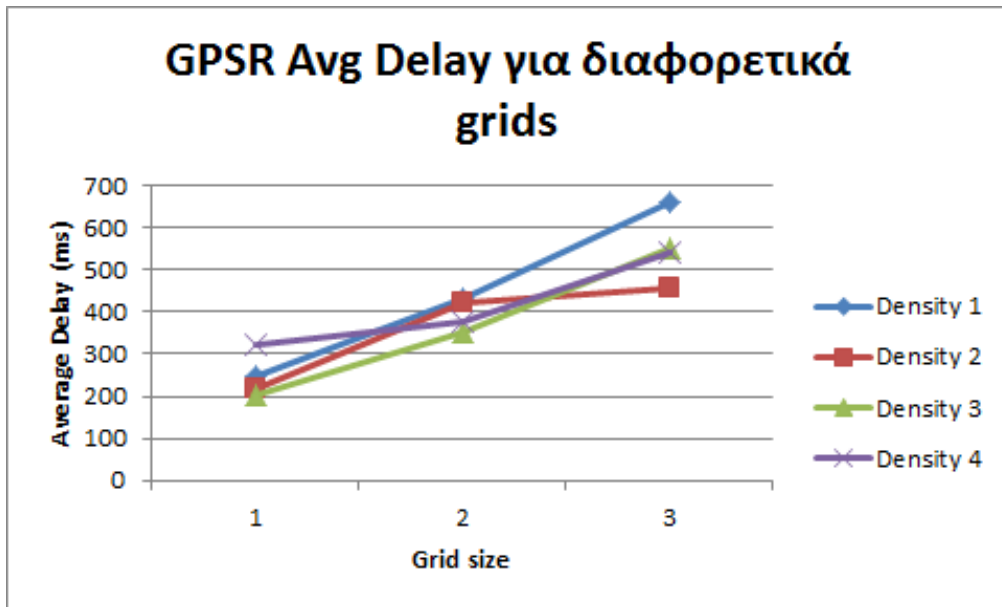
αυξημένος λόγω πιθανής απουσίας συνοχής στο δίκτυο, ενώ όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων, η καθυστέρηση τείνει να μειωθεί. Τέλος, στην περίπτωση του μεγάλου μεγέθους πλέγματος, οι καθυστερήσεις που εισάγονται είναι σαφώς μεγαλύτερες σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις ενώ οι μικρότερες τιμές παρατηρούνται στις ενδιάμεσες περιπτώσεις. Στη μέγιστη πυκνότητα κόμβων παρατηρείται αύξηση της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης για την παράδοση ενός πακέτου. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε πιθανή μεγάλη απόσταση των κόμβων που επικοινωνούν και άρα τα πακέτα που αποστέλλονται πρέπει να περάσουν από πολλούς διαφορετικούς κόμβους, καθυστερώντας σημαντικά ενώ υπάρχει και η πιθανότητα της μη διαθεσιμότητας ενός προϋπάρχοντος μονοπατιού από το οποίο θα απαιτηθεί η (χρονοβόρα) επισκευή του.

### 3.6.3 GPSR



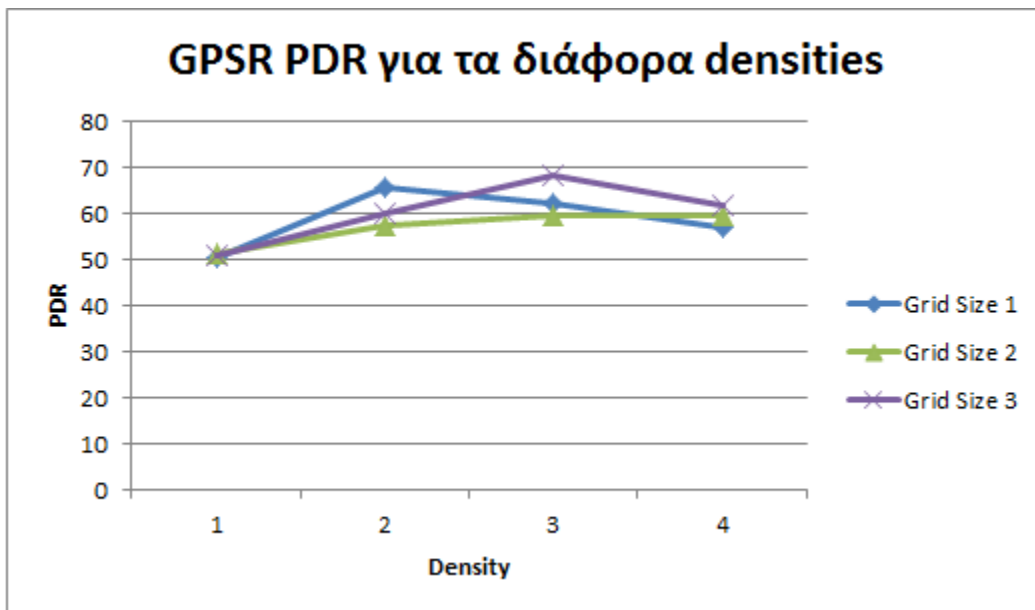
Εικόνα 43: GPSR PDR για διάφορα grid. Η αραιότερη τοπολογία έχει εμφανώς μειωμένη απόδοση.

Ο GPSR επιτυγχάνει χαμηλό ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων μόνο για την χαμηλότερη πυκνότητα κόμβων ενώ οι υπόλοιπες περιπτώσεις συμπεριφέρονται παρόμοια, με την τρίτη πυκνότητα να εμφανίζει ελαφρώς καλύτερη απόδοση στο τελευταίο σενάριο.



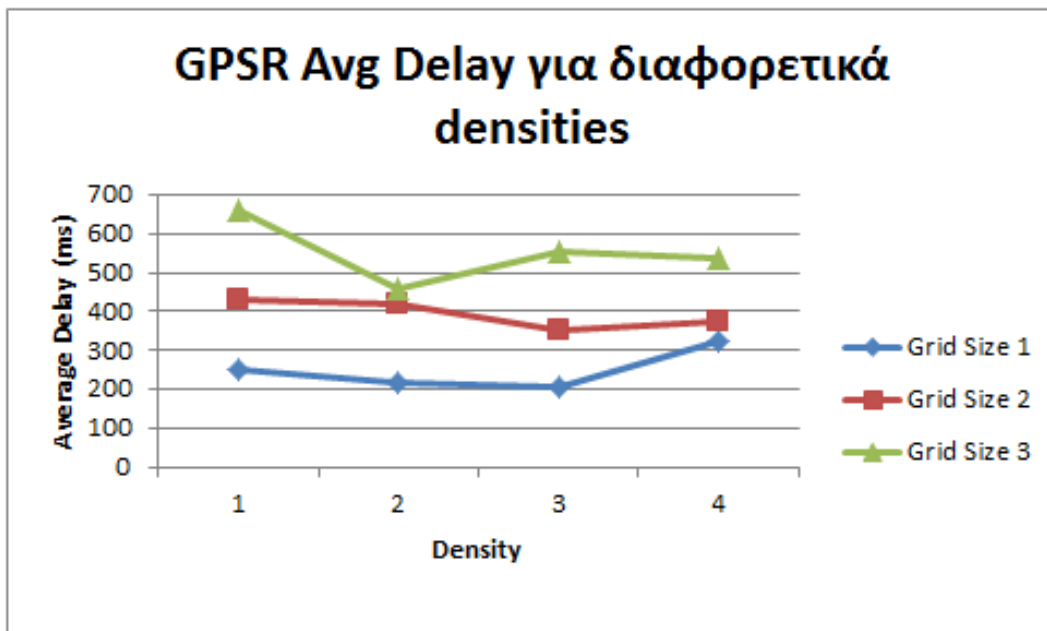
Εικόνα 44: GPSR Average Delay για διάφορα grids

Η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση που παρουσιάζει ο GPSR εμφανίζει φυσιολογική μεταβολή καθώς αυξάνεται το μέγεθος του χώρου προσομοίωσης. Οι ενδιάμεσες τοπολογίες επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση.



Εικόνα 45: GPSR PDR για τα διαθέσιμα densities

Ο GPSR, στην περίπτωση του μικρού μεγέθους πόλης εμφανίζει αρχικά το χαμηλότερο PDR. Η τιμή του PDR αυξάνεται ραγδαία αρχικά κατά την αύξηση της πυκνότητας των οχημάτων. Ακολούθως, εμφανίζει σχετική μείωση στις επόμενες δύο πυκνότητες. Για το μεσαίο μέγεθος του πλέγματος, η τιμή του ποσοστού παραδιδόμενων πακέτων παρουσιάζει μια σταθερή αύξηση με χαμηλό ρυθμό καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των οχημάτων. Τέλος, στο μεγαλύτερο δυνατό μέγεθος πόλης, παρατηρείται αρχικά αύξηση του ποσοστού των παραδιδόμενων πακέτων από το πρωτόκολλο καθώς αυξάνεται και η πυκνότητα των κόμβων με την τελευταία περίπτωση, όπου παρουσιάζεται η μέγιστη πυκνότητα οχημάτων, να σημειώνει μια μικρή μείωση απόδοσης αναφορικά με το PDR.

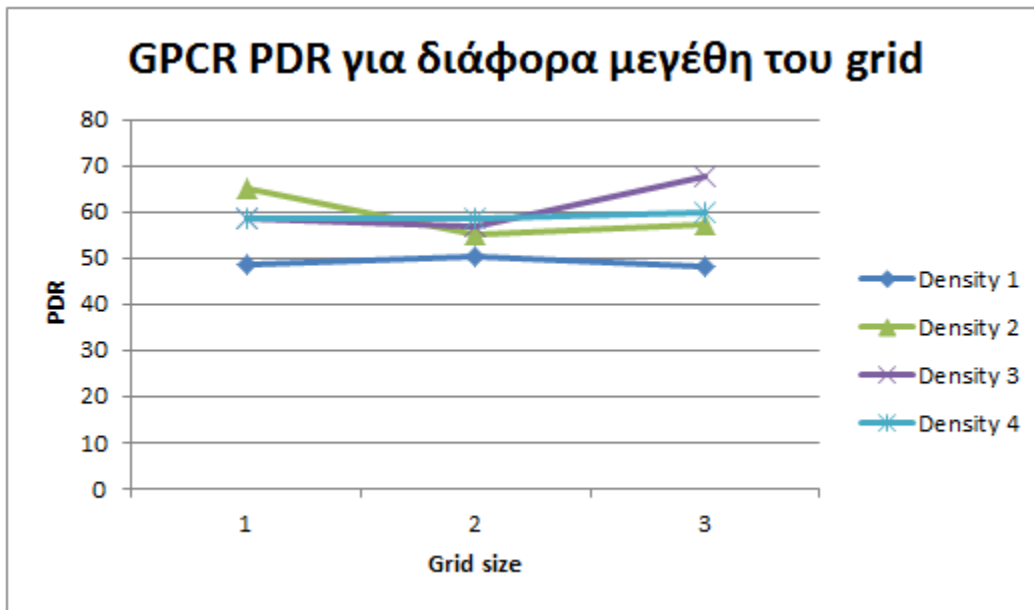


Εικόνα 46: GPSR Average Delay για διάφορα densities. Η αύξηση του μεγέθους του πλέγματος αυξάνει και τη μέση καθυστέρηση σε κάθε περίπτωση

Ο GPSR καταφέρνει να διατηρήσει χαμηλή από άκρο σε άκρο καθυστέρηση στην περίπτωση του μικρού μεγέθους πλέγματος. Αρχικά, η μέση καθυστέρηση στην αραιότερη διάταξη κόμβων εμφανίζεται μεγαλύτερη σε σχέση με τις ενδιάμεσες πυκνότητες κόμβων. Η παρουσία περισσότερων κόμβων οδηγεί στην αποφυγή της ανάγκης επαναδρομολόγησης του πακέτου μέσω του recovery mode του πρωτοκόλλου. Η αύξηση της μέσης από άκρο σε άκρο καθυστέρησης στη μέγιστη πυκνότητα κόμβων πιθανώς οφείλεται σε ιδιομορφία της τοπολογίας και ύπαρξη πολλών κενών στο δίκτυο. Στην περίπτωση του μεσαίου μεγέθους πόλης, το πρωτόκολλο καταφέρνει να διατηρήσει σχετικά σταθερή και χαμηλή τη μέση καθυστέρηση η οποία μειώνεται όσο αυξάνονται τα διαθέσιμα οχήματα για τη δρομολόγηση του πακέτου. Τέλος, στην περίπτωση του

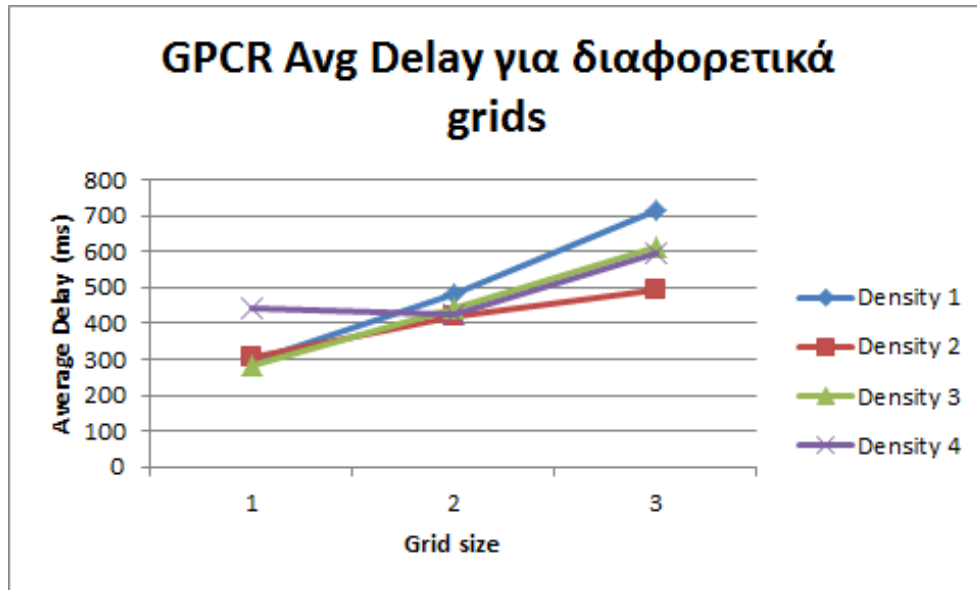
μεγάλου μεγέθους πλέγματος, οι χρόνοι παράδοσης ενός πακέτου είναι εμφανώς αυξημένοι. Στην αραιότερη περίπτωση κόμβων, η καθυστέρηση είναι μέγιστη, ενώ με την αύξηση των κόμβων η καθυστέρηση αυτή μειώνεται σημαντικά.

### 3.6.4 GPCR



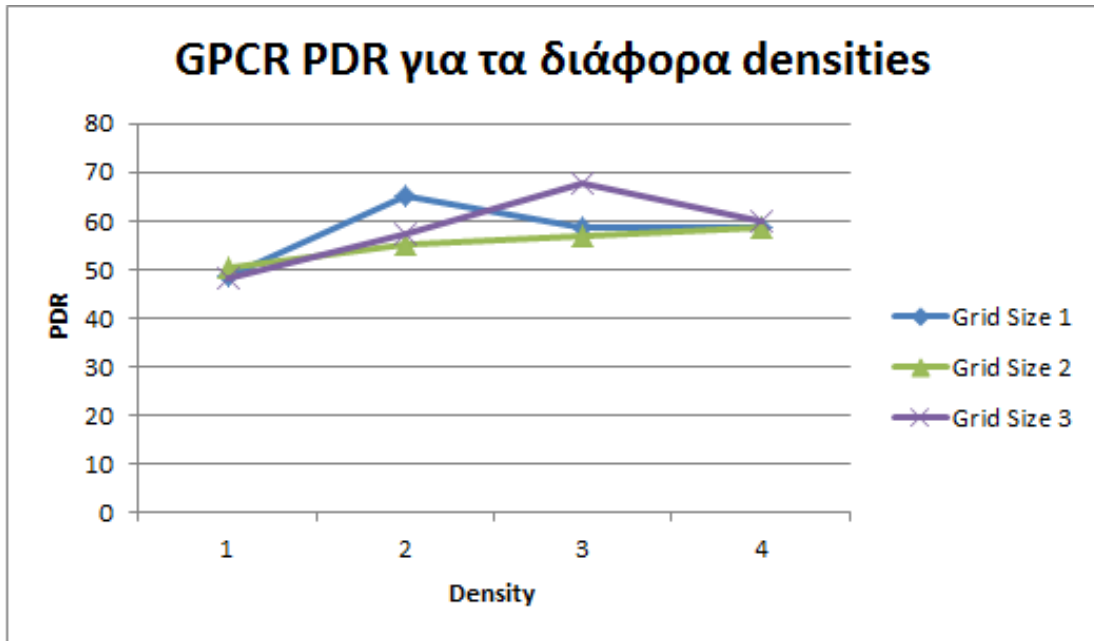
Εικόνα 47: GPCR PDR για διάφορα grid. Η μικρότερη πυκνότητα έχει τη χειρότερη απόδοση

Στον GPCR εμφανίζεται παρόμοια απόδοση για τις 3 μεγαλύτερες πυκνότητες οχημάτων, ενώ η μικρότερη πυκνότητα έχει εμφανώς χειρότερη απόδοση συγκριτικά με τις υπόλοιπες.



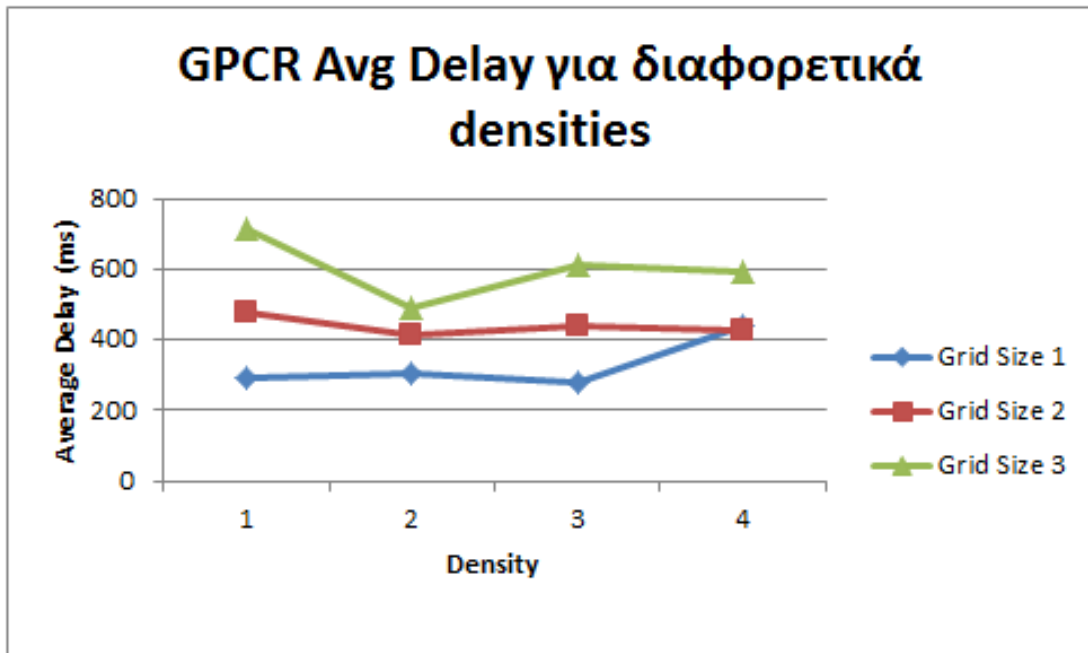
Εικόνα 48: GPCR Average Delay για διάφορα grid. Οι τέσσερις περιπτώσεις εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά

Η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση ακολουθεί την αύξηση του μεγέθους του πλέγματος. Όσο αυξάνεται η απόσταση που πρέπει να διανύσει ένα πακέτο για να παραδοθεί στον τελικό κόμβο, αυξάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της αποστολής. Ο αυξημένος χρόνος που παρατηρείται στη μέγιστη πυκνότητα κόμβων και στο μικρότερο μέγεθος πλέγματος εμφανίζεται στην ίδια περίπτωση και στα υπόλοιπα πρωτόκολλα, γεγονός που οφείλεται πιθανώς στη δρομολόγηση πακέτων μεταξύ απομακρυσμένων κόμβων με πιθανή ύπαρξη ορισμένων κενών στο δίκτυο.



Εικόνα 49: GPCR PDR για διάφορα densities

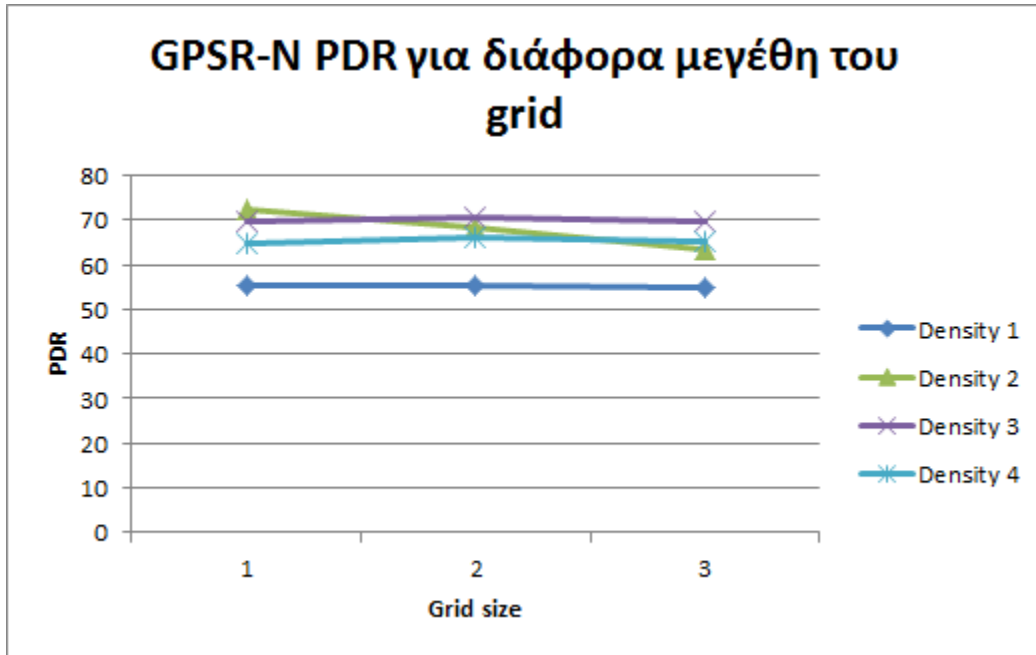
Ο GPCR στην περίπτωση του μικρότερου μεγέθους πόλης εμφανίζει αρχικά χαμηλό PDR. Ακολούθως, όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων στο πλέγμα, το PDR αυξάνεται αρχικά απότομα και στη συνέχεια ομαλοποιείται. Η ύπαρξη πολλών κόμβων στην τοπολογία, παρέχει επαρκή αριθμό συντονιστών στο πρωτόκολλο, διευκολύνοντας τη διαδικασία προώθησης των πακέτων. Η γραφική παράσταση του PDR μεσαίου μεγέθους πλέγματος εμφανίζει σταθερή αύξηση καθώς το πλήθος των κόμβων -και άρα το πλήθος των υποψήφιων συντονιστών- αυξάνεται. Τέλος, στην περίπτωση του μεγάλου μεγέθους πλέγματος, οι μικρές πυκνότητες κόμβων παρουσιάζουν χαμηλότερο PDR σε σχέση με τις υψηλότερες πυκνότητες καθώς είναι αναγκαία η παρουσία συντονιστών στις διασταυρώσεις, κάτι που οι μικρότερες πυκνότητες δε μπορούν να εγγυηθούν.



Εικόνα 50: GPCR Average Delay για διάφορα densities

Ο GPCR παρουσιάζει τη μικρότερη μέση καθυστέρηση στην περίπτωση του μικρότερου μεγέθους πλέγματος, ομοίως με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα. Η καθυστέρηση αυτή είναι σχετικά σταθερή με μια μικρή αύξηση να παρατηρείται στην περίπτωση της πιο πυκνής τοπολογίας η οποία μπορεί να οφείλεται στη συγκεκριμένη τοπολογία που παρήχθη. Η μεσαία τοπολογία αρχικά παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή καθυστέρησης για την αραιότερη τοπολογία ενώ καθώς η πυκνότητα των οχημάτων αυξάνεται, η καθυστέρηση παρουσιάζει μικρή μείωση καθώς καθίσταται ευκολότερη η ανακάλυψη μονοπατιών που είναι συντομότερα και πιο συνεκτικά. Τέλος, στην περίπτωση του μεγάλου μεγέθους πόλης, παρατηρείται αύξηση της καθυστέρησης συγκριτικά με τις δύο άλλες περιπτώσεις. Στο πολύ αραιό σενάριο, ο χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου είναι σημαντικά μεγαλύτερος συγκριτικά με τα σενάρια που διαθέτουν μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων. Κατά την αύξηση των κόμβων στο πλέγμα, η καθυστέρηση εμφανίζει μεγάλη μείωση αρχικά, ενώ σταθεροποιείται σε λίγο μεγαλύτερη τιμή στη συνέχεια.

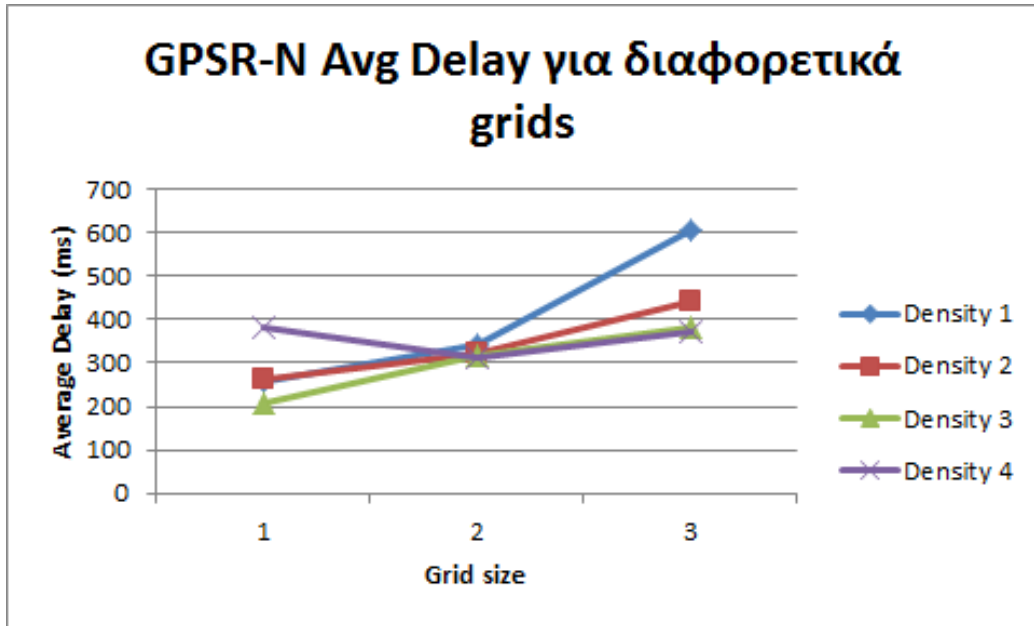
### 3.6.5 GPSR-N



Εικόνα 51: GPSR-N PDR για διάφορα grid. Οι τρεις μεγαλύτερες πυκνότητες έχουν παρόμοια απόδοση με την αραιότερη περίπτωση να έχει μειωμένο PDR

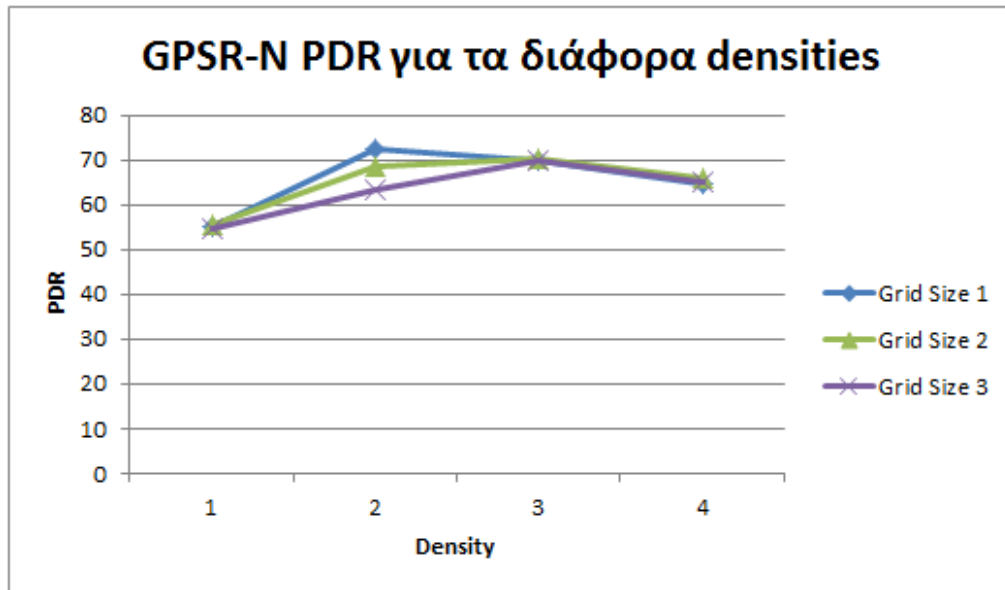
Ομοίως με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα, το GPSR-N αποδίδει σαφώς χειρότερα στην περίπτωση που οι κόμβοι έχουν τη χαμηλότερη πυκνότητα, ενώ βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του στις υπόλοιπες τοπολογίες που διαθέτουν περισσότερους κόμβους.





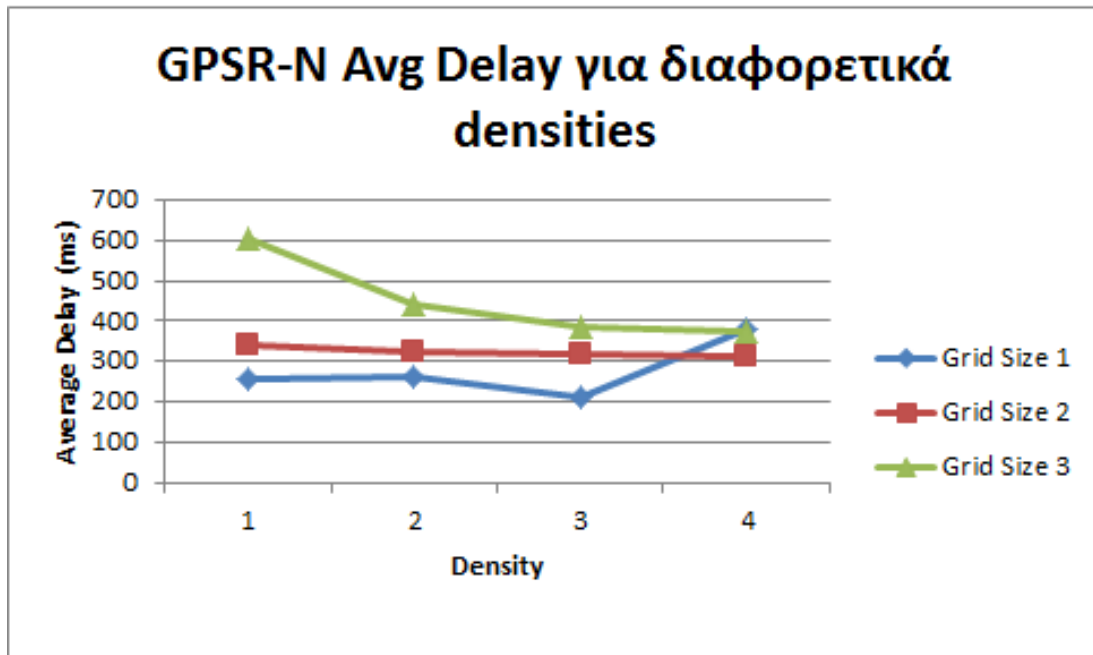
Εικόνα 52: GPSR-N Average Delay για διάφορα grid. Η μειωμένες πυκνότητες εμφανίζουν αυξημένες καθυστερήσεις.

Η καθυστέρηση που εισάγει το πρωτόκολλο για την μετάδοση ενός πακέτου από τον κόμβο-πηγή στον προορισμό, μεταβάλλεται όπως και το μέγεθος της τοπολογίας. Συνεπώς, για μεγαλύτερο μέγεθος πόλης η καθυστέρηση αυξάνεται. Η περίπτωση πυκνής τοπολογίας και μικρότερου μεγέθους πλέγματος που εμφανίζει σημαντικά μεγαλύτερη καθυστέρηση είναι κοινή με τις αντίστοιχες περιπτώσεις και στα υπόλοιπα πρωτόκολλα και άρα αποτελεί συμπτωματικό χαρακτηριστικό της περίπτωσης αυτής.



Εικόνα 53: GPSR-N PDR για διάφορα densities. Οι τρεις περιπτώσεις εμφανίζουν παρόμοια αποτελέσματα

Ο GPSR-N καταφέρνει να διατηρήσει σε πολύ υψηλές τιμές το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων στο μικρότερο μέγεθος πόλης. Αρχικά, η χαμηλή πυκνότητα κόμβων, επιφέρει μείωση στο PDR που επιτυγχάνει το πρωτόκολλο. Με την αύξηση της πυκνότητας της τοπολογίας ωστόσο, παρατηρείται σημαντική αύξηση του ποσοστού παραδιδόμενων πακέτων από το πρωτόκολλο. Η επάρκεια κόμβων εντός του πλέγματος, διευκολύνει την εύρεση μονοπατιών προς τον προορισμό και τη δρομολόγηση των πακέτων με όσο το δυνατόν λιγότερες πιθανότητες απώλειας του. Κατά την αύξηση του μεγέθους του πλέγματος, παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση στην απόδοση του πρωτοκόλλου, μόνο στη δεύτερη πυκνότητα κόμβων ενώ, αντίστοιχα, στο μεγάλο μέγεθος πόλης εμφανίζεται ξανά μικρή διαφοροποίηση στην ίδια πυκνότητα με την προηγούμενη περίπτωση, έχοντας ελαφρώς χειρότερη απόδοση. Συμπερασματικά, το πρωτόκολλο χαρακτηρίζεται από μεγάλη σταθερότητα, ανεξάρτητα από το μέγεθος το πλέγματος, αφού σε όλες τις περιπτώσεις επιτυγχάνει παρόμοια απόδοση όπως φαίνεται και από την καμπύλη κάθε μεγέθους πλέγματος.



Εικόνα 54: GPSR-N Average Delay για διάφορα densities. Η αύξηση της πυκνότητας μειώνει σημαντικά την καθυστέρηση στο μεγαλύτερο μέγεθος πόλης.

Ο GPSR-N εμφανίζει αρχικά τη χαμηλότερη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση στην περίπτωση του μικρότερου μεγέθους πόλης. Η καθυστέρηση αυτή μειώνεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων, ενώ παρατηρείται, στη μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων, μια απότομη αύξηση της καθυστέρησης. Η αύξηση αυτή είναι κοινή με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα και καταδεικνύει πως οφείλεται περισσότερο σε ιδιομορφία της συγκεκριμένης τοπολογίας (μεγαλύτερες αποστάσεις κόμβων, κενά στο δίκτυο και ανάγκη επαναδρομολόγησης) παρά στον τρόπο λειτουργίας του ίδιου του πρωτοκόλλου. Στο μεσαίο μέγεθος πόλης, το πρωτόκολλο διατηρεί σχεδόν σταθερή την απόδοση του σε σχέση με την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση, παρουσιάζοντας μικρή μείωση καθώς αυξάνεται το πλήθος των κόμβων. Συμπερασματικά, η διάταξη των κόμβων στο σενάριο αλλά και ο τρόπος λειτουργίας του πρωτοκόλλου καταφέρνουν να εγγυηθούν την ταχεία παράδοση του πακέτου, με μικρή εξάρτηση από το πλήθος των κόμβων. Τέλος, στην περίπτωση του μεγάλου μεγέθους πόλης, παρατηρούνται αρχικά αυξημένοι χρόνοι παράδοσης του πακέτου από το πρωτόκολλο. Το μέγεθος της πόλης επιβάλλει τη δημιουργία μεγάλων μονοπατιών όταν οι κόμβοι που επικοινωνούν είναι απομακρυσμένοι. Καθώς το πλήθος των κόμβων στην πόλη αυξάνεται, παρατηρείται μείωση του απαιτούμενου χρόνου για την παράδοση του πακέτου από το πρωτόκολλο. Η ύπαρξη μεγάλης πυκνότητας οχημάτων εξασφαλίζει την εύρεση βέλτιστων μονοπατιών που επιταχύνουν την προώθηση των πακέτων προς αποστολή και διευκολύνουν την προώθηση τους σε περίπτωση που απαιτείται εύρεση εναλλακτικού μονοπατιού. Οι

παραπάνω παράγοντες συντελούν στη μείωση της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης που επιτυγχάνει το πρωτόκολλο καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων στο πλέγμα.

### 3.6.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στην εργασία παρουσίασης του πρωτοκόλλου GPSR (Karp & Kung 2000) πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της επίδοσης του. Οι προσομοιώσεις αυτές γίνονται σε περιβάλλον χωρίς εμπόδια ενώ ο χώρος στον οποίο κινούνται οι κόμβοι που λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση, είναι παραλληλόγραμμος. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται για τη μετρική του ποσοστού παραδιδόμενων πακέτων δε λαμβάνονται υπ' όψιν τα πακέτα εκείνα που απορρίπτονται ως απόρροια της μη ύπαρξης διαδρομής προς τον κόμβο προορισμού.

Οι διαφορές της εργασίας αυτής με την παρούσα, είναι η ύπαρξη εμποδίων (κτιρίων) κατά τη μετάδοση ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται υπ' όψιν τα πακέτα που χάνονται λόγω πολύ απομακρυσμένων κόμβων στο δίκτυο. Η παρουσία εμποδίων κατά τη μετάδοση αποτελεί σημαντικό κομμάτι για την επαρκή αξιολόγηση του πρωτοκόλλου καθώς επιβάλλει τη χρησιμοποίηση των τεχνικών επανάκαμψης από αδιέξοδα που διαθέτει το πρωτόκολλο. Κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών εντός ενός αστικού περιβάλλοντος. Η ύπαρξη εμποδίων στο πλέγμα λοιπόν, μειώνει αναμενόμενα το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων καθώς υπάρχουν απώλειες τόσο από την έλλειψη συνδεσιμότητας στο δίκτυο αλλά και από την αδυναμία μετάδοσης πακέτων γύρω από κτίρια.

Συγκρίνοντας την απόδοση του GPSR με τον DSR, η εργασία καταλήγει πως ο πρώτος είναι καλύτερος σε απόδοση από τον δεύτερο. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται αντίστοιχα από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, ο GPSR εμφανίζει μεγαλύτερο PDR από τον DSR σε όλα τα μεγέθη πλέγματος και για όλες τις πυκνότητες κόμβων, διατηρώντας σταθερά καλύτερη απόδοση τόσο σε ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων αλλά και σε ότι αφορά την μέση καθυστέρηση που εισάγει κατά τη μετάδοση τους από την πηγή στον προορισμό.

Στην εργασία που παρουσιάζει τον GPCR (C. Lochert, 2005) πραγματοποιούνται πειράματα για την αξιολόγηση της απόδοσης του GPCR σε σχέση με τον GPSR. Τα πειράματα αυτά γίνονται σε τοπολογία πόλης με σταθερό μέγεθος. Ακόμη, το πλήθος των κόμβων που επιλέγεται είναι συγκεκριμένο και δε μεταβάλλεται ενώ διαφέρει τόσο το πλήθος των πακέτων που αποστέλλονται από την πηγή στον προορισμό αλλά και το χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται ανάμεσα στη μετάδοση διαδοχικών πακέτων. Στην παρούσα εργασία, το πλέγμα που δημιουργείται έχει μεταβλητό μέγεθος ενώ οι κόμβοι που βρίσκονται εντός αυτού έχουν τέσσερις διαφορετικές πυκνότητες. Συνεπώς, τόσο η μορφολογία των δύο τοπολογιών όσο και η διαφορετική ακτίνα εκπομπής των κόμβων, οδηγούν σε διαφορετική απόδοση του κάθε πρωτοκόλλου στις δύο περιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν πως ο GPCR εμφανίζει γενικά μεγαλύτερο PDR σε σχέση με τον GPSR αυξάνοντας όμως ελαφρώς την καθυστέρηση για τη μετάδοση του πακέτου. Τα αποτελέσματα αυτά παρεκκλίνουν ελαφρώς από εκείνα που προέκυψαν στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, στη μεγαλύτερη τοπολογία που εξετάστηκε, ο GPSR εμφάνισε παρόμοια απόδοση με τον GPCR, με τον πρώτο να υπερέχει ελαφρώς σε σχέση με τον δεύτερο, σε ότι αφορά το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων. Αντιθέτως, η καθυστέρηση που εισάγει ο GPSR παρατηρήθηκε να είναι μικρότερη από εκείνη του GPCR, επιβεβαιώνοντας τις μετρήσεις της εργασίας. Η απόκλιση που προκύπτει βασίζεται στις διαφορές των πειραμάτων που διενεργήθηκαν σε κάθε περίπτωση. Η ακτίνα μετάδοσης που διαθέτει κάθε κόμβος ήταν μικρότερη στα πειράματα της παρούσας εργασίας, γεγονός που έχει σημαντικό αντίκτυπο στα αποτελέσματα που παρατηρούνται αναφορικά με το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων. Τα αποτελέσματα που αφορούν την καθυστέρηση των δύο πρωτοκόλλων σε κάθε εργασία συμφωνούν επιβεβαιώνοντας στις δύο περιπτώσεις την ταχύτερη παράδοση πακέτων από τον GPSR.



## Κεφάλαιο 4

### Συμπεράσματα και Μελλοντική εργασία

#### 4.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης σε VANETs και παρουσιάστηκε συνοπτικά ο τρόπος λειτουργίας τους. Ακόμη, αξιολογήθηκε η απόδοση των πρωτοκόλλων AODV, DSR, GPSR, GPCR, GPSR-N σε αστικό περιβάλλον. Οι μετρικές για τις οποίες αξιολογήθηκαν τα πρωτόκολλα είναι το ποσοστό επιτυχώς παραδιδόμενων πακέτων και η μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.

Οι παράμετροι και οι συνθήκες εκτέλεσης των πειραμάτων αναπτύχθηκαν πλήρως σε κάθε περίπτωση πειράματος. Το μέγεθος του πλέγματος στο οποίο έγινε κάθε προσομοίωση, η πυκνότητα των κόμβων αλλά και τα χαρακτηριστικά της κίνησης τους έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην απόδοση κάθε πρωτοκόλλου στα διάφορα σενάρια.

Τα αποτελέσματα στην περίπτωση του 4x4 Manhattan Grid αναδεικνύουν τον GPSR-N ως τον πιο αξιόπιστο αλγόριθμο που εμφανίζει παράλληλα μικρή καθυστέρηση ενώ ο αμέσως καλύτερος είναι ο GPSR. Τα υπόλοιπα πρωτόκολλα αποδίδουν χειρότερα και άρα δεν ενδείκνυνται για χρήση στο εν λόγω σενάριο. Συνεπώς, ο GPSR-N είναι ο καλύτερος αλγόριθμος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση ώστε να επιτευχθεί επαρκής παράδοση πακέτων με τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση.

Στην περίπτωση του 6x6 Manhattan Grid, υπάρχει εμφανής διαφορά στην απόδοση του GPSR-N σε σχέση με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα. Συγκεκριμένα, ο GPSR-N αποδίδει πολύ καλύτερα σε ότι αφορά το PDR και τη μέση καθυστέρηση, με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα να έχουν σαφώς χειρότερη απόδοση. Ο GPSR-N αναδεικνύεται ξανά ως ο βέλτιστος αλγόριθμος δρομολόγησης και σε αυτή την περίπτωση, παρουσιάζοντας διαφοροποίηση της τάξης του 5-10% σε σχέση με τα άλλα πρωτόκολλα.

Τέλος, στο 8x8 Manhattan Grid, παρατηρείται μια σύγκλιση της απόδοσης των πρωτοκόλλων σε ότι αφορά το ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων. Ο GPSR-N παραμένει ο καλύτερος αλγόριθμος σε ότι αφορά το PDR αλλά και τη μέση από άκρο σε άκρο καθυστέρηση με τους GPSR και GPCR να παρουσιάζουν παρόμοια απόδοση. Οι AODV και DSR δεν καταφέρνουν να διατηρήσουν χαμηλή καθυστέρηση και άρα δεν ενδείκνυνται σε σχέση με τους προηγούμενους αλγόριθμους.

Συμπερασματικά, παρατηρείται πως ο GPSR-N καταφέρνει να διατηρήσει σταθερά καλή απόδοση για την παράδοση πακέτων, σε ένα αστικό περιβάλλον. Ακόμη, ο GPSR αποδίδει ελαφρώς χειρότερα, διατηρώντας όμως τη δυνατότητα να υποστηρίξει

την επικοινωνία κόμβων. Οι αλγόριθμοι GPCR, DSR και AODV δεν καταφέρνουν να εμφανίσουν απόδοση αντίστοιχη με τα παραπάνω πρωτόκολλα και άρα δεν προτιμώνται για τη δρομολόγηση σε αστική περιοχή.

Συνεπώς, ο GPSR-N αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή για περιπτώσεις δρομολόγησης σε αστικό περιβάλλον με την παρουσία εμποδίων από κτίρια της πόλης. Τόσο το PDR όσο και η μέση καθυστέρηση που παρουσίασε το πρωτόκολλο λαμβάνουν ικανοποιητικές τιμές που το καθιστούν ιδανικό για τη δρομολόγηση σε VANETs.

## 4.2 Μελλοντική εργασία

Η μελλοντική εργασία μπορεί να χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα της παρούσας ώστε να επεκτείνει την έρευνα της και να εστιάσει σε συγκεκριμένα σημεία που χρήζουν περαιτέρω μελέτης. Συγκεκριμένα, η έρευνα που εκπονείται στην παρούσα διπλωματική περιορίζεται σε συγκεκριμένα μεγέθη πόλης χωρίς να εξετάζει τι συμβαίνει σε μεγαλύτερα αστικά περιβάλλοντα. Ακόμη, οι αλγόριθμοι που εξετάζονται είναι οι AODV, DSR, GPSR, GPCR, GPSR-N. Η μελλοντική εργασία μπορεί να διευρύνει την έρευνα της περιλαμβάνοντας ακόμα περισσότερα πρωτόκολλα που είναι ταυτόχρονα πιο σύγχρονα.

Συνεπώς, η μελλοντική εργασία μπορεί να επικεντρωθεί σε τρία επιμέρους σημεία.

1. Μεγαλύτερο μέγεθος πόλης από τα χρησιμοποιούμενα στην παρούσα εργασία (4x4, 6x6, 8x8)
2. Μεγαλύτερες πυκνότητες κόμβων στο δίκτυο, ανάλογα και με το μέγεθος της πόλης
3. Πραγματοποίηση πειραμάτων με περισσότερους και πιο σύγχρονους αλγόριθμους πέρα από τους GPSR-N, GPSR, GPCR, AODV, DSR

Τέλος, μια επιπλέον κατεύθυνση που θα μπορούσε να διερευνηθεί είναι τα ζητήματα ασφάλειας σε VANETs κατά την προώθηση πακέτων. Οι μηχανισμοί που πρόκειται να αναπτυχθούν και θα εγγυώνται την ασφαλή προώθηση πακέτων, πρέπει να μην επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου τόσο σε ποσοστό παραδιδόμενων πακέτων όσο και σε μέση καθυστέρηση κατά τη διάδοσή τους.



## Βιβλιογραφία

- [1] Ns-3\_Project, *NS-3 Networking Simulator*. 2015.
- [2] B. Karp and H. Kung, “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless networks,” *ACM MobiCom*, 2000.
- [3] B. Seet, G. Liu, B. Lee, C. Foh, K. Wong, and K. Lee, “A-STAR: A Mobile Ad Hoc Routing Strategy for Metropolis Vehicular Communications,” *Lect. Notes Comput. Sci.*, 2004.
- [4] T.-W. C. T.-W. Chen and M. Gerla, “Global state routing: a new routing scheme for ad-hoc wireless networks,” *ICC '98. 1998 IEEE Int. Conf. Commun. Conf. Rec. Affil. with SUPERCOMM'98 (Cat. No.98CH36220)*, 1998.
- [5] C. Lochert, M. Mauve, H. Fùbler, and H. Hartenstein, “Geographic routing in city scenarios,” *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 2005.
- [6] K. C. Lee, M. Le, J. Härri, and M. Gerla, “LOUVRE: Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments,” in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2008.
- [7] M. Jerbi, S.-M. Senouci, R. Meraihi, and Y. Ghamri-Doudane, “An Improved Vehicular Ad Hoc Routing Protocol for City Environments,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, 2007.
- [8] D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz, “The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4,” *RFC 4728*, 2007.
- [9] Y. B. Ko and N. H. Vaidya, “Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks,” *Wirel. Networks*, 2000.
- [10] S. Batish and A. Singh, “Border-node based Movement Aware Routing Protocol,” *Int. J. Comput. Sci. Inf.*, vol. 1, no. 4, pp. 121–124, 2012.
- [11] C. E. Perkins and E. M. Royer, “Ad-hoc on-demand distance vector routing,” in *Proceedings - WMCSA '99: 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 1999.
- [12] M. Al-Rabayah and R. Malaney, “A new scalable hybrid routing protocol for VANETs,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2012.
- [13] J. Tian, L. Han, K. Rothermel, and C. Cseh, “Spatially aware packet routing for mobile Ad hoc inter-vehicle radio networks,” in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2003.
- [14] H. Fùbler, H. Hartenstein, M. Mauve, W. Effelsberg, and J. Widmer, “Contention-based forwarding for street scenarios,” in *1st International Workshop in Intelligent Transportation (WIT)*, 2004.

- [15] V. Naumov and T. R. Gross, "Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular ad hoc networks," in *Proceedings - IEEE INFOCOM*, 2007.
- [16] K. Prasanth, K. Duraiswamy, K. Jayasudha, and C. Chandrasekar, "Efficient Packet Forwarding Approach in Vehicular Ad Hoc Networks Using EBGR Algorithm," *J. Comput. Sci.*, 2010.
- [17] S. Tsiachris, G. Koltsidas, and F.-N. Pavlidou, "Junction-Based Geographic Routing Algorithm for Vehicular Ad hoc Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, 2012.
- [18] C. Bouras, V. Kapoulas, N. Stathopoulos, and A. Gkamas, "Mechanisms for Enhancing the Performance of Routing Protocols in VANETs," in *Proceedings of the 13th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks - PE-WASUN '16*, 2016.
- [19] C. Adjih, T. Clausen, P. Jacquet, A. Laouiti, and P. Minet, "Optimized link state routing protocol," *Internet Eng.*, 2003.
- [20] N. Aschenbruck, R. Ernst, E. Gerhards-Padilla, and M. Schwamborn, "BonnMotion: a mobility scenario generation and analysis tool," in *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, 2010.