



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

*Ανάπτυξη και αποτίμηση αλγορίθμων δρομολόγησης στο  
Διαδίκτυο των Πραγμάτων*

**ΗΛΙΑΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΑΡΗΓΙΑΝΝΙΔΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**



ΚΟΖΑΝΗ ΙΟΥΛΙΟΣ 2022





ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

*Development and evaluation of internet of things routing  
protocols*

ILIADIS DIMITRIOS

**SUPERVISOR:** SARIGIANNIDIS PANAGIOTIS



KOZANI JULY 2022

[3]

Ανάπτυξη και αποτίμηση αλγορίθμων δρομολόγησης στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων





ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

## ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο: " Ανάπτυξη και αποτίμηση αλγορίθμων δρομολόγησης στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων " καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ.: " Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης " αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Ονοματεπώνυμο Φοιτητή και Επιβλέποντα, Έτος, Πόλη

Copyright (C) Ηλιάδης Δημήτριος, Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης, 2022 , Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή:.....

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την μελέτη της ανάπτυξης και αποτίμησης των αλγορίθμων δρομολόγησης στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Η μελέτη εστιάζει αρχικά στις τεχνολογίες WSN και IOT, στα πρωτόκολλα πρόσβασης, στα θέματα ασφάλειας, στα παραδείγματα εφαρμογών, καθώς και στις τεχνολογίες υποδομής. Στη συνέχεια μελετώνται οι αλγόριθμοι δρομολόγησης σε WSN/ IOT και συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι AODV, DSDV, DYMO, GPSR, DSR και OLSR. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα εξομοιωτικά περιβάλλοντα WSN/IoT, όπως είναι τα: NetWork Simulator (NS2 - NS3), Omnet++, Mixim, Opnet και Castalia. Ακόμη, παρουσιάζεται η αναφορά του πρακτικού μέρους της εργασίας, η οποία ενέχει μία συνοπτική ανάλυση του εργαλείου Omnet++, του τρόπου λειτουργίας του, της δομής που κατασκευάσαμε για τους AODV, DSDV, DYMO, GPSR για 10, 20 και 50, 100, 200 κόμβων αντίστοιχα, την κίνησή τους στο χώρο καθώς και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Από την ανάλυση προέκυψε η θεμελιώδης διαφορά στους παραπάνω κόμβους κατά την εκτέλεσή τους: το output rate του hostA στην πρώτη τοπολογία παρουσιάζει σημαντικότερες διακυμάνσεις στις τιμές του σχετικά με τις υπόλοιπες υλοποιήσεις αντίστοιχα, ενώ η κατανάλωση ενέργειας στον hostB είναι σημαντικά μεγαλύτερη όταν οι κόμβοι σε ένα δίκτυο πληθαίνουν. Σχετικά με τα πακέτα, παρατηρείται μεγαλύτερη απώλεια στην τοπολογία των 200 κόμβων δικτύου σε σχέση με τις υπόλοιπες ενώ και σημαντικές αλλαγές είναι δυνατόν να εντοπιστούν και στο end to end delay όσον αφορά την μετάδοση τους στον hostB ο οποίος είναι ο κόμβος στόχος. Επιπρόσθετα, από την σύγκριση των αποτελεσμάτων όλων των αλγορίθμων μαζί, προέκυψε από την αντίστοιχη ανάλυση ότι: ο πιο αποδοτικός αλγόριθμος για την αποστολή και παραλαβή πακέτων είναι ο AODV, με την καλύτερη κατανάλωση ενέργειας να την διαθέτει ο DSDV αλγόριθμος.

Λέξεις – Κλειδιά: *WSN, IOT, αλγόριθμοι, Omnet++, AODV, DYMO, DSDV, GPSR.*

## **Abstract**

The aim of this dissertation is to study the development and evaluation of Internet routing algorithms. The study focuses primarily on WSN and IOT technologies, access protocols, security issues, application examples, and infrastructure technologies. Next, the WSN / IOT routing algorithms are studied, namely the AODV, DSDV, DYMO, GPSR, DSR and OLSR algorithms. In addition, reference is made to simulation environments for WSN / IOT like: (NS2 - NS3), Omnet++, Mixim, Opnet and Castalia. Also, there is an implementation for the report of the practical part of the work is presented, which includes a brief analysis of the Omnet++ tool, how it works, the structure we built for the AODV, DSDV, DYMO, GPSR for 10, 20 and 50, 100, 200 nodes respectively, their movement in space as well as the analysis of the results. The analysis revealed the fundamental difference in the above nodes during their execution: the output rate of hostA in the first topology shows very significant fluctuations in its values relative to the other implementations respectively, while the power consumption in hostB is significantly higher when the nodes in a network are increasing. Regarding the packages, there is a greater loss in the topology of the 200 network nodes compared to the rest, while significant changes can be found in the end to end delay in terms of their transmission to the hostB which is the target node. In addition, by comparing the results of all the algorithms together, it emerged from the corresponding analysis that: the most efficient algorithm for sending and receiving packets is AODV, with the best power consumption having the DSDV algorithm.

Keywords: *WSN, IOT, algorithms, Omnet++, AODV, DYMO, DSDV, GPSR*

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Σαρηγιαννίδη Π. κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την υπομονή που έκανε κατά την διάρκεια της υλοποίησης της παρακάτω διπλωματικής εργασίας. Επίσης την κυρία Άννα Τριανταφύλλου για την βοήθεια και καθοδήγηση της για την επίλυση διαφόρων θεμάτων.



## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	6
Abstract .....	7
Πίνακας εικόνων.....	11
Κατάλογος Πινάκων.....	13
1. Τεχνολογίες WSN και IOT .....	14
1.1. Τεχνολογίες WSN .....	14
1.1.1. Sensors.....	14
1.1.2. Τεχνολογίες και πρωτόκολλα πρόσβασης.....	19
1.1.3. Τοπολογίες δικτύου .....	23
1.1.4. Θέματα ασφάλειας.....	25
1.1.5. Παραδείγματα WSN εφαρμογών .....	25
1.2. Τεχνολογίες IoT .....	27
1.2.1. Smart things.....	27
1.2.2. IOT πρωτόκολλα πρόσβασης .....	27
1.2.3. Τεχνολογίες υποδομής.....	32
1.2.4. Θέματα ασφάλειας σε IoT εφαρμογές.....	33
1.2.5. CoAP & MQTT .....	35
2. Αλγόριθμοι δρομολόγησης σε WSN/ IOT .....	36
2.1. AODV .....	36
2.2. DSDV .....	39
2.3. DYMO .....	40
2.4. GPSR .....	42
2.5. DSR.....	44
2.6. OLSR.....	46
3. Εξομοιωτικά περιβάλλοντα WSN/IoT.....	49
3.1. NetWork Simulator (NS2 - NS3).....	49
3.2. Omnet++.....	50
3.3. Mixim.....	53
3.4. Opnet .....	54
3.5. Castalia.....	54
4. Αναφορά Υλοποίησης.....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
4.1. Omnet++.....	55
4.2. Εργασία .....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
4.3. AODV .....	63

4.3.1.	Throughput .....	66
4.3.2.	Packets .....	66
4.3.3.	Κατανάλωση .....	68
4.3.4.	Delay .....	69
4.4.	DYMO .....	70
4.4.1.	Throughput .....	72
4.4.2.	Packets .....	72
4.4.3.	Κατανάλωση .....	74
4.4.4.	Delay .....	75
4.5	DSDV .....	76
4.5.1	Throughput .....	78
4.5.2	Packets .....	78
4.5.3	Κατανάλωση .....	80
4.5.4	Delay .....	81
4.6	GPSR .....	82
4.6.1	Throughput .....	84
4.6.2	Packets .....	84
4.6.3	Κατανάλωση .....	86
4.6.4	Delay .....	87
4.7	Σύγκριση AODV, DYMO, DSDV, GPSR.....	88
5.	Συμπεράσματα – Ανάλυση.....	96
	Βιβλιογραφικές Αναφορές .....	98

## Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1 - Τυπική αρχιτεκτονική ενός κόμβου αισθητήρων [38].....	16
Εικόνα 2 - Τύποι αισθητήρων chapter 3 monitoring and control Anjan Mahanta .....	19
Εικόνα 3 - Διαστρωμάτωση WSN [36].....	20
Εικόνα 4 - Βασικές τοπολογίες [37].....	23
Εικόνα 5 - Στρατιωτική εφαρμογή [39] .....	26
Εικόνα 6 - Το οικοσύστημα IoT [35] .....	28
Εικόνα 7 - Αρχιτεκτονική της στοίβας ZigBee και IEEE 802.15.4 [34].....	30
Εικόνα 8 - Στοίβα πρωτοκόλλου Z-Wave [33] .....	31
Εικόνα 9 - Άπληστη μετάδοση [17] .....	42
Εικόνα 10 - Αποτυχία άπληστης προώθησης [17] .....	43
Εικόνα 11 - Κανόνας του δεξιού χεριού [17].....	44
Εικόνα 12 - Dynamic Source Routing – DSR [31] .....	46
Εικόνα 13 – OLSR [32].....	48
Εικόνα 14 - Το Logo του Omnet++ .....	55
Εικόνα 15 - Περιβάλλον Εκτέλεσης.....	56
Εικόνα 16 - Αρχική Δομή.....	58
Εικόνα 17 - Επέκταση της αρχικής δομής.....	58
Εικόνα 18 - 10 κόμβοι στο δίκτυο.....	60
Εικόνα 19 - 20 κόμβοι στο δίκτυο.....	60
Εικόνα 20 - 50 κόμβοι στο δίκτυο.....	60
Εικόνα 21 - 100 κόμβοι στο δίκτυο.....	61
Εικόνα 22 - 200 κόμβοι στο δίκτυο.....	61
Εικόνα 23 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 10 κόμβους .....	63
Εικόνα 24 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 20 κόμβους .....	63
Εικόνα 25 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 50 κόμβους .....	64
Εικόνα 26 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 100 κόμβους .....	64
Εικόνα 27 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 200 κόμβους .....	64
Εικόνα 28 – Γραφική αναπαράσταση του Throughput για τον αλγόριθμο AODV των προσομοιώσεων για 10, 20, 50, 100, 200 κόμβους .....	66
Εικόνα 29 - Packet Sent για τον AODV σε συνάρτηση με τους κόμβους .....	66
Εικόνα 30 - Packet Received για τον AODV σε συνάρτηση με τους κόμβους .....	67
Εικόνα 31 - Packet error rate για τον AODV αλγόριθμο για όλους τους κόμβους.....	67
Εικόνα 32 - Κατανάλωση ενέργειας στον AODV για όλους τους κόμβους .....	68
Εικόνα 33 - Υπολειπόμενη ενέργεια στον AODV για τους διάφορους κόμβους.....	68
Εικόνα 34 - Delay του AODV για τους διάφορους κόμβους.....	69
Εικόνα 35 - Στιγμιότυπο εκτέλεσης του DYMO για 10 κόμβους.....	70
Εικόνα 36 - Στιγμιότυπο εκτέλεσης του DYMO για 20 κόμβους.....	70
Εικόνα 37 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DYMO για 50 κόμβους.....	71
Εικόνα 38 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DYMO για 100 κόμβους.....	71
Εικόνα 39 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DYMO για 200 κόμβους.....	71
Εικόνα 40 - Γραφική αναπαράσταση του Throughput για τον αλγόριθμο DYMO των προσομοιώσεων για 10, 20, 50, 100, 200 κόμβους .....	72
Εικόνα 41 - Packet Sent του DYMO σε συνάρτηση με τους κόμβους .....	72
Εικόνα 42 - Packets received για τον DYMO σε συνάρτηση με τους κόμβους.....	73
Εικόνα 43 - Packet error rate για τον DYMO αλγόριθμο.....	73

Εικόνα 44 - Κατανάλωση ενέργειας στον DYMO για όλους τους κόμβους.....	74
Εικόνα 45 - Υπολειπόμενη ενέργεια στον DYMO για τους διάφορους κόμβους.....	74
Εικόνα 46 - Delay του DYMO για τους διάφορους κόμβους .....	75
Εικόνα 47 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 10 κόμβους.....	76
Εικόνα 48 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 20 κόμβους.....	76
Εικόνα 49 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 50 κόμβους.....	77
Εικόνα 50 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 100 κόμβους.....	77
Εικόνα 51 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 200 κόμβους.....	77
Εικόνα 52 - Γραφική αναπαράσταση του Throughput για τον αλγόριθμο DSDV των προσομοιώσεων για 10, 20, 50, 100, 200 κόμβους .....	78
Εικόνα 53 - Packets sent για τον DSDV σε συνάρτηση με τους κόμβους.....	78
Εικόνα 54 - Packets received για τον DSDV σε συνάρτηση με τους κόμβους.....	79
Εικόνα 55 - Packets error rate για τον DSDV αλγόριθμο .....	79
Εικόνα 56 - Κατανάλωση ενέργειας στον DSDV για όλους τους κόμβους.....	80
Εικόνα 57 - Υπολειπόμενη ενέργεια στον DSDV για όλους τους κόμβους.....	80
Εικόνα 58 - Delay του DSDV για τους διάφορους κόμβους.....	81
Εικόνα 59 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSR για 10 κόμβους.....	82
Εικόνα 60 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSR για 20 κόμβους.....	82
Εικόνα 61 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSR για 50 κόμβους.....	83
Εικόνα 62 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSR για 100 κόμβους.....	83
Εικόνα 63 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSR για 200 κόμβους.....	83
Εικόνα 64 - Γραφική αναπαράσταση του Throughput για τον αλγόριθμο GPSR των προσομοιώσεων για 10, 20, 50, 100, 200 κόμβους .....	84
Εικόνα 65 - Packets sent για τον GPSR σε συνάρτηση με τους κόμβους.....	84
Εικόνα 66 - Packets received για τον GPSR σε συνάρτηση με τους κόμβους.....	85
Εικόνα 67 - Packet error rate για τον GPSR αλγόριθμο.....	85
Εικόνα 68 - Κατανάλωση ενέργειας στον GPSR για όλους τους κόμβους.....	86
Εικόνα 69 - Υπολειπόμενη ενέργεια στον GPSR για όλους τους κόμβους .....	86
Εικόνα 70 - Delay του GPSR για τους διάφορους κόμβους.....	87
Εικόνα 71 - Σύγκριση του συνολικού throughput για 10 κόμβους όλων των αλγορίθμων.....	88
Εικόνα 72 - Σύγκριση των πακέτων που παραλήφθηκαν για 10 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων.....	89
Εικόνα 73 - Σύγκριση των πακέτων που στάλθηκαν για 10 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων.....	89
Εικόνα 74 - Σύγκριση την κατανάλωσης ενέργειας όλων των αλγορίθμων για 10 κόμβους .	90
Εικόνα 75 - Σύγκριση του συνολικού throughput για 50 κόμβους όλων των αλγορίθμων.....	91
Εικόνα 76 - Σύγκριση των πακέτων που στάλθηκαν για 50 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων.....	91
Εικόνα 77 - Σύγκριση των πακέτων που παραλήφθηκαν για 50 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων.....	92
Εικόνα 78 - Σύγκριση την κατανάλωσης ενέργειας όλων των αλγορίθμων για 50 κόμβους..	92
Εικόνα 79 - Σύγκριση του συνολικού throughput για 200 κόμβους όλων των αλγορίθμων...	93
Εικόνα 80 - Σύγκριση των πακέτων που στάλθηκαν για 200 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων.....	94
Εικόνα 81 - Σύγκριση των πακέτων που παραλήφθηκαν για 200 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων.....	94
Εικόνα 82 - Σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας όλων των αλγορίθμων για 200 κόμβους	95

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - Πίνακας συγκρίσεων AODV, DYMO, DSDV, GPSR για 10 κόμβους .....	90
Πίνακας 2 - Πίνακας συγκρίσεων AODV, DYMO, DSDV, GPSR για 50 κόμβους .....	93
Πίνακας 3 - Πίνακας συγκρίσεων AODV, DYMO, DSDV, GPSR για 200 κόμβους .....	95

# 1. Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ανάγκη για ασύρματη συνδεσιμότητα και συλλογή πληροφοριών για την διευκόλυνση των επικοινωνιών και την προστασία του περιβάλλοντος κοινωνικού και φυσικού έφερε στο προσκήνιο το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things).

Αυτή η τεχνολογία μέσω ενσωματωμένων ασύρματων έξυπνων αισθητήρων (Wireless Sensor Network - WSN) βοήθησε στην αποστολή δεδομένων σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία και στην αντιμετώπιση πολλών προβλημάτων που παλαιότερα θεωρούνταν αδύνατα, καλύπτοντας ένα σύνολο βιομηχανικών, ιατρικών, οικιακών και περιβαλλοντολογικών εφαρμογών.

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε το εξομοιωτικό περιβάλλον Omnet++ το οποίο είναι ένα λειτουργικό σύστημα ανοιχτού κώδικα που βοηθάει στην αναπαράσταση και προσομοίωση τόσο ενσύρματων όσο και ασύρματων δικτύων, προκειμένου να μελετηθεί και να γίνει αντιληπτό ποιος από τους αλγόριθμους που μελετήθηκαν είναι ο πιο αποτελεσματικός ανάλογα με το εύρος του δικτύου.

Ο πιο αποδοτικός αλγόριθμος για την αποστολή και παραλαβή πακέτων από αυτούς που μελετήθηκαν είναι ο AODV, με την καλύτερη κατανάλωση ενέργειας να την διαθέτει ο DSDV αλγόριθμος.

## 2. Τεχνολογίες WSN και IOT

### 2.1. Τεχνολογίες WSN

#### 2.1.1. Sensors

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Network - WSN) έχουν προσελκύσει το παγκόσμιο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, κυρίως με την μεγάλη πρόοδο των μικρο-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (Micro-electromechanical Systems - MEMS) που εξυπηρέτησε στην ανάπτυξη έξυπνων αισθητήρων. Οι νέοι αισθητήρες είναι μικροί σε μέγεθος, με ελάχιστους υπολογιστικούς και επεξεργαστικούς πόρους, και είναι πιο οικονομικοί συγκριτικά με τους παραδοσιακούς αισθητήρες. Αυτοί οι κόμβοι μπορούν να μετρήσουν και να συγκεντρώσουν πληροφορίες από το περιβάλλον και να μεταδώσουν αυτήν την πληροφορία στον χρήστη [3]. Οι έξυπνοι κόμβοι αισθητήρες είναι συσκευές με ελάχιστη κατανάλωση ισχύος, εξοπλισμένοι με έναν ή παραπάνω αισθητήρες, έναν ενεργοποιητή, έναν επεξεργαστή, μνήμη, μία πηγή ενέργειας, και έναν ασύρματο.

Διαφορετικοί τύποι αισθητήρων μπορούν να εγκατασταθούν στον κόμβο για να μετρήσουν τις ιδιότητες του περιβάλλοντος, όπως μηχανικοί, θερμικοί, χημικοί, βιολογικοί, οπτικοί και μαγνητικοί αισθητήρες. Αφού οι κόμβοι έχουν μειωμένη μνήμη και είναι τοποθετημένοι σε τοποθεσίες με δύσκολη πρόσβαση, υπάρχει ο ασύρματος με τον οποίο έρχεται σε επαφή και μεταδίδει ασύρματα τα δεδομένα στον κύριο σταθμό, λόγω χάρη ένα φορητό υπολογιστή, μία κινητή συσκευή ή ένα σταθερό σημείο πρόσβασης σε ένα κτήριο [16].

Η μπαταρία είναι η κύρια πηγή ενέργειας του κόμβου. Δευτερεύουσες πηγές κόμβου που συγκεντρώνουν ενέργεια από το περιβάλλον όπως ηλιακοί συλλέκτες έχουν τη δυνατότητα να συμπληρωθούν στον κόμβο αναλογικά με την καταλληλότητα του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται. Αναλογικά με η εφαρμογή και το είδος των αισθητήρων που λειτουργούν, υπάρχει η δυνατότητα πρόσθεσης και ενεργοποιητών στον κόμβο [5].

Ένα WSN χαρακτηριστικά έχει λίγη ή καθόλου δομή. Συγκροτείται από έναν αριθμό από κόμβους αισθητήρες (δεκάδες μέχρι χιλιάδες) που λειτουργούν συλλογικά για την επίβλεψη μιας περιοχής και την εγγραφή δεδομένων για το περιβάλλον. Υπάρχουν δύο είδη από WSN: με δομή και χωρίς δομή. Ένα WSN χωρίς δομή περιλαμβάνει μία μεγάλη συλλογή από κόμβους. Οι κόμβοι είναι δυνατόν να εγκατασταθούν με ad hoc τρόπο, δηλαδή τυχαία, στο τοπίο. Αφότου τοποθετηθούν, το δίκτυο μένει χωρίς επιτήρηση και διεξάγει τις λειτουργίες του (καταχώρηση και ενημέρωση) [30].

Στο WSN χωρίς δομή, η συντήρηση του δικτύου, όπως ο έλεγχος συνδεσιμότητας και ο εντοπισμός σφαλμάτων, δεν είναι εύκολη διότι ο αριθμός των κόμβων είναι μεγάλος. Στα WSN με δομή, όλοι οι κόμβοι είναι εγκατεστημένοι με προμελετημένο τρόπο. Το προσόν των δικτύων με δομή είναι ότι δύνανται να αξιοποιηθούν κόμβοι με μικρότερη συντήρηση δικτύου και κόστος διαχείρισης [12].

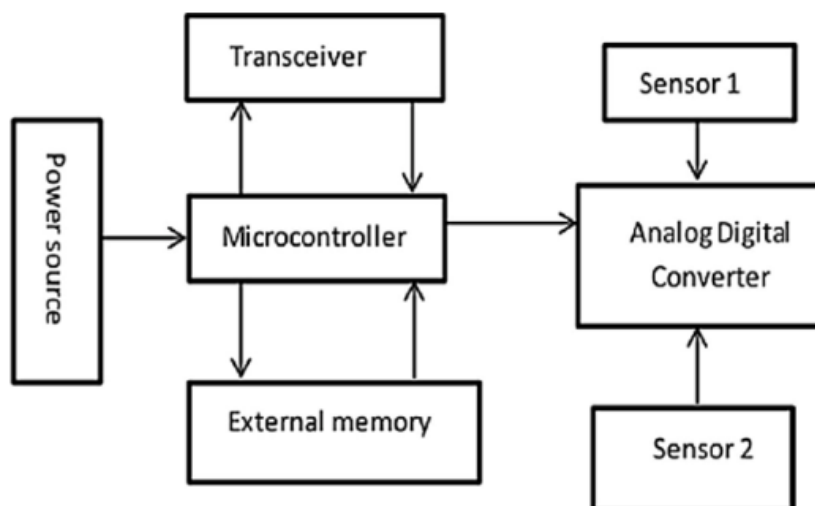
Υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης λιγότερων κόμβων διότι εγκαθίστανται σε καθορισμένα σημεία για να επιτρέπεται η όσον το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη, ενώ με την ad hoc εγκατάσταση υπάρχει η πιθανότητα κάποιες περιοχές να μείνουν ακάλυπτες. Τα WSN έχουν μεγάλες δυνατότητες για πλήθος εφαρμογών σε

περιπτώσεις όπως αρωγή σε φυσικές καταστροφές, παρατήρηση, έρευνα επικίνδυνων περιοχών, καταγραφή σεισμών και παρακολούθηση υγείας [7].

Όσον αφορά τις φυσικές καταστροφές, οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να αισθανθούν και να διερευνήσουν το περιβάλλον και να προβλέψουν καταστροφές προτού συμβούν. Για την καταγραφή σεισμών, ένα ad hoc δίκτυο αισθητήρων δύναται να τοποθετηθεί σε ένα ηφαίστειο και να πραγματοποιεί ανίχνευση των σεισμών και των εκρήξεων. Σε αντιδιαστολή με τα παραδοσιακά δίκτυα, ένα WSN αποτελείται από δικό του σχεδιασμό και περιορίζει τους πόρους του [16].

Οι περιορισμοί αυτοί συμπεριλαμβάνουν ένα καθορισμένο ποσό ενέργειας, μικρό εύρος ζώνης, επικοινωνία με μικρή εμβέλεια, περιορισμένο αποθηκευτικό χώρο και μειωμένη επεξεργαστική ισχύ σε κάθε κόμβο. Οι περιορισμοί του σχεδιασμού βασίζονται στην εφαρμογή και εξαρτάται από το περιβάλλον που παρακολουθεί.

Με βάση την εφαρμογή που πρέπει να πραγματοποιήσει το κάθε WSN, η αρχιτεκτονική των ασύρματων κόμβων πιθανόν να διαφέρει, αλλά τα κύρια δομικά στοιχεία του κάθε κόμβου είναι αμετάβλητα [19].



Εικόνα 1 - Τυπική αρχιτεκτονική ενός κόμβου αισθητήρων [38]

Επομένως, κάθε κόμβος απαρτίζεται από [14]:

1. Μικροελεγκτή (Microcontroller): Είναι ένα μικρό υπολογιστικό κύκλωμα, σχεδιασμένο σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα υψηλής κλίμακας

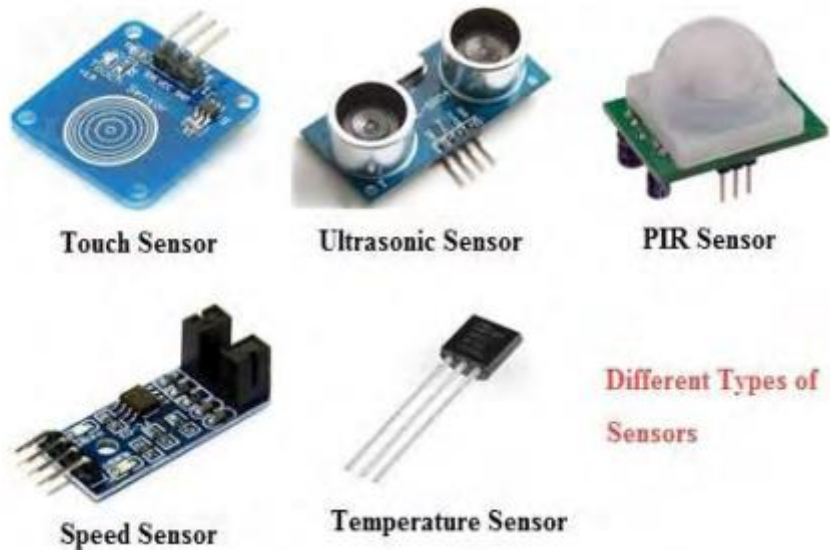


ολοκλήρωσης. Περιλαμβάνει τη κεντρική μονάδα επεξεργασίας, έναν αριθμό καταχωρητών, κυκλώματα ελέγχου περιφερειακών συσκευών και κυκλώματα μνήμης. Κάθε μικροελεγκτής έχει την ικανότητα να κάνει ανταλλαγή σημάτων με το εξωτερικό περιβάλλον, να διεξάγει πράξεις και να εισάγει κάποιες τιμές στη μνήμη RAM που διαθέτει. Ο μικροελεγκτής συνιστά το κεντρικό δομικό στοιχείο κάθε «έξυπνης» συσκευής και συμβάλλει στην εκτέλεση και το συγχρονισμό όλων των λειτουργιών του συστήματος. Μέσω αυτού οι συσκευές επιμελούνται, λαμβάνουν ή στέλνουν πληροφορία. Σε κάποιες συσκευές υπάρχει η πιθανότητα αντί για μικροελεγκτή, να βρούμε μικροεπεξεργαστές γενικού σκοπού, όπως FPGA, DSP, ASIC. Ωστόσο, συνήθως δεν συνιστούν τη βέλτιστη λύση σε θέματα κόστους, κατανάλωσης ενέργειας, ευκολίας προγραμματισμού και συνεργασίας με το υπόλοιπο σύστημα.

2. Μνήμη (External Memory): Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται η μνήμη FLASH συνδυαστικά με τη μνήμη του chip του μικροελεγκτή λόγω ελάχιστης κατανάλωσης σε σύγκριση με τη RAM. Σε πολλούς κόμβους παρατηρείται ο διαχωρισμός της μνήμης σχετικά με τον προγραμματισμό του κόμβου και της περιοχής όπου γίνεται η αποθήκευση των δεδομένων και των εφαρμογών του χρήστη.
3. Πηγή Ενέργειας (Power Source): Ένας ασύρματος κόμβος αισθητήρων βρίσκεται συνήθως σε δυσπρόσιτες περιοχές, όπου η αλλαγή της μπαταρίας γίνεται μία πολυέξοδη και κουραστική διαδικασία. Για το WSN το πιο καίριο κομμάτι του σχεδιασμού του είναι έχει επαρκή ποσότητα ενέργειας ώστε να τροφοδοτεί το σύστημα. Ο κόμβος καταναλώνει ενέργεια για να «αισθάνεται», να επικοινωνεί και να επεξεργάζεται τα δεδομένα. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας καταναλώνεται κατά την διαδικασία της επικοινωνίας των δεδομένων (data communication). Η ενέργεια αυτή παρέχεται από πυκνωτές και μπαταρίες. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια, οι δονήσεις της συσκευής και οι διαφορές της θερμοκρασίας, χρησιμοποιούνται από τους σύγχρονους κόμβους αισθητήρων.
4. Κεραία ή πομποδέκτης (Transceiver): Η κεραία συμβάλλει στην επικοινωνία των κόμβων μεταξύ τους ή με άλλες συσκευές ασύρματα. Οι αισθητήρες

χρησιμοποιούν κυρίως τη μπάντα συχνοτήτων ISM (Industrial, Scientific and Medical radio bands), η οποία παρέχει ελεύθερη (χωρίς αδειοδότηση) ραδιοεπικοινωνία, παγκόσμια διαθεσιμότητα και κατανομή φάσματος. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται με Ραδιοσυχνότητες (RF), με Υπέρυθρη Ακτινοβολία (IR), και με Οπτική Επικοινωνία (Laser). Η επικοινωνία μέσω Laser έχει τη μικρότερη ανάγκη για ενέργεια, αλλά χρειάζεται οπτική επαφή που δεν είναι πάντα επιτεύξιμη και έχει ευαισθησία σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Η επικοινωνία μέσω IR όπως και με Laser δεν απαιτεί antenna, αλλά δεν έχει εκτενή ικανότητα μετάδοσης. Εξαιτίας αυτών, η καταλληλότερη επικοινωνία για WSN επιτυγχάνεται με Ραδιοσυχνότητες. Τα WSN χρησιμοποιούν «ελεύθερες» συχνότητες όπως: 173, 433, 868, 915 MHz και 2,4 GHz. Τα στάδια λειτουργίας του πομποδέκτη είναι μετάδοση, λήψη, αδράνεια - «ύπνος» και η μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας καταναλώνεται κατά τη διάρκεια μετατροπής της λειτουργείας από τον ύπνο στην μετάδοση όταν πρέπει να μεταδώσει ένα πακέτο.

5. Αισθητήρες (Sensors): Οι Αισθητήρες αξιοποιούνται από τους ασύρματους κόμβους αισθητήρων για τη συλλογή πληροφοριών από το περιβάλλον. Πρόκειται για συσκευές που ανιχνεύουν ένα φυσικό μέγεθος και οδηγούν σε μια έξοδο ως απόκριση στην μεταβολή μιας φυσική κατάσταση, όπως αλλαγή της θερμοκρασίας ή της πίεσης. Το συνεχές αναλογικό σήμα, που δημιουργείται από τους αισθητήρες, μεταβάλλεται σε ψηφιακό από έναν ανάλογο μετατροπέα και αποστέλλεται στους μικροελεγκτές για επιπλέον επεξεργασία. Ορισμένοι αισθητήρες έχουν κατασκευαστεί με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά συστήματα για να μεταβάλουν τα ακατέργαστα (raw) σήματα σε readings και ορισμένοι μεταβάλουν τα σήματα σε μονάδες, όπως οι βαθμοί Κελσίου (°C). Ο μεγαλύτερος αριθμός των αισθητήρων έχουν μικρό μέγεθος, μικρή κατανάλωση ενέργειας, ικανότητα λειτουργίας σε υψηλές ογκομετρικές πυκνότητες, έχουν αυτονομία και δεν χρειάζονται επιτήρηση για να λειτουργήσουν, και τέλος, έχουν εύκολη προσαρμοστικότητα στο περιβάλλον.



Εικόνα 2 - Τύποι αισθητήρων chapter 3 monitoring and control Anjan Mahanta

### 2.1.2. Τεχνολογίες και πρωτόκολλα πρόσβασης

Η λειτουργία των WSNs, όπως και όλων των ασύρματων δικτύων, εξαρτάται από τον καταμερισμό των εργασιών σε ξεχωριστά στρώματα ή επίπεδα (layers). Τα στρώματα που βοηθούν στην μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας είναι το στρώμα δικτύου, το φυσικό στρώμα, το στρώμα μεταφοράς, το επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων και το επίπεδο εφαρμογής [19]. Η δομή ενός WSN και ο τρόπος διασύνδεσής του με άλλα υπάρχοντα δίκτυα περιγράφεται με συνοπτικό τρόπο από την εικόνα 3. Γενικά, όταν ένας αισθητήρας δέχεται κάποια πληροφορία από το περιβάλλον, έπειτα τη διαδίδει στο δίκτυο μέσα από μία σειρά πολλών βημάτων (hops). Η πληροφορία εν τέλει λήγει σε έναν κόμβο- μεσολαβητή (SINK) , ο οποίος έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, και έπειτα αυτός την αποστέλλει σε άλλο δίκτυο, έως ότου να καταλήξει στον τελικό χρήστη [5].



Εικόνα 3 - Διαστρωμάτωση WSN [36]

Οι ασύρματες τεχνολογίες κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τα εξής κριτήρια:

- Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιούν
- Το είδος σύνδεσης
- Το φάσμα συχνοτήτων στο οποίο λειτουργούν.

Η βασική ιδιότητα είναι η ικανότητα ασύρματης δικτύωσης με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, με σκοπό να είναι επιτρεπτή η υλοποίηση εφαρμογών, σε περιοχές όπου η προσέγγιση στον αισθητήριο κόμβο δεν είναι εφικτή. Βέβαια, υπάρχουν και εφαρμογές οι οποίες έχουν δημιουργηθεί με πρότυπα τα οποία δεν συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας [14]. Το γεγονός αυτό δεν μετατρέπει τις εφαρμογές αυτές σε μη αποτελεσματικές. Για την υλοποίηση ενός WSN, ο σχεδιαστής της εφαρμογής διαλέγει ένα από τα πολλά πρότυπα που έχουν κατασκευάσει τα τελευταία χρόνια διάφοροι οργανισμοί και εταιρείες. Αναφέρονται τα κυριότερα ακολούθως [5]:

- ❖ Το πρότυπο IEEE 802.15.4 αποτελεί το πρότυπο με την ευρύτερη χρήση για τα WSN δίκτυα και κατ' επέκταση για το IoT στο επίπεδο MAC. Θέτει τη δομή πλαισίου (frame), τις επικεφαλίδες ενσωματώνοντας και τις διευθύνσεις

της πηγής και του προορισμού, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους.

- ❖ Το IEEE 802.15.4 καλύπτει ένα σύνολο βιομηχανικών, ιατρικών και οικιακών εφαρμογών με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας εξαιτίας του μειωμένου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και σε αυτό βασίζονται το ZigBee, το WirelessHART και το ISA100.11a.
- ❖ Το IEEE 802.15.4 τελειοποιήθηκε στις αρχές του 2003 και είναι ένα πρότυπο που θέτει το φυσικό στρώμα (PHY Layer) και τον έλεγχο πρόσβασης μέσου (MAC) για ασύρματα προσωπικά δίκτυα μικρής εμβέλειας και χαμηλής ταχύτητας (LR WPANs- Low Rate Wireless Personal Area Networks) που δημιουργούνται από σταθερές ή μεταβλητές συσκευές, που τροφοδοτούνται από μπαταρίες ή από κάποια άλλη πηγή με περιορισμένη ενέργεια, δίχως να στηρίζει υψηλότερα στρώματα ή μεθόδους δικτύωσης. Το κυριότερο στοιχείο των δικτύων που κάνουν χρήση του προτύπου 802.15.4 είναι η συσκευή ή κόμβος. Υπάρχουν δύο τύποι κόμβων:
  - Συσκευή πλήρους λειτουργίας (Full Function Device– FFD) και
  - Συσκευή μειωμένης λειτουργίας (Reduced Function Device– RFD)

Το φυσικό επίπεδο προσφέρει δύο υπηρεσίες: την υπηρεσία δεδομένων (PHY data service) και την υπηρεσία διαχείρισης (PHY management service), που έχει αλληλεπίδραση με την οντότητα διαχείρισης του φυσικού επιπέδου (Physical Layer Management Entity– PLME).

Το DASH7 είναι ένα ανοικτό πρότυπο δικτύωσης αισθητήρων από την μη κερδοσκοπική κοινοπραξία που ονομάζεται DASH7 Alliance. Έπεται το ανοικτό πρότυπο ISO/IEC 18000- 7 για την διεθνώς ελεύθερη ζώνη συχνοτήτων 433 MHz στις ασύρματες επικοινωνίες. Η τεχνολογία DASH7 κατασκευάστηκε στην αρχή για στρατιωτική χρήση, αλλά στη συνέχεια έχει γίνει χρήσης της και σε άλλες εμπορικές εφαρμογές [12]. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του DASH7 είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας (έως 10 χρόνια), ο μικρός χρόνος αναμονής κατά τη σύνδεση, η εμβέλεια μέχρι 2 Km, η μεταφορά δεδομένων με ρυθμό μέχρι 200 Kbps και η υποστήριξη για κλειδί κρυπτογράφησης AES 128- bit. Ισχυρό πλεονέκτημα της τεχνολογίας DASH7 είναι ότι τα σήματα μπορούν να διεισδύσουν το σκυρόδεμα και

το νερό και να διανύσουν πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς να χρειάζεται μεγάλη κατανάλωση ενέργειας [30].

Το 6LoWPAN είναι ένα ανοιχτό πρότυπο το όνομα του οποίου προκύπτει από τα αρχικά των λέξεων IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks. Το 6LoWPAN έχει ως σκοπό καθορίζει τα κριτήρια για την εδραίωση επικοινωνιών IP πάνω σε συνδέσεις IEEE 802.15.4 με τέτοιο τρόπο ώστε να συμμορφώνεται στα ανοικτά πρότυπα και να παρέχει διαλειτουργικότητα σε άλλες IP συνδέσεις και συσκευές, καθώς και σε συσκευές IEEE 802.15.4 [14].

Το 6LoWPAN έχει ως κεντρική γραμμή ότι το πρωτόκολλο του διαδικτύου θα πρέπει να εφαρμόζεται και να συνδέει διαδικτυακά και τις πιο μικρές συσκευές χαμηλής ισχύος και επεξεργαστικής δυνατότητας. Στο 6LoWPAN ορίζεται η δομή και οι μηχανισμοί ενθυλάκωσης και συμπίεσης των επικεφαλίδων με σκοπό να δίνεται η δυνατότητα σε πακέτα IPv6 να διατίθενται σε δίκτυα βασισμένα στο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4. Το 6LoWPAN καθορίζει τα ανώτερα επίπεδα του δικτύου, ενώ τα κατώτερα, PHY και MAC, καθορίζονται από το πρότυπο IEEE 802.15.4.

Τα δεδομένα αποστέλλονται με μικρά πακέτα των 128 byte, με ρυθμό μεταφοράς δεδομένων από 20 kbps έως 250 kbps σε απόσταση 10 έως 30 μέτρων, εξαρτώνται από την επιλεγμένη συχνότητα λειτουργίας και διαμόρφωση του προτύπου IEEE 802.15.4. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα υποστήριξης διάφορων μεθόδων κρυπτογράφησης AES με αναγκαία την AES-CCM-64 [12].

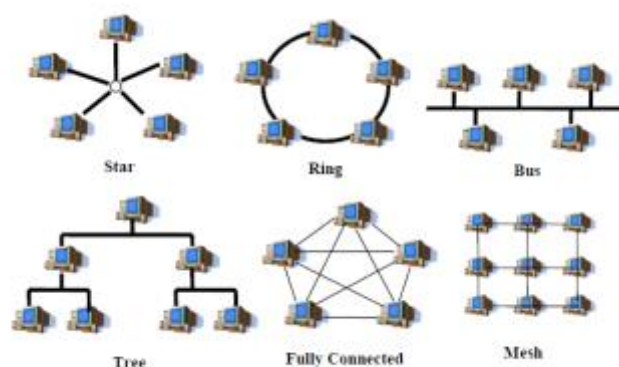
Το NeuRFon έχει πάρει την ονομασία του από τις λέξεις νευρώνας (neuron) και ραδιοεκπομπή (RF). Ήταν ένα ερευνητικό πρόγραμμα που ξεκίνησε το 1999 στη Motorola Labs για την ανάπτυξη ad hoc δικτύων σε εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Σύμφωνα με τη βιολογική αναλογία, οι μεμονωμένοι νευρώνες δεν έχουν μεγάλη χρηστική αξία, ενώ ένα μεγάλο δίκτυο που αποτελείται από πολλούς νευρώνες έχει μεγάλη ισχύ [30].

Η ίδια σκέψη χρησιμοποιείται και στα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία περιλαμβάνουν πολλές, απλές και ασύρματες συσκευές με χαμηλή ισχύ. Μεγάλο τμήμα της τεχνολογίας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος NeuRFon εντάχθηκε στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και στις προδιαγραφές του ZigBee. Χαρακτηριστικές

περιπτώσεις είναι ο καθορισμός του φυσικού επίπεδου στα 2.4 GHz και μεγάλο μέρος του πρωτοκόλλου δρομολόγησης πολλαπλών αλμάτων του ZigBee [5].

### 2.1.3. Τοπολογίες δικτύου

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων περιλαμβάνει κόμβους, οι οποίοι εκτελούν λειτουργίες αποστολής και λήψης μηνυμάτων, και ελέγχου, διαμέσου του ασύρματου διαύλου. Οι κόμβοι αυτοί συνιστούν την τοπολογία του δικτύου. Οι κύριες τοπολογίες, όπως απεικονίζονται και στην εικόνα είναι [12]:



Εικόνα 4 - Βασικές τοπολογίες [37]

- Τοπολογία αστέρα (Star): Κάθε κόμβος αδυνατεί να επικοινωνήσει απευθείας με άλλους, αλλά αποστέλλει δεδομένα μέσω ενός κεντρικού κόμβου. Οι κόμβοι (αισθητήρες) συγκεντρώνουν την πληροφορία και τη μεταδίδουν στον κεντρικό κόμβο, δηλαδή δεν μπορούν να εκτελέσουν τη λειτουργία της λήψης δεδομένων. Βασικό πλεονέκτημα είναι ότι η απώλεια κάποιου κόμβου πλην του κεντρικού δεν απενεργοποιεί το δίκτυο WSN. Μειονέκτημα της τοπολογίας είναι η κρισιμότητα του κεντρικού κόμβου, όπου θέτει το δίκτυο (α) με μικρότερη ευελιξία σε επέκταση, διότι η δυνατότητα εξυπηρέτησης νέων κόμβων έχει άμεση επίδραση πάνω της και (β) έχει μεγαλύτερη επιρρέπεια σε περίπτωση απώλειας του κεντρικού κόμβου, καθώς ένα τμήμα του δικτύου απενεργοποιείται.
- Σημείο προς σημείο (Point to Point): Στη τοπολογία P-P κάθε κόμβος ανταλλάσσει δεδομένα με τους γείτονές του σε αμφίδρομη λειτουργία

(αποστολή και λήψη δεδομένων) χωρίς τη μεσολάβηση κεντρικού κόμβου. Αν και έχει πιο απλή υλοποίηση σε σύγκριση με τη τοπολογία αστέρα, πιθανή απώλεια ενός κόμβου απενεργοποιεί ένα μεγαλύτερο τμήμα του δικτύου, γεγονός που το καθιστά μη αξιόπιστο.

- **Δακτύλιος (Ring):** Δεν υπάρχει κεντρικός κόμβος και όλοι οι κόμβοι εκτελούν την ίδια λειτουργία. Η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται προς μία κατεύθυνση, άρα δεν υπάρχει αμφίδρομη λειτουργία. Το γεγονός ότι οι κόμβοι συνδέονται σε μια αλυσίδα με τη μορφή δακτυλίου καθιστά το δίκτυο προβληματικό σε περίπτωση κατάρρευσης κόμβου. Μέρος της λύσης του προβλήματος δίνει η σχεδίαση SHR (Self-Healing Ring Network), η οποία χρησιμοποιεί δύο δακτυλίους παράλληλους (έναν κύριο και έναν εφεδρικό) και έχει μικρότερη επιρρέπεια σε σφάλματα.
- **Τοπολογία Bus:** Στη σχεδίαση Bus, τα δεδομένα μεταφέρονται σε όλους τους κόμβους. Κάθε κόμβος εξετάζει την επικεφαλίδα που πλαισίους των δεδομένων και ανιχνεύει και επεξεργάζεται τα δεδομένα που τον αφορούν.
- **Δένδρο (Tree):** Η τοπολογία δέντρου διαθέτει ένα κύριο κόμβο (root node), ο οποίος αποτελεί τον κύριο δρομολογητή δεδομένων. Ο κύριος κόμβος διασυνδέεται με πλήθος κεντρικών κόμβων οι οποίοι πραγματώνουν ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα, όπου οι εξαρτημένοι από αυτούς κόμβοι συνδέονται.
- **Πλήρως διασυνδεδεμένη (Fully connected):** Στη συγκεκριμένη τοπολογία η πληροφορία από τον αισθητήριο κόμβο προς το σταθμό βάσης μεταδίδεται προς όλους τους κόμβους του δικτύου. Αφορά για την πιο περίπλοκη τοπολογία και με μεγάλο κόστος για την ανάπτυξη.
- **Τοπολογία πλέγματος (Mesh):** Αφορά τα δίκτυα που συμβάλλουν στην επικοινωνία γειτονικών κόμβων. Κατά συνέπεια, η πολυπλοκότητα σε σχέση με ένα δίκτυο πλήρως διασυνδεδεμένο είναι μικρότερη.



#### 2.1.4. Θέματα ασφάλειας

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια των κόμβων και των παραγόντων δεδομένων τους, προκύπτουν πολλές προκλήσεις. Παραδείγματος χάριν, από το γεγονός ότι τα αισθητήρια είναι ενσωματωμένα με το περιβάλλον, προκύπτει ένα μεγάλο πρόβλημα: Δεν εγγυάται για την ασφάλεια των κόμβων. Κατά συνέπεια, σε αντίθεση με τους διακοσμητές του Διαδικτύου, προστίθεται ένας ακόμη κίνδυνος: κάποιος να αλλάξει το υλικό στους κόμβους και να το αναπληρώσει με κακοπροαίρετο υλικό ή να εξαπατήσει τους αισθητήρες, δίνοντας μη αντιπροσωπευτικές μετρήσεις για το πραγματικό περιβάλλον [18]. Για παράδειγμα, για έναν αισθητήρα η εσφαλμένη ένδειξη θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την λανθασμένη πληροφορία της πυρκαγιάς. Οπότε, επιβάλλονται αλγόριθμοι εντοπισμού επιθέσεων που θα εξασφαλίζουν την εγκυρότητα του δικτύου.

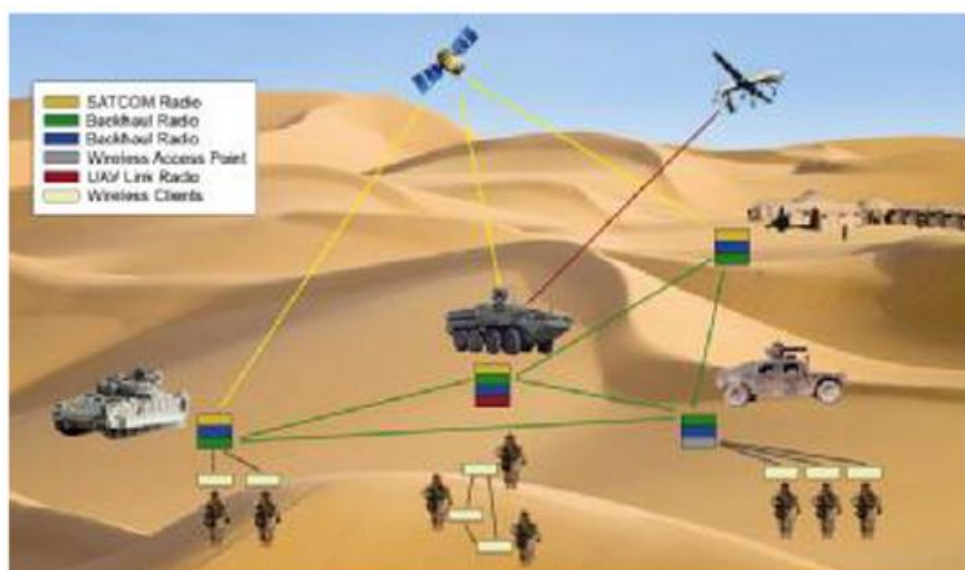
Όπως και με άλλες τεχνολογικές εξελίξεις, τα WSN προκαλούν σημαντικά ερωτήματα που αφορούν την πρόσβαση σε προσωπικά στοιχεία. Σε γενικές γραμμές, με την πάροδο του χρόνου, η ασφάλεια των στοιχείων φθείρεται, όπως λόγου χάριν, τα στοιχεία που παραμένουν έπειτα της χρήσης βίντεο παρακολούθησης, της χρήσης πιστωτικών ή της αβλαβής χρήσης των μηχανών αναζήτησης του Διαδικτύου. Έτσι και στα δίκτυα αισθητήρων, η τεχνολογία που στοχεύει στον εμπλουτισμό και βελτίωση της ζωής πιθανόν να μετατραπεί ως μέσο κακοπροαίρετης χρήσης [14].

#### 2.1.5. Παραδείγματα WSN εφαρμογών

Τα WSN έχουν απεριόριστες εφαρμογές. Συγκεκριμένα πρόκειται για [4]:

Στρατιωτικές Εφαρμογές: Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα ελέγχου, εντολών, επικοινωνίας, ανεύρεσης πληροφοριών, υπολογιστών, παρακολούθησης, έρευνας και εντοπισμού. Η ξαφνική εξέλιξη, αυτονομία και η ανεκτικότητα τους σε λάθη, ορίζει τα WSN μια ευνοϊκή τεχνική για το στρατό, λόγω του ότι ακόμη κι αν καταστραφούν μερικά από αυτά δεν θα θέσει σε κίνδυνο την στρατιωτική αποστολή. Ειδικότερα, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης κατά την παρακολούθηση των αντιπάλων δυνάμεων, τον εντοπισμό ακριβής εχθρικής περιοχής, την επιτήρηση του πεδίου

μάχης, τη στόχευση, τον υπολογισμό ζημιών στο πεδίο μάχης και στον εντοπισμό πυρηνικών, χημικών και βιολογικών επιθέσεων.



Εικόνα 5 - Στρατιωτική εφαρμογή [39]

Περιβαλλοντικές Εφαρμογές: Για δύσκολες και μεγάλης διάρκειας εφαρμογές, για παράδειγμα η παρακολούθηση ζώων και των συνηθειών τους. Ειδικότερα, παρακολούθηση των περιοχών που ζουν, της ύδρευσης, των συνθηκών που επηρεάζουν την χλωρίδα και την πανίδα, τον εντοπισμό χημικών και βιολογικών μολύνσεων, ακόμη και για παρακολούθηση σε πιο μεγάλη κλίμακα, όπως σε όλη τη γη [7].

Εμπορικές Εφαρμογές: Σε αυτές τις εφαρμογές συγκαταλέγονται η δημιουργία εικονικών ηλεκτρολόγων, η παρακολούθηση ποιότητας προϊόντων, η διαχείριση ελέγχου αποθέματος, περιβαλλοντικός έλεγχος σε κτήρια γραφείων, η κατασκευή έξυπνων χώρων για γραφεία, και πολλά άλλα [14].

## **2.2. Τεχνολογίες IoT**

### **2.2.1. Smart things**

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things- IoT) και των πρωτοκόλλων του συνιστούν ένα από τα υψηλότερα χρηματοδοτούμενα θέματα όχι μόνο για τη βιομηχανία, αλλά και για την πανεπιστημιακή κοινότητα. Η ραγδαία εξέλιξη του mobile internet, του mini-hardware manufacturing, του micro-computing, και της M2M επικοινωνίας, βοήθησαν για την εδραίωση του IoT. Το IoT έχει κυρίαρχη θέση στην σημερινή εποχή πλέον και βρίσκεται στην κορυφή των επενδύσεων στον τομέα της βιομηχανίας, αναφερόμενη στα δισεκατομμύρια που ξοδεύονται αυτή τη στιγμή στις τεχνολογίες και την έρευνα [24].

Οι IoT τεχνολογίες παρέχουν τη δυνατότητα σε πράγματα ή συσκευές που δεν είναι υπολογιστές, να ενεργούν έξυπνα και να λαμβάνουν συλλογικές αποφάσεις που είναι επωφελής σε ορισμένες χρήσεις. Επιπροσθέτως, παρέχουν στα πράγματα τη δυνατότητα της «ακοής», της «όρασης», της «σκέψης» ή της «δράσης» συνδυαστικά με την επικοινωνία και τον συντονισμό μέσω εντολών, με σκοπό να λαμβάνουν αποφάσεις οι οποίες ενδέχεται να είναι όχι μόνο καθοριστικές και κρίσιμες, αλλά και να μπορούν να σώσουν μια ανθρώπινη ζωή ή ένα κτήριο [13]. Αλλάζουν τα πράγματα από παθητικά αντικείμενα που παίρνουν ατομικές αποφάσεις σε «έξυπνα» αντικείμενα που παίρνουν κρίσιμες αποφάσεις ενεργώντας συλλογικά και βρίσκονται πάντα παρόντα.

Οι κύριες τεχνολογίες της υπολογιστικής, των επικοινωνιών ορατού φωτός, των ενσωματωμένων αισθητήρων και των πρωτοκόλλων του Ίντερνετ τόνισαν τη σπουδαιότητα του IoT, καθώς και προκάλεσαν πολλές απαιτήσεις αναφορικά με την ανάπτυξη εξειδικευμένων προτύπων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας [20].

### **2.2.2. IOT πρωτόκολλα πρόσβασης**

Σε αυτό το κεφάλαιο, επισημαίνονται πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά επίπεδα της στοίβας του δικτύου, περιλαμβάνοντας: το επίπεδο Ζεύξης δεδομένων, το επίπεδο Δικτύου και το επίπεδο Συνόδου. Παρουσιάζονται, ακόμη,

[27]

Ανάπτυξη και αποτίμηση αλγορίθμων δρομολόγησης στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων

πρότυπα όπως προσφέρονται από το Internet Engineering Task Force (IETF), το Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), το International Telecommunication Union (ITU) και από άλλους οργανισμούς. Σε αυτά τα πρότυπα έχει δοθεί προτεραιότητα την τελευταία δεκαετία, με σκοπό να καλύπτουν τις τωρινές, αλλά και τις μελλοντικές ανάγκες του IoT [24].

Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα μοντέλο 7-επιπέδων του IoT οικοσυστήματος (IoT ecosystem). Στη βάση του μοντέλου υπάρχει η αγορά ή ο τομέας εφαρμογών ο οποίος δύναται να είναι ένα έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο, ένα έξυπνο σπίτι κλπ. Το δεύτερο επίπεδο αποτελείται από αισθητήρες που θέτουν σε λειτουργία την εφαρμογή. Παραδείγματα τέτοιων αισθητήρων είναι οι αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας, κάμερες κ.α. Το τρίτο επίπεδο είναι το επίπεδο διασύνδεσης το οποίο παρέχει τη δυνατότητα στα δεδομένα που παράγονται από τους αισθητήρες να επικοινωνήσουν συνήθως με ένα κέντρο δεδομένων ή με ένα αποθηκευτικό νέφος (cloud) [23].



Εικόνα 6 - Το οικοσύστημα IoT [35]

Το επίπεδο διασύνδεσης (Interconnection Layer) του οικοσυστήματος IoT αναλύεται σε διαστρωμάτωση όπως φαίνεται στην εικόνα. Τα επίπεδα είναι: το επίπεδο ζεύξης δεδομένων, το επίπεδο δικτύου και το συνενωμένο επίπεδο μεταφοράς/συνόδου. Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων ενώνει δύο IoT στοιχεία όπως δύο αισθητήρες ή τον αισθητήρα με την πύλη δικτύου που ενώνει όλους τους αισθητήρες με το Ίντερνετ.

Συχνά, είναι αναγκαίο για αρκετούς αισθητήρες να έχουν επικοινωνία και να συγκεντρώνουν τις πληροφορίες πριν διοχετευθούν στο Ίντερνετ [20].

Το ZigBee συνιστά επέκταση της στοίβας πρωτοκόλλων του 802.15.4, όπως είδαμε νωρίτερα, καθώς υλοποιεί τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογών, εξαρτώμενο στις υπηρεσίες που παρέχουν το φυσικό επίπεδο και το MAC υπο-επίπεδο του 802.15.4. Η ZigBee Alliance είναι μια κοινή ομάδα πολλών μεγάλων εταιρειών, η οποία εξέλιξε το πρωτόκολλο ZigBee ως ένα πρότυπο μειωμένου κόστους και πολύ χαμηλής κατανάλωσης, αμφίδρομης και ασύρματης επικοινωνίας.

Το IEEE 802.15.4 εστιάζει στα δύο χαμηλότερα επίπεδα της στοίβας του πρωτοκόλλου, ενώ το ZigBee εστιάζει στην παροχή των πιο υψηλών επιπέδων για τη λειτουργικότητα των δεδομένων δικτύωσης και για υπηρεσίες ασφαλείας. Το πρωτόκολλο ZigBee μπορεί να θέσει σε λειτουργία τις τρεις βασικές τοπολογίες του IEEE 802.15.4. Βασικά χαρακτηριστικά του αποτελούν η δυνατότητα να υποστηρίζει μέχρι 254 συσκευές σε τοπολογία αστέρα, ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και η γρήγορη επαναφορά των συσκευών από κατάσταση sleep [13].

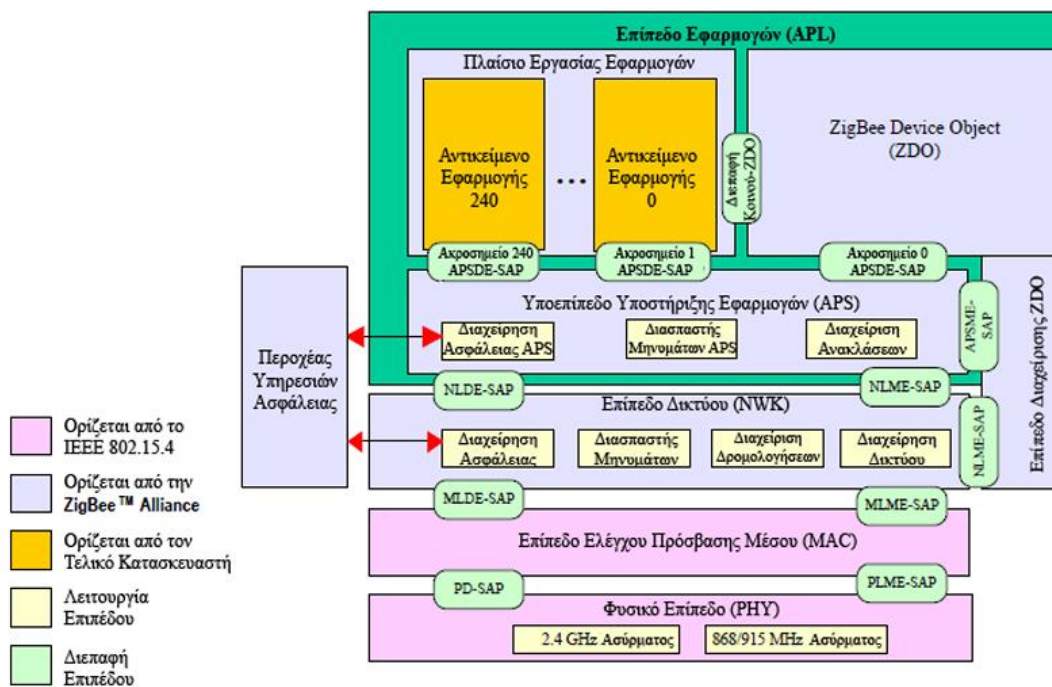
Το δίκτυο ZigBee έχει πολλές διόδους πρόσβασης, καθώς όλες οι συσκευές έχουν ισότιμη πρόσβαση στο μέσο επικοινωνίας. Υπάρχουν δύο τύποι μηχανισμών πολλαπλής πρόσβασης [9]:

- Ο μηχανισμός με λειτουργία beacon, όπου οι συσκευές μπορούν να εκπέμπουν μόνο σε προκαθορισμένες χρονοθυρίδες, και
- Η λειτουργία non-beacon, στην οποία όλες οι συσκευές επιτρέπεται να εκπέμπουν οποιαδήποτε χρονική στιγμή, εφόσον το κανάλι είναι ελεύθερο. Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee βρίσκεται στο πάνω μέρος του φυσικού επιπέδου και του MAC υπο-επιπέδου, που έχουν οριστεί από το πρότυπο IEEE 802.15.4. Η στοίβα πρωτοκόλλων καθορίζει τα ακόλουθα επίπεδα:

1. Το Επίπεδο Δικτύου- ZigBee Network Layer (NWK). Το NWK επίπεδο συνδέει τα δύο πρότυπα, δηλαδή του 802.15.4 και του ZigBee, καθώς διασφαλίζει τη σωστή λειτουργία του MAC υπο-επιπέδου και έχει

υπευθυνότητα για την οργάνωση και την παροχή δρομολόγησης σε ένα multi-hop δίκτυο, που στηρίζεται στη λειτουργία του IEEE 802.15.4.

2. Το Επίπεδο Εφαρμογής- ZigBee Application Layer (APL). Το επίπεδο αυτό είναι το ανώτερο και το πιο πολύπλοκο που ορίζει το πρότυπο και προσφέρει μια δομή για την ανάπτυξη και την επικοινωνία καταναμημένων εφαρμογών. Απαρτίζεται από τα Αντικείμενα Εφαρμογών (Application Objects), το Αντικείμενο Συσκευής ZigBee (ZigBee Application Object) και το υπο-επίπεδο Υποστήριξης Εφαρμογής (Application Support SubLayer – APS).
3. Το Πλαίσιο Εργασίας Εφαρμογών- ZigBee Application Framework (AF). Το επίπεδο AF είναι το τελευταίο επίπεδο του πρωτοκόλλου ZigBee και φέρει ευθύνη για την ύπαρξη και τη διαμονή όλων των αντικειμένων της εφαρμογής στο δίκτυο.



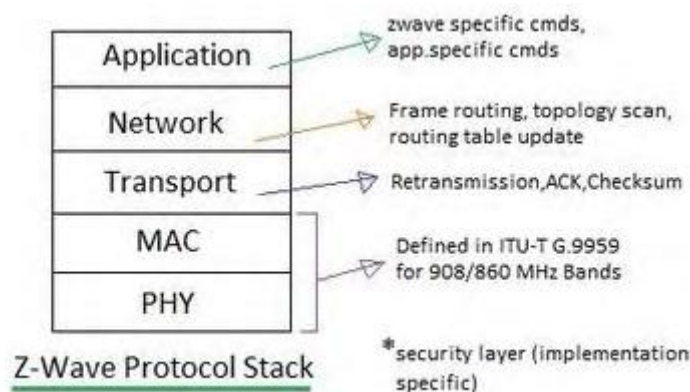
Εικόνα 7 - Αρχιτεκτονική της στοιβάς ZigBee και IEEE 802.15.4 [34]

Το Z-Wave είναι ένα χαμηλής ισχύος MAC πρωτόκολλο που σχεδιάστηκε για αυτοματισμούς κατοικιών και υλοποιείται για IoT επικοινωνία, κυρίως σε έξυπνα σπίτια και σε μικρούς εμπορικούς τομείς από τη συμμαχία Z-Wave. Το Z-Wave δύναται να καλύψει έως 30 μέτρων επικοινωνίας point-to-point και είναι κατάλληλο για μικρά μηνύματα σε IoT εφαρμογές, όπως για μέγεγχο ενέργειας, έλεγχο φωτισμού,



έλεγχο της υγείας μέσω φορητών συσκευών (wearables) κ.α. Χρησιμοποιεί CSMA/CA για ανίχνευση συγκρούσεων και ACK μηνύματα για αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων [23].

Το Z-Wave λειτουργεί στη ζώνη ISM για την ενιαία συχνότητα κάνοντας χρήση της μεθόδου μετατόπισης συχνότητας (FSK). Η ρυθμαπόδοση είναι 40 kbps και είναι κατάλληλο για εφαρμογές ελέγχου και αισθητήρες. Κάθε δίκτυο Z-Wave μπορεί να περιέχει μέχρι 232 κόμβους. Η αρχιτεκτονική στην οποία βασίζεται είναι το μοντέλο master/slave, όπου ο master έχει τον έλεγχο των slaves, τους στέλνει εντολές και χειρίζεται τον προγραμματισμό του όλου δικτύου [11].



Εικόνα 8 - Στοιβα πρωτοκόλλου Z-Wave [33]

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι συσκευών που ορίζονται στο πρωτόκολλο Z-Wave όπως ήδη αναφέραμε: οι ελεγκτές-masters και οι συσκευές σκλάβοι-slaves. Οι ελεγκτές έχουν την δυνατότητα να ξεκινήσουν μια μετάδοση καθώς και να αποθηκεύσουν όλα τα στοιχεία που σχετίζονται με τις δρομολογήσεις του δικτύου [26]. Οι συσκευές σκλάβοι, από την άλλη πλευρά, είναι απλώς συσκευές γενικού σκοπού με λειτουργικότητα τύπου εισόδου-εξόδου (GPIO) που διενεργούν τυφλά τα αιτήματα του ελεγκτή.

Η διαχείριση των κόμβων στο Z-Wave συγκροτείται από δύο κύριες λειτουργίες, ένταξη/αποκλεισμός και συσχέτιση. Η ένταξη φέρνει στο φως ένα νέο κόμβο στο δίκτυο. Το αντίστροφο είναι ο αποκλεισμός, το οποίο αναφέρει τη διαδικασία για την απομάκρυνση ενός κόμβου. Η συσχέτιση αποτελεί τη δημιουργία της λογικής σύνδεσης μεταξύ των συσκευών [22].

[31]

Ανάπτυξη και αποτίμηση αλγορίθμων δρομολόγησης στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων

### 2.2.3. Τεχνολογίες υποδομής

Το IoT προϋποθέτει ένα εκτενές εύρος από νέες τεχνολογίες και επιδεξιότητες που ακόμη αρκετές εταιρείες δεν έχουν τελειοποιήσει. Ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο στο χώρο του IoT είναι η ανωριμότητα των τεχνολογιών και υπηρεσιών και των πωλητών που τις παρέχουν. Οι δέκα πιο σημαντικές IoT τεχνολογίες για το 2017 και το 2018 είναι οι εξής [2]:

- ✓ IoT Security: Οι τεχνολογίες ασφαλείας θα έχουν ως καθήκον να προστατεύσουν τις IoT συσκευές και πλατφόρμες από επιθέσεις και αλλοιώσεις των δεδομένων και των πληροφοριών του IoT συστήματος, να κρυπτογραφήσουν την επικοινωνία τους και να εισάγουν νέες προκλήσεις έναντι της μίμησης των «πραγμάτων» του IoT και των επιθέσεων άρνησης-της-καταστασης-sleep που στοχεύουν στην εξάντληση των μπαταριών των έξυπνων συσκευών.
- ✓ IoT Analytics: Τα επαγγελματικά μοντέλα του IoT θα αξιοποιήσουν την πληροφορία που συλλέγεται από τα «πράγματα» του IoT με διάφορους τρόπους.
- ✓ IoT Device (Thing) Management: Τα μακρόβια και διόλου ευκαταφρόνητα «πράγματα» του IoT θα χρειάζονται διαχείριση και παρακολούθηση.
- ✓ Short range low-power IoT Networks: Η επιλογή ενός ασύρματου δικτύου για μια IoT συσκευή περιλαμβάνει την εξισορρόπηση πολλών αντικρουόμενων απαιτήσεων, όπως τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, το εύρος, το bandwidth, την πυκνότητα ισχύος κ.α.
- ✓ Low-Power Wide Area Networks (LPWAN): Ο μακροχρόνιος στόχος ενός δικτύου ευρείας περιοχής είναι να πετυχαίνει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από εκατοντάδες bps σε δεκάδες kbps με δυνατότητα εθνικής κάλυψης, διάρκεια ζωής μπαταρίας πάνω από 10 χρόνια, πολύ χαμηλό κόστος τερματικού και να υποστηρίζει εκατοντάδες χιλιάδες συσκευές συνδεδεμένες σε ένα σταθμό βάσης.



- ✓ IoT processors: Οι επεξεργαστές και οι αρχιτεκτονικές που εφαρμόζονται από τις συσκευές του IoT καθορίζουν πολλές από τις ικανότητες τους, όπως αν έχουν την ικανότητα για ισχυρή ασφάλεια και κρυπτογράφηση, την κατανάλωση ισχύος, αν είναι αρκετά εξελιγμένες και σύγχρονες ώστε να μπορούν να παρέχουν στήριξη σε ένα λειτουργικό σύστημα, δυνατότητα αναβάθμισης του λογισμικού και πράκτορες διαχείρισης ενσωματωμένους στη συσκευή.
- ✓ IoT Operating Systems: Τα παραδοσιακά λειτουργικά συστήματα όπως τα Windows και τα iOS δεν έχουν σχεδιαστεί για IoT εφαρμογές. Καταναλώνουν υπερβολική ενέργεια, έχουν ανάγκη από γρήγορους επεξεργαστές και σε κάποιες περιπτώσεις, υστερούν λειτουργιών.
- ✓ Event Stream Processing: Μερικές IoT εφαρμογές θα αποδίδουν υπερβολικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων που θα πρέπει να αναλύονται σε πραγματικό χρόνο.
- ✓ IoT platforms: Οι IoT πλατφόρμες συνδυάζουν πολλά δομικά στοιχεία της υποδομής ενός IoT συστήματος σε ένα προϊόν.

#### **2.2.4. Θέματα ασφάλειας σε IoT εφαρμογές**

Η ασφάλεια είναι ένα ακόμη σοβαρό θέμα σχετικά με τις IoT εφαρμογές καθώς απειλές μπορεί να βρεθούν σχεδόν σε όλα τα επίπεδα των IoT πρωτοκόλλων. Όλο και περισσότερες συσκευές και αντικείμενα καθημερινής χρήσης έχουν ενσωματωμένους αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων που αφορούν το περιβάλλον γύρω τους και τα άτομα που τα χρησιμοποιούν [27].

Ενώ το IoT υπόσχεται πως μέσω αυτών των δεδομένων θα εντείνει την άνεση και την αποτελεσματικότητα στις διάφορες καθημερινές λειτουργίες, εντούτοις, η συλλογή τους περιέχει σημαντικές επιπτώσεις στην ιδιωτική ζωή και την προστασία της. Ούτε στην Ευρώπη αλλά ούτε και στις ΗΠΑ δεν υπάρχει ακόμα καθορισμένο νομικό πλαίσιο που να επιτάσσει την προστασία του τεράστιου όγκου προσωπικών δεδομένων που συλλέγονται μέσω των διαφόρων συσκευών, ούτε να αναγκάζει τους

κατασκευαστές των συσκευών αυτών να υιοθετούν ικανοποιητικά πρωτόκολλα ασφαλείας [2]. Εξαρτάται από τη διακριτική ευχέρεια του κάθε κατασκευαστή κατά πόσον θα λάβει οποιεσδήποτε ενέργειες προς αυτή την κατεύθυνση.

Η κύρια λειτουργία του IoT, δηλαδή η διασύνδεση πολλαπλών καθημερινών αντικειμένων μέσω του διαδικτύου, γεννά ορισμένους προβληματισμούς. Αν τα «πράγματα» αυτά συνδέονται στο διαδίκτυο, τότε ποιος μπορεί να παρακολουθεί τα δεδομένα τους και ποιος να τα ελέγξει; Μπορεί οποιεσδήποτε να μάθει για την κατανάλωση ενέργειας ενός σπιτιού; Πού καταλήγουν τα προσωπικά δεδομένα και ποιος εγγυάται για την ασφάλεια τους; Ποιός ελέγχει και εξασφαλίζει την τήρηση όλων των παραπάνω και γενικά το IoT και τη βιομηχανία του; Τα ερωτήματα αυτά μπορούν να ενταχθούν στις εξής τρεις κατηγορίες [9]:

- Θέματα ελέγχου πρόσβασης- Ο έλεγχος πρόσβασης εξυπηρετεί στην διαχείριση της αλληλεπίδρασης και της επικοινωνίας μεταξύ χρηστών και συστημάτων.
- Θέματα απορρήτου και ασφαλείας- Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα ασφαλείας που προκύπτει με τη χρήση των IoT συσκευών είναι το πώς χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που συγκεντρώνουν από το περιβάλλον του χρήστη.
- Θέματα πολιτικής και νομοθεσίας- Η σημαντικότερη πρόκληση στον τομέα του IoT είναι η σύμπλευση τους με το Νόμο. Το πρώτο μεγάλο βήμα της Ε.Ε προς της κατεύθυνση της προστασίας των προσωπικών δεδομένων ήταν η Οδηγία 95/46/ΕΚ, η οποία ενσωματώθηκε στην ελληνική έννομη τάξη με τον Νόμο 2472/1997 που μετρούσε ήδη 20 έτη εφαρμογής. Η αναγκαιότητα προσαρμογής της νομοθεσίας στις σύγχρονες τεχνολογικές συνθήκες ώθησαν την Ε.Ε στην ψήφιση του Κανονισμού 2016/679 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την προστασία των φυσικών προσώπων έναντι της επεξεργασίας των δεδομένων προσωπικού χαρακτήρα και την ελεύθερη κυκλοφορία των δεδομένων.

Ο Κανονισμός αυτός που τέθηκε σε εφαρμογή στις 25 Μαΐου 2018, προσφέρει επαρκή νομική βάση για ζητήματα που αφορούν το IoT. Καίριας σημασίας για την

προστασία των δεδομένων αποτελούν, το άρθρο 3 για το πεδίο γεωγραφικής εφαρμογής, το άρθρο 7 αναφορικά με τις προϋποθέσεις συγκατάθεσης, το άρθρο 12 σχετικά με το δικαίωμα ενημέρωσης και το άρθρο 17 για το θεμελιώδες δικαίωμα στη λήθη.

### 2.2.5. CoAP & MQTT

Το Constrained Application Protocol (CoAP) είναι ένα συγχρονισμένο πρωτόκολλο επιπέδου συνόδου και τύπου πελάτη-εξυπηρετητή το οποίο δημιουργήθηκε από το Internet Engineering Task Force (IETF), παρόμοιο με το HTTP και προορίζεται για συσκευές με περιορισμένους πόρους. Οι περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούνται σε ένα WSN έχουν περιορισμένη χωρητικότητα σε μνήμη RAM καθώς και περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων [2].

Οι συσκευές αυτές συνήθως συνδέονται σε δίκτυα με χαμηλό εύρος ζώνης, όπως το 6LoWPAN, τα οποία έχουν υψηλό ποσοστό απώλειας πακέτων. Οι πληροφορίες που προσφέρονται από τους αισθητήρες διανέμονται στο σύστημα μέσα από μηχανισμούς του διαδικτύου για αυτό και τα WSN δεν πρέπει να θεωρούνται σαν ένα αυτόνομο δίκτυο μεταφοράς πληροφορίας. Με την χρήση του CoAP γίνεται προσπάθεια εφαρμογής των βασικών στοιχείων του HTTP για μεταφορά δεδομένων της εφαρμογής χρησιμοποιώντας δίκτυα περιορισμένης δυνατότητας [10].

Το CoAP χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο UDP για τη διαχείριση των πόρων για να αποφευχθεί το overhead του TCP και να μειώσει τις απαιτήσεις του για bandwidth. Το CoAP υποστηρίζει τόσο unicast όσο και multicast σε αντίθεση με το TCP ικανοποιώντας την ανάγκη για ομαδική επικοινωνία. Επιπλέον το CoAP στηρίζεται στην αρχιτεκτονική REST όπως και το HTTP που του παρέχει την δυνατότητα χρήσης των εντολών GET, POST, PUT, και DELETE, για δυνατότητα αλληλεπίδρασης σύμφωνα με τους πόρους σε μια αρχιτεκτονική πελάτη- διακομιστή, βοηθώντας έτσι να ξεπεραστεί η αναξιοπιστία του πρωτοκόλλου UDP.

Η χρήση του CoAP αποτελεί την πιο διαδεδομένη λύση σε εφαρμογές IoT και λαμβάνει σοβαρά υπόψη την προστασία της επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών, την προστασία από άποψη εχεμύθειας (confidentiality), διαφάνειας (integrity), και

εξακρίβωσης ταυτότητας (authentication). Το CoAP χρησιμοποιεί το DTLS πρωτόκολλο για προστασία των μεταδιδόμενων, αντίθετα όμως με άλλα πρωτόκολλα προστασίας που λειτουργούν στο επίπεδο δικτύου, το DTLS λειτουργεί στο επίπεδο εφαρμογής προσφέροντας προστασία στην end to end επικοινωνία μεταξύ των κόμβων [10].

Για να επιτύχει στην προστασία των δεδομένων που ανταλλάσσονται μέσω του δικτύου χρησιμοποιεί 2-way authentication μέσω της χρήσης handshake. Το CoAP είναι δομημένο σε δύο στρώματα και αυτά αποτελούνται από το κομμάτι των μηνυμάτων, που είναι υπεύθυνο να αλληλεπιδρά με το UDP (Message Layer), καθώς και το Request/Response κομμάτι που διαχειρίζεται την επικοινωνία πελάτη-εξυπηρετητή μέσω της εφαρμογής. Το πρωτόκολλο CoAP λόγω των χαρακτηριστικών του μπορεί να θεωρηθεί ως η σημαντικότερη επιλογή πρωτοκόλλου σε οικιακά δίκτυα [9].

### 3. Αλγόριθμοι δρομολόγησης σε WSN/ IOT

#### 3.1. AODV

Τα κύρια χαρακτηριστικά του AODV παρουσιάζονται αναλυτικά στο παρόν υποκεφάλαιο.

**Ανακάλυψη διαδρομής:** Η διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής αρχίζει όταν ένας κόμβος πηγή είναι απαραίτητο να επικοινωνήσει με έναν άλλο κόμβο για τον οποίο δεν έχει στη διάθεση του πληροφορίες δρομολόγησης. Ο κάθε κόμβος διατηρεί δύο μετρητές, τον `node_sequence_number` και τον `broadcast_id`. Ο κόμβος πηγής κάνει μετάδοση στους γειτονικούς κόμβους ένα αίτημα διαδρομής που λέγεται RREQ. Η δομή του RREQ είναι η ακόλουθη: `<src_addr, src_sequence_num, broadcast_id, dest_addr, dest_sequence_num, hop_cnt>`. Οι δύο μετρητές του κόμβου αναγνωρίζουν με μοναδικό τρόπο το αίτημα RREQ. Η τιμή του μετρητή `broadcast_id` αυξάνεται κάθε φορά που ο κόμβος πηγή εκδίδει ένα αίτημα RREQ. Ο κάθε γειτονικός κόμβος έχει τη δυνατότητα ανταπόκρισης στο αίτημα με δύο τρόπους [29].

Ο πρώτος τρόπος είναι να ικανοποιήσει το αίτημα διαδρομής στέλνοντας μία απάντηση δρομολόγησης (RREP). Ο δεύτερος τρόπος είναι να αναμεταδώσει το αίτημα διαδρομής στους δικούς του γειτονικούς κόμβους, αυξάνοντας την τιμή του μετρητή `hop_count` κατά ένα. Εάν ένας κόμβος λάβει ένα αίτημα RREQ που έχει τα ίδια `<src_addr, broadcast_id>` με κάποιο προηγούμενο αίτημα, το κάνει απευθείας drop. Εάν ένας κόμβος δεν μπορεί να ικανοποιήσει το αίτημα διαδρομής τότε κάνει αποθήκευση των ακόλουθων δεδομένων: τα destination IP και Source IP, τον μετρητή `broadcast_id`, τον χρόνο λήξης (που γίνεται χρήση του για τη διαδικασία αντίστροφης διαδρομής «reverse path process») και την `src_sequence_num`.

**Ρύθμιση αντίστροφης διαδρομής «reverse path process»:** Στη ρύθμιση αυτή, σε κάθε αίτημα διαδρομής RREQ υπάρχουν τα `<src_sequence_num>` και `<the last dest_sequence_num>`. Το πρώτο χρησιμοποιείται στη διατήρηση των πιο πρόσφατων πληροφοριών σχετικά με την αντίστροφη διαδρομή προς την πηγή. Το δεύτερο υποδεικνύει πόσο πρόσφατη είναι μια διαδρομή προτού γίνει αποδεκτή από την πηγή. Καθώς το αίτημα RREQ ταξιδεύει από τον κόμβο πηγή σε άλλους προορισμούς, ρυθμίζει αυτόματα την αντίστροφη πορεία από τους άλλους προορισμούς προς την πηγή [6]. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται επειδή κάθε κόμβος κάνει καταγραφή της διεύθυνσης του γειτονικού κόμβου από όπου έλαβε το πρώτο αντίγραφο του αιτήματος RREQ. Γίνεται διατήρηση αυτών των καταχωρήσεων για επαρκή χρόνο ώστε το αίτημα RREQ να έχει αρκετό χρόνο για να διασχίσει το δίκτυο και να δώσει μια απάντηση.

**Ρύθμιση προώθησης διαδρομής «forward path process»:** Στη διαδικασία αυτή, ο κόμβος που λαμβάνει μια απάντηση δρομολόγησης RREP κάνει μετάδοση της πρώτης απάντησης RREP για μια δεδομένη πηγή προς την ίδια την πηγή χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της αντίστροφης διαδρομής που έχει ήδη καθοριστεί. Οι κόμβοι που δεν βρίσκονται στην διαδρομή που έχει προσδιοριστεί από το RREP, θα τερματιστούν μετά από 3.000 ms και θα διαγράψουν όλους τους δείκτες αντίστροφης διαδρομής. Η διαδικασία αυτή παρέχει το πλεονέκτημα ότι ο αριθμός των απαντήσεων RREP που στέλνονται προς την πηγή είναι ο μικρότερος δυνατός [29]. Επιπλέον η πηγή έχει τη δυνατότητα να αρχίσει αμέσως τη μετάδοση δεδομένων αφού λάβει το πρώτο RREP και μπορεί αργότερα να κάνει αναβάθμιση στις πληροφορίες του αν εντοπίσει κάποια καλύτερη διαδρομή.

**Διατήρηση διαδρομής:** Στον αλγόριθμο AODV, η κίνηση των κόμβων που δεν βρίσκονται κατά μήκος κάποιας ενεργής διαδρομής δεν έχει επίδραση στη διαδρομή προς τον προορισμό. Σε περίπτωση μετακίνησης του κόμβου πηγής, μπορεί εύκολα να ξεκινήσει από την αρχή η διαδικασία εντοπισμού νέας διαδρομής. Σε περίπτωση μετακίνησης του κόμβου προορισμού ή των ενδιάμεσων κόμβων που μεσολαβούν ώστε να φτάσει το μήνυμα στον προορισμό του, γίνεται αποστολή ενός ειδικού αιτήματος RREP προς τους επηρεαζόμενους κόμβους [15]. Για τον εντοπισμό των κινήσεων των κόμβων μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιοδικά μηνύματα hello ή αναγνωρίσεις του link - layer (LLACKS) που έχουν πολύ μικρότερη καθυστέρηση από τα hello messages. Στην περίπτωση που κάποιος κόμβος δεν είναι προσιτός, το ειδικό αίτημα RREP αποστέλλεται πίσω στην πηγή και περιλαμβάνει έναν νέο αριθμό ακολουθίας καθώς και στη θέση του hop count την τιμή  $\infty$ .

**Διατήρηση τοπικής συνδεσιμότητας κόμβων:** Οι κόμβοι λαμβάνουν πληροφορίες για τους γειτονικούς τους κόμβους με κάποιον από τους δύο ακόλουθους τρόπους:

- Κάνοντας αναβάθμιση των τοπικών πληροφοριών συνδεσιμότητας κάθε κόμβου, κάθε φορά που αυτός λαμβάνει μετάδοση από κάποιον γειτονικό κόμβο,
- Αν ένας κόμβος αντιληφθεί ότι κάποιος γειτονικός του κόμβος δεν του έχει αποστείλει κανένα πακέτο μέσα στο hello\_interval, πραγματοποιεί μετάδοση ενός hello message που περιέχει την ταυτότητα αυτού του κόμβου καθώς και τον αριθμό ακολουθίας του.

**Τρόπος λειτουργίας των μηνυμάτων hello:** Τα hello messages δεν μεταδίδονται εκτός των γειτονικών κόμβων του κόμβου που τα αποστέλλει επειδή περιλαμβάνουν μία τιμή TTL (Time To Leave) 1. Οι γειτονικοί κόμβοι που λαμβάνουν ένα hello message αναβαθμίζουν τις τοπικές τους πληροφορίες συνδεσιμότητας και τις στέλνουν στον κόμβο που μετέδωσε το μήνυμα αυτό. Η λήψη ενός μηνύματος hello από κάποιον καινούργιο γειτονικό κόμβο ή η αποτυχία λήψης δύο συνεχόμενων μηνυμάτων hello από κάποιο κόμβο που υπήρχε την γειτονιά, υποδεικνύει ότι έχει υπάρξει αλλαγή στην τοπική συνδεσιμότητα [29].

## 3.2. DSDV

Τα κύρια χαρακτηριστικά του DSDV είναι:

**Ανακάλυψη διαδρομής:** Στον αλγόριθμο αυτό, η μετάδοση των πακέτων γίνεται μέσω των κόμβων με RT που αποθηκεύονται σε κάθε κόμβο. Κάθε κόμβος με RT περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς προορισμούς από ένα κόμβο σε ένα άλλον καθώς και τον αριθμό των hops για την κάθε διαδρομή. Ο κάθε κόμβος κάνει έκδοση ενός αριθμού ακολουθίας ο οποίος συνδέεται σε κάθε νέο μήνυμα ενημέρωσης RT [1]. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί μέθοδοι ενημέρωσης RT:

- Full dump, όπου γίνεται μεταφορά όλων των πληροφοριών των πινάκων δρομολόγησης αλλά μεταδίδονται σχετικά σπάνια.
- Incremental dumps, όπου γίνεται μεταφορά μόνο των πληροφοριών που άλλαξαν από το τελευταίο full dump, τοποθετείται μόνο σε μία μονάδα δεδομένων του δικτύου και αν δεν είναι δυνατή η μεταφορά τους πραγματοποιείται η μέθοδος full dump.

Κάθε κόμβος διατηρεί στατιστικά δεδομένα σχετικά με τη μέση χρονική διάρκεια που χρειάζεται προκειμένου να φτάσει ένα μήνυμα από τον ένα κόμβο στον άλλο. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για να μειωθεί ο αριθμός των αναμεταδόσεων των πιθανών καταχωρήσεων δρομολόγησης που έχουν τη δυνατότητα να φτάσουν σε ένα κόμβο από διαφορετικά μονοπάτια αλλά με τον ίδιο αριθμό ακολουθίας. Το DSDV χρησιμοποιεί μόνο συνδέσεις διπλής κατεύθυνσης μεταξύ των κόμβων. Η κατασκευή του πίνακα δρομολόγησης αρχίζει υπό τη συνθήκη ότι κάθε κόμβος στο δίκτυο θα κάνει ανταλλαγή περιοδικών μηνυμάτων με τους γείτονές του ώστε να δημιουργήσει πολλαπλά μονοπάτια σε κάθε άλλο κόμβο του δικτύου [29]. Κάθε μεμονωμένη διαδρομή προς οποιοδήποτε προορισμό έχει ετικέτα με έναν αριθμό ακολουθίας προορισμού που εκδίδεται από τον κόμβο προορισμού.

Οποιαδήποτε διαδρομή προς κάποιο προορισμό με μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας προορισμού, αντικαθιστά την ίδια διαδρομή με μικρότερο αριθμό ακολουθίας προορισμού στον RT του κόμβου. Κάθε κόμβος στέλνει ειδοποιήσεις αμέσως όταν συμβεί οποιαδήποτε σημαντική αλλαγή στον πίνακα δρομολόγησης του. Το γεγονός αυτό μπορεί να συμβεί εξαιτίας αποτυχίας σύνδεσης με τον γειτονικό ή τους

γειτονικούς κόμβους, αλλά ο κόμβος αναμένει για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα ώστε να διαφημίσει αυτές τις αλλαγές [1]. Το διάστημα αυτό υπολογίζεται, διατηρώντας, για κάθε προορισμό, ένα μέσο όρο των πιο πρόσφατων ενημερώσεων των δρομολογίων. Γίνεται χρήση αυτής της μεθόδου διαφήμισης από το πρωτόκολλο αυτό με σκοπό την ελαχιστοποίηση των αριθμών των ενημερώσεων διαδρομής που μεταδίδονται από ένα κόμβο.

Επιπλέον, όταν ένας κόμβος λαμβάνει μια ενημέρωση διαδρομής προς ένα προορισμό από κάποιον από τους γειτονικούς κόμβους του και λίγα δευτερόλεπτα αργότερα λαμβάνει δεύτερη ενημέρωση από διαφορετικό γειτονικό κόμβο για την ίδια διαδρομή και με τον ίδιο αριθμό ακολουθίας προορισμού αλλά με μικρότερο αριθμό βημάτων, ο κόμβος αυτόματα μεταδίδει την αλλαγή στον πίνακα δρομολόγησής του. Εάν δεν υπήρχε αυτό το είδος κανόνα, οι κόμβοι θα έπρεπε να διαφημίσουν δύο ενημερώσεις διαδρομής μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα [8]. Επομένως οι γειτονικοί κόμβοι μεταδίδουν τις νέες ενημερώσεις διαδρομής στους γείτονές τους, διότι κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα με τη διεύθυνση προορισμού, τον τελευταίο χρόνο διακανονισμού και το μέσο χρόνο ρύθμισης αυτής της διεύθυνσης. Ο κάθε κόμβος αξιοποιεί τις πληροφορίες στον πίνακα δρομολόγησης για τον έλεγχο της σταθερότητας μιας διαδρομής προς έναν προορισμό.

**Συντήρηση διαδρομής:** Το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSDV διατηρεί όλες τις διαδρομές στους πίνακες δρομολόγησης του κάθε κόμβου, επομένως δεν παρουσιάζεται η ανάγκη εύρεσης νέων διαδρομών.

### 3.3. DYMO

Κατά τον αλγόριθμο DYMO, όταν ένας κόμβος-πηγή επιθυμεί να αποστείλει πακέτα δεδομένων σε κάποιον άλλο κόμβο-προορισμό, τότε δημιουργεί και στέλνει σε όλο το δίκτυο ένα πακέτο εύρεσης διαδρομής (Route Request packet – RREQ), το οποίο περιέχει τον αριθμό ακολουθίας (Sequence number), τις διευθύνσεις του ιδίου και του προορισμού καθώς και το μέγιστο αριθμό αλμάτων που θα διανύσει το πακέτο αυτό μέσα στο δίκτυο. Όταν ένας κόμβος δέχεται το πακέτο αυτό, αναπτύσσει μία νέα καταχώρηση στον πίνακα δρομολόγησής του για τον κόμβο-πηγή του πακέτου.



Αν μία τέτοια καταχώρηση υπάρχει ήδη, τότε ο κόμβος παίρνει την απόφαση για το αν θα ανανεώσει την ήδη καταχωρημένη πληροφορία [25]. Όμως, για να γίνει αυτή η ανανέωση χρειάζεται η πληροφορία που υπάρχει στο πακέτο δρομολόγησης που ελήφθη, να είναι ανώτατη της ήδη καταχωρημένης πληροφορίας στον πίνακα δρομολόγησης. Για το στόχο αυτό, στο πρωτόκολλο διατυπώνονται κάποιοι κανόνες σύμφωνα με τους οποίους καθορίζονται αν η πληροφορία που μεταφέρει το πακέτο δρομολόγησης είναι ανώτερη της αποθηκευμένης πληροφορίας [15]. Οι κανόνες αυτοί είναι οι παρακάτω:

- Η πληροφορία του πακέτου δρομολόγησης εκλαμβάνεται ως *πεπαλαιωμένη (stale)*, όταν ο αριθμός ακολουθίας του πακέτου είναι μικρότερος από τον αριθμό ακολουθίας που είναι αποθηκευμένος στον πίνακα δρομολόγησης.
- Η πληροφορία του πακέτου δρομολόγησης θεωρείται *επιρρεπής σε βρόχο (loop-prone)*, όταν οι προαναφερθέντες αριθμοί ακολουθίας είναι ίσοι και ο αναφερόμενος στο πακέτο αριθμός αλμάτων (hop count) είναι μεγαλύτερος από τον αποθηκευμένο αριθμό αλμάτων συν ένα.
- Η πληροφορία του πακέτου δρομολόγησης εκλαμβάνεται ως *υποδεέστερη (inferior)*, όταν οι αριθμοί ακολουθίας είναι ίσοι και
  - ο αναφερόμενος αριθμός αλμάτων είναι μεγαλύτερος από τον αποθηκευμένο αριθμό αλμάτων, ή
  - ο αναφερόμενος και ο αποθηκευμένος αριθμός αλμάτων είναι ίσοι και το πακέτο δρομολόγησης είναι τύπου RREQ και η αποθηκευμένη διαδρομή δεν έχει παραβιαστεί.
- Διαφορετικά, η πληροφορία που περιλαμβάνεται στο πακέτο δρομολόγησης θεωρείται *υπέρτερη (superior)* της ήδη αποθηκευμένης στον πίνακα δρομολόγησης του κόμβου πληροφορίας.

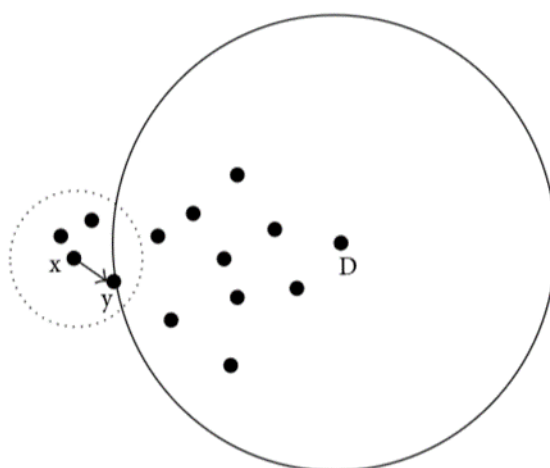
Είναι σημαντικό να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι οι παραπάνω κανόνες εφαρμόζονται σε κάθε πακέτο δρομολόγησης τύπου RREQ και RREP. Μόνο τα πακέτα που μεταφέρουν υπέρτερη πληροφορία έχουν την δυνατότητα να αναμεταδοθούν. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι θα γίνει προώθηση μόνο της έγκυρης πληροφορίας και

ταυτόχρονα δεν θα γίνει δημιουργία των βρόγχων δρομολόγησης. Η ανώτατη πληροφορία είναι χρήσιμη και για την ανανέωση των πινάκων δρομολόγησης, καθώς έχει μεγαλύτερη εγκυρότητα ή οδηγεί σε συντομότερες διαδρομές [29].

### 3.4. GPSR

#### Άπληστη μετάδοση

Στο GPSR, ο κόμβος προέλευσης συσκευάζει πληροφορίες τοποθεσίας του κόμβου-στόχου και μεταδίδει δεδομένα στον γειτονικό κόμβο με πληροφορίες τοποθεσίας και το βέλτιστο επόμενο βήμα θα πρέπει να είναι ο πλησιέστερος γειτονικός κόμβος [21]. Σύμφωνα με αυτή την αρχή, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν στον κόμβο καταβόθρα με τρόπο multihop. Η λεπτομερής διαδικασία της άπληστης μετάδοσης φαίνεται στην Εικόνα 9. Ο μικρός διακεκομμένος κύκλος αντιπροσωπεύει την ακτίνα επικοινωνίας του κόμβου x και ο κόμβος D είναι ο κόμβος βύθισης. Ο κόμβος x θα βρει τον κόμβο y ως το επόμενο άλμα του που είναι αυτό που είναι πιο κοντά στον κόμβο D με άπληστη μέθοδο. Με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα θα φτάσουν στον κόμβο D.



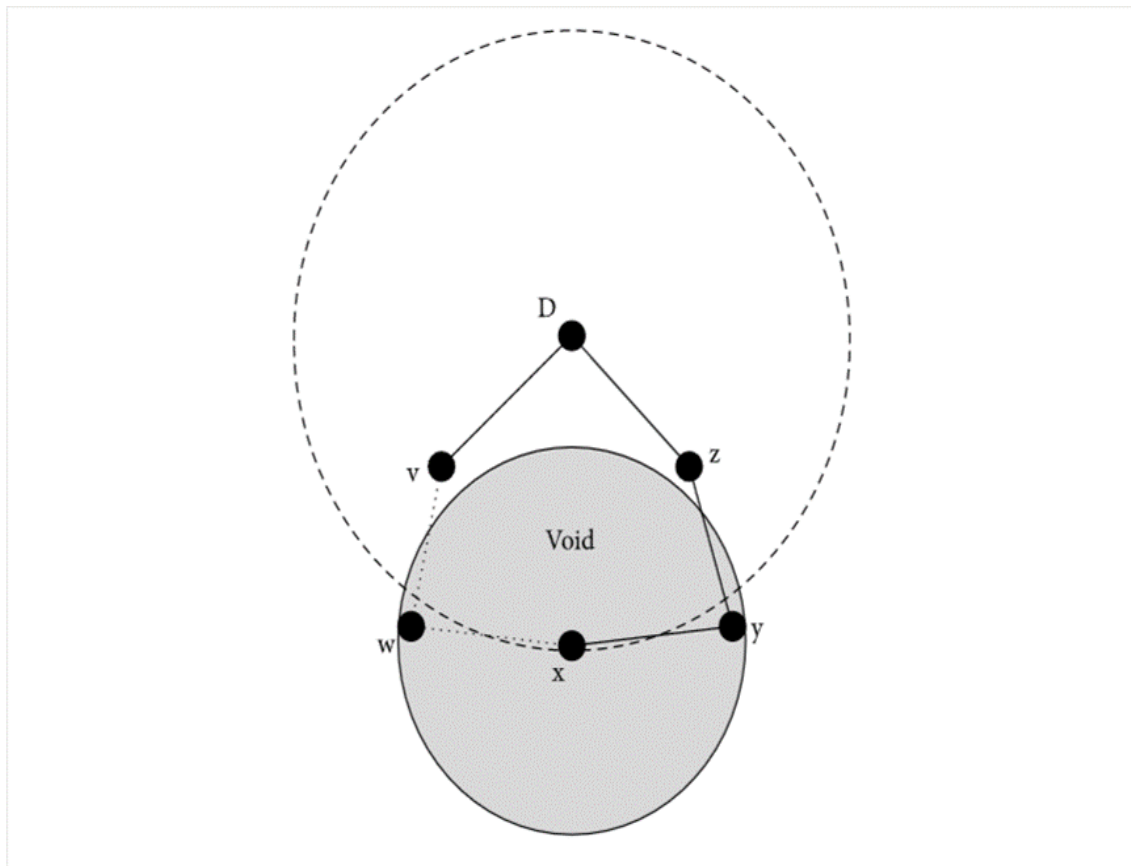
Εικόνα 9 - Άπληστη μετάδοση [17]

#### Μεταφορά συνόρων

Στην άπληστη μετάδοση, εάν ένας κόμβος δεν μπορεί να βρει κανέναν άλλο κόμβο στη γειτονιά του που να είναι πιο κοντά από τον ίδιο στον κόμβο στόχο, σχηματίζεται

[42]

ένα κενό δρομολόγησης. Το GPSR χρησιμοποιεί περιβάλλοντες αλγόριθμους δρομολόγησης χωρίς κατάσταση για να λύσει αυτό το πρόβλημα. Στον αλγόριθμο, κατασκευάζεται ένα επίπεδο γράφημα για να περιγράψει την τοπολογία του δικτύου και να βεβαιωθεί ότι οποιαδήποτε δύο ακμές δεν διασταυρώνονται μεταξύ τους. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, το  $x$  είναι πιο κοντά στον κόμβο-στόχο  $D$  από τους γειτονικούς κόμβους  $w$  και  $y$ . Ορίζεται το  $D$  ως κέντρο του κύκλου και την απόσταση μεταξύ  $D$  και  $x$  ως ακτίνα του κύκλου. Υπάρχουν δύο διαδρομές δρομολόγησης προς τον κόμβο στόχο  $D$ :  $(x \rightarrow y \rightarrow z \rightarrow D)$  και  $(x \rightarrow w \rightarrow v \rightarrow D)$ . Ωστόσο, ο κόμβος  $x$  δεν μπορεί να μεταδώσει δεδομένα ούτε στον κόμβο  $y$  ούτε στον κόμβο  $w$  σύμφωνα με τον άπληστο αλγόριθμο. Έτσι, το δίκτυο δημιουργεί ένα κενό δρομολόγησης.

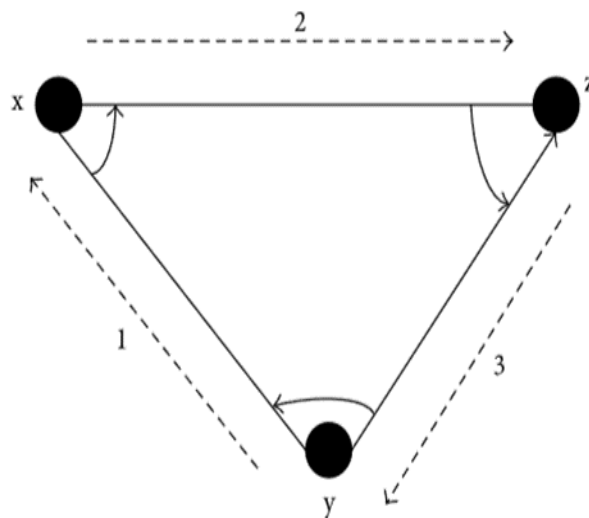


Εικόνα 10 - Αποτυχία άπληστης προώθησης [17]

Εάν ο κόμβος αναμετάδοσης γνωρίζει ένα κενό δρομολόγησης, μπορεί να χρησιμοποιήσει τον κανόνα του δεξιού χεριού για να βρει μια νέα διαδρομή δρομολόγησης. Ο κανόνας του δεξιού χεριού φαίνεται στην Εικόνα 11. Από τον [43]

κόμβο  $y$  στον κόμβο  $x$ , το επόμενο άκρο συνδέεται με το  $x$  και το  $y$  προς την κατεύθυνση από το  $x$  στο  $y$ . Ο κανόνας του δεξιού χεριού επιλέγει μια άλλη άκρη με αριστερόστροφη περιστροφή και στη συνέχεια διασχίζει την κλειστή πολυγωνική περιοχή. Στην Εικόνα 11, όταν ο κόμβος  $x$  ανακαλύπτει ένα κενό δρομολόγησης, η διαδρομή δρομολόγησης βάσει του δεξιού κανόνα είναι  $x \rightarrow w \rightarrow v \rightarrow D \rightarrow z \rightarrow y \rightarrow x$  και, στη συνέχεια, η μετάδοση του περιγράμματος έχει ολοκληρωθεί [29].

Στον αλγόριθμο GPSR, όταν ο κόμβος αισθητήρα επιλέγει τη διαδρομή δρομολόγησης χρειάζεται μόνο να γνωρίζει τη γεωγραφική θέση του εαυτού του, τους γειτονικούς κόμβους και τον κόμβο-στόχο και δεν είναι απαραίτητο να διατηρηθεί η παγκόσμια τοπολογία δικτύου.



Εικόνα 11 - Κανόνας του δεξιού χεριού [17]

### 3.5. DSR

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης δυναμικής πηγής (Dynamic Source Routing - DSR) είναι ένα απλό και αποτελεσματικό πρωτόκολλο δρομολόγησης που έχει σχεδιαστεί ειδικά για χρήση σε ασύρματα ad hoc δίκτυα πολλαπλών βημάτων κινητών κόμβων. Το DSR επιτρέπει στο δίκτυο να είναι πλήρως αυτο-οργάνωση και αυτο-διαμόρφωση, χωρίς την ανάγκη υπάρχουσας υποδομής ή διαχείρισης δικτύου. Είναι ένα αντιδραστικό πρωτόκολλο και όλες οι πτυχές του πρωτοκόλλου λειτουργούν αποκλειστικά κατ' απαίτηση. Λειτουργεί με την έννοια της δρομολόγησης πηγής. Η

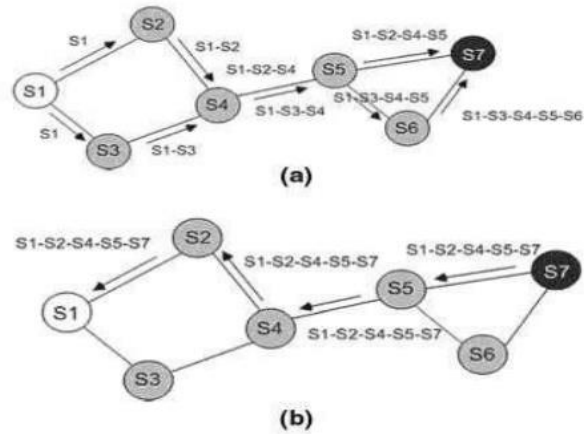
δρομολόγηση πηγών είναι μια τεχνική δρομολόγησης στην οποία ο αποστολέας ενός πακέτου καθορίζει την πλήρη ακολουθία κόμβων μέσω των οποίων προωθούνται τα πακέτα [5].

Το πλεονέκτημα της δρομολόγησης πηγής είναι ότι οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν χρειάζεται να διατηρούν ενημερωμένες πληροφορίες δρομολόγησης για να δρομολογήσουν τα πακέτα που προωθούν. Το πρωτόκολλο αποτελείται από τους δύο κύριους μηχανισμούς «Route Discovery» και «Route Maintenance».

Το DSR απαιτεί από κάθε κόμβο να διατηρεί μια διαδρομή – κρυφή μνήμη όλων των γνωστών ζευγών προορισμού. Εάν ένας κόμβος έχει ένα πακέτο για αποστολή, επιχειρεί να χρησιμοποιήσει αυτήν την κρυφή μνήμη για να παραδώσει το πακέτο. Εάν ο προορισμός δεν υπάρχει στην κρυφή μνήμη, τότε ξεκινά μια φάση εντοπισμού διαδρομής για την ανακάλυψη μιας διαδρομής προς τον προορισμό, στέλνοντας ένα αίτημα διαδρομής [20]. Αυτό το αίτημα περιλαμβάνει τη διεύθυνση προορισμού, τη διεύθυνση πηγής και έναν μοναδικό αριθμό αναγνώρισης. Εάν μια διαδρομή είναι διαθέσιμη από τη διαδρομή – προσωρινή μνήμη, αλλά δεν είναι πλέον έγκυρη, μπορεί να ξεκινήσει μια διαδικασία συντήρησης διαδρομής.

Ένας κόμβος επεξεργάζεται το πακέτο αίτησης διαδρομής μόνο εάν δεν έχει επεξεργαστεί προηγουμένως το πακέτο και η διεύθυνσή του δεν υπάρχει στη μνήμη cache διαδρομής [5]. Μια απάντηση διαδρομής δημιουργείται από τον προορισμό ή από οποιονδήποτε από τους ενδιάμεσους κόμβους όταν γνωρίζει πώς να φτάσει στον προορισμό.

Στο ακόλουθο παράδειγμα, εμφανίζεται η διαδικασία εντοπισμού διαδρομής όπου S1 είναι ο κόμβος προέλευσης και S7 ο κόμβος προορισμού.



(a) Route Discovery (b) Using route record to send the route reply

Εικόνα 12 - Dynamic Source Routing – DSR [31]

Σε αυτό το παράδειγμα, ο προορισμός S7, λαμβάνει το αίτημα μέσω δύο διαδρομών. Επιλέγει μία διαδρομή με βάση τις εγγραφές διαδρομής στο εισερχόμενο πακέτο και στέλνει μια απάντηση χρησιμοποιώντας την αντίστροφη διαδρομή προς τον κόμβο πηγής. Σε κάθε hop αποθηκεύεται η καλύτερη διαδρομή με ελάχιστο hop. Σε αυτό το παράδειγμα, εμφανίζεται η κατάσταση εγγραφής διαδρομής που έτρωγε κάθε άλμα για να φτάσει στον προορισμό από τον κόμβο πηγής. Εδώ, η επιλεγμένη διαδρομή είναι S1-S2-S4-S5-S7.

### 3.6. OLSR

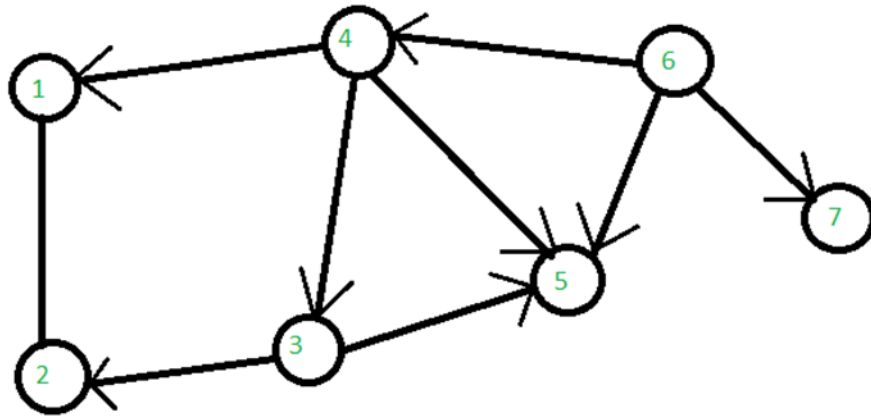
Το πρωτόκολλο δρομολόγησης βελτιστοποιημένης κατάστασης σύνδεσης (Optimized Link State Routing - OLSR) είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης IP βελτιστοποιημένο για δίκτυα ad hoc κινητών, το οποίο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε άλλα ασύρματα ad hoc δίκτυα. Το OLSR είναι ένα προληπτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάστασης σύνδεσης, το οποίο χρησιμοποιεί μηνύματα hello και ελέγχου τοπολογίας (TC) για να ανακαλύψει και στη συνέχεια να διαδώσει πληροφορίες κατάστασης σύνδεσης σε όλο το ad hoc δίκτυο κινητής τηλεφωνίας [14]. Οι μεμονωμένοι κόμβοι χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες τοπολογίας για να υπολογίσουν τους επόμενους προορισμούς μετάβασης για όλους τους κόμβους του δικτύου χρησιμοποιώντας τις συντομότερες διαδρομές προώθησης μετάβασης.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης κατάστασης σύνδεσης, όπως το Open Shortest Path First (OSPF) και το Intermediate System to Intermediate System (IS-IS) επιλέγουν έναν καθορισμένο δρομολογητή σε κάθε σύνδεση για την εκτέλεση flooding πληροφοριών τοπολογίας. Στα ασύρματα ad hoc δίκτυα, υπάρχει διαφορετική έννοια της σύνδεσης, τα πακέτα μπορούν και βγαίνουν από την ίδια διεπαφή. Ως εκ τούτου, απαιτείται μια διαφορετική προσέγγιση προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία πλημμύρας.

Χρησιμοποιώντας μηνύματα Hello, το πρωτόκολλο OLSR σε κάθε κόμβο ανακαλύπτει πληροφορίες γειτόνων 2-hop και εκτελεί μια κατανεμημένη επιλογή ενός συνόλου αναμετάδοσης πολλαπλών σημείων (MPRs). Οι κόμβοι επιλέγουν MPR έτσι ώστε να υπάρχει μια διαδρομή προς καθέναν από τους γείτονες 2-hop μέσω ενός κόμβου που επιλέγεται ως MPR. Αυτοί οι κόμβοι MPR στη συνέχεια προέρχονται και προωθούν μηνύματα TC που περιέχουν τους επιλογείς MPR [20].

Αυτή η λειτουργία των MPR καθιστά το OLSR μοναδικό από άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης κατάστασης σύνδεσης με μερικούς διαφορετικούς τρόπους: η διαδρομή προώθησης για μηνύματα TC δεν είναι κοινόχρηστη μεταξύ όλων των κόμβων, αλλά ποικίλλει ανάλογα με την πηγή, μόνο ένα υποσύνολο κόμβων πληροφοριών κατάστασης σύνδεσης πηγής, όχι σε όλους. Οι σύνδεσμοι ενός κόμβου διαφημίζονται αλλά μόνο αυτοί που αντιπροσωπεύουν επιλογές MPR.

Δεδομένου ότι η δρομολόγηση κατάστασης σύνδεσης απαιτεί συγχρονισμό της βάσης δεδομένων τοπολογίας σε όλο το δίκτυο, το OSPF και το IS-IS εκτελούν πλημμύρα τοπολογίας χρησιμοποιώντας έναν αξιόπιστο αλγόριθμο. Ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι πολύ δύσκολο να σχεδιαστεί για ad hoc ασύρματα δίκτυα, επομένως το OLSR δεν ασχολείται με την αξιοπιστία [5]. Απλώς κατακλύζει δεδομένα τοπολογίας αρκετά συχνά για να διασφαλίσει ότι η βάση δεδομένων δεν παραμένει ασυγχρονισμένη για εκτεταμένες χρονικές περιόδους.



Εικόνα 13 – OLSR [32]

Στο παραπάνω παράδειγμα ο κόμβος 6 δημιουργεί διαφημιστικούς κόμβους μηνυμάτων TC σε  $MS(6) = \{4, 5, 7\}$ . Ο Κόμβος 4 προωθεί το TC(6) από τον Κόμβο 6 και ο Κόμβος 3 προωθεί το TC(6) από τον Κόμβο 4. Αφού οι κόμβοι 3, 4 και 6 έχουν δημιουργήσει μηνύματα TC, όλοι οι κόμβοι έχουν πληροφορίες κατάστασης σύνδεσης για δρομολόγηση σε οποιονδήποτε κόμβο. Χρησιμοποιεί μια τεχνική για τη μείωση της πλημμύρας μηνυμάτων – MultiPoint Relaying (MPR).

Σε αυτό, κάθε κόμβος N στο δίκτυο επιλέγει ένα σύνολο γειτονικών κόμβων ως ρελέ πολλαπλών σημείων,  $MPR(N)$ , που αναμεταδίδουν πακέτα ελέγχου από N-Neighbors όχι σε πακέτα ελέγχου διεργασίας  $MPR(N)$  από N, αλλά δεν προωθούν το πακέτα. Το  $MPR(N)$  επιλέγεται έτσι ώστε όλοι οι γείτονες δύο βημάτων του N να καλύπτονται από (γείτονες ενός βήματος) του  $MPR(N)$ .



## 4. Εξομοιωτικά περιβάλλοντα WSN/IoT

### 4.1. NetWork Simulator (NS2 - NS3)

Το Network Simulation 2, επίσης γνωστό και ως ns-2, στηρίχθηκε σε ένα πρόγραμμα με ονομασία Real Network Simulator που είχε αφετηρία το 1989. Το ns-2 αποτελεί έναν προσομοιωτή διακριτών γεγονότων (discrete event simulator) που επιτρέπει την προσομοίωση πρωτοκόλλων TCP, δρομολόγησης (routing) και πολλαπλής εκπομπής (multicast) σε ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα. Δεν προσφέρει εγγενή υποστήριξη για δίκτυα OBS, αλλά δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης επεκτάσεων σε γλώσσα C++. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τις παραμέτρους του δικτύου, όπως την τοπολογία και το φορτίο, μέσω της γλώσσας OTcl (MIT Object Tcl scripting language) ενώ μπορεί να χρησιμοποιήσει και γραφικό περιβάλλον (GUI), όπως το NS WorkBench, με δυνατότητες drag-and-drop και άλλα [6].

Η προσομοίωση με το ns-2 δημιουργεί ένα αρχείο (trace file) με την τοπολογία και 24τα ίχνη των πακέτων που διακινήθηκαν. Στη συνέχεια πρέπει να γίνει εισαγωγή του αρχείου σε ειδικό λογισμικό, όπως το Nam (Network Animator), με σκοπό την αναπαραγωγή και την ανάλυση της προσομοίωσης. Άρα δεν είναι δυνατόν να προβληθεί η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, μαζί με το λογισμικό προσφέρεται ένα επιπλέον πρόγραμμα με ονομασία xgraph, το οποίο έχει τη δυνατότητα δημιουργίας γραφικών αναπαραστάσεων από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης [15]. Το ns-2 λειτουργεί συνήθως σε λειτουργικό Linux, FreeBSD, Solaris και Mac OSX, αλλά επιτρέπεται η εγκατάστασή του και σε Microsoft Windows, χρησιμοποιώντας την εφαρμογή Cygwin.

Ο ns-3 αποτελεί έναν προσομοιωτή δικτύου διακριτών τιμών του οποίου ο πυρήνας των μοντέλων προσομοίωσης υλοποιείται σε C++. Ο ns-3 κατασκευάστηκε ως μία βιβλιοθήκη η οποία μπορεί να είναι στατικά ή δυναμικά συνδεδεμένη σε ένα C++ κύριο πρόγραμμα που ορίζει την τοπολογία προσομοίωσης και θέτει σε λειτουργία τον προσομοιωτή. Επίσης, κάνει εξαγωγή σχεδόν όλου του συνόλου των API σε Python, κι έτσι επιτρέπει στα υποπρογράμματα Python να εισάγουν μια “ns-3” μονάδα με τον ίδιο τρόπο όπως στη C++. Το ns-3 στοχεύει στη δημιουργία ενός ανοιχτού περιβάλλοντος προσομοίωσης για την έρευνα δικτύωσης που θα προτιμηθεί από την ερευνητική κοινότητα. Αυτό σημαίνει κυρίως δύο πράγματα.

[49]

Ανάπτυξη και αποτίμηση αλγορίθμων δρομολόγησης στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων

- Είναι αναγκαίο να ευθυγραμμιστούν με τις ανάγκες προσομοίωσης της σύγχρονης έρευνας και δικτύωσης.
- Είναι αναγκαίο να ενθαρρύνουν τη συμβολή της κοινότητας, την αξιολόγηση από ομότιμους και την επικύρωση του λογισμικού.

Δεδομένου ότι η διαδικασία της δημιουργίας ενός προσομοιωτή δικτύου που περιλαμβάνει επαρκή αριθμό υψηλής ποιότητας επικυρωθεί, γίνεται δοκιμή του και επειδή τα ενεργά μοντέλα απαιτούν πολλή δουλειά, το έργο του ns-3 δίνει το φόρτο εργασίας σε μία μεγάλη κοινότητα χρηστών και προγραμματιστών [6].

## 4.2. Omnet++

Τα περισσότερα ερευνητικά προγράμματα σε παγκόσμιο επίπεδο στον ακαδημαϊκό αλλά και βιομηχανικό τομέα χρησιμοποιούν προσομοιώσεις, ώστε να κάνουν αξιολόγηση των προϊόντων τους πριν τα δημοσιεύσουν ή τα εισάγουν στην αγορά. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών είναι εξαρτημένα σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον προσομοίωσης στο οποίο γίνεται η εξέτασή τους, για παράδειγμα από την τοπολογία του δικτύου και από τα μοτίβα κίνησης (traffic patterns) που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις [15]. Αν για παράδειγμα, η τοπολογία που θα εφαρμοστεί είναι αρκετά μικρή και δεν είναι εφικτή η αντανάκλαση των χαρακτηριστικών των πραγματικών τοπολογιών, το προϊόν που θα δημιουργηθεί έχει πιθανότητα αποτυχίας όταν ενσωματωθεί σε πραγματικά δίκτυα.

Επιπροσθέτως, δεδομένου ότι στα πραγματικά δίκτυα εντοπίζονται κακόβουλοι κόμβοι, θα πρέπει το περιβάλλον προσομοίωσης να δύναται να ενσωματώσει τα χαρακτηριστικά και τις συνέπειες μίας επίθεσης. Η δημιουργία ρεαλιστικών και σύνθετων περιβαλλόντων προσομοίωσης χρειάζεται να είναι εύκολη. Επιπλέον αυτή η διαδικασία θα πρέπει να λειτουργεί αυτόματα με την χρήση ειδικών εργαλείων προκειμένου να εξοικονομείται χρόνος και να αποφεύγονται λάθη. Αυτό εγγυάται βέβαια ότι τα αποτελέσματα των διάφορων ερευνητικών δραστηριοτήτων θα έχουν την δυνατότητα να συγκριθούν και μεταξύ τους [1]. Το λογισμικό OMNeT++ αποτελεί ένα εκτενές περιβάλλον ανάπτυξης και προσομοίωσης, που στηρίζει τη μοντελοποίηση δικτύων επικοινωνιών και κατανεμημένων συστημάτων. Το

[50]

Ανάπτυξη και αποτίμηση αλγορίθμων δρομολόγησης στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων

περιβάλλον προσομοίωσης που προσφέρεται, στηρίζεται στην αρχή της προσομοίωσης διακριτών γεγονότων (discrete event simulation).

Το λογισμικό OMNeT++ δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής των προσομοιώσεων, μέσω των οποίων επιτρέπεται η ανάλυση της συμπεριφοράς και της επίδοσης των μοντελοποιημένων συστημάτων. Οι κυριότερες χρήσεις του είναι οι εξής:

- Μοντελοποίηση της κίνησης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων,
- Μοντελοποίηση πρωτοκόλλων,
- Μοντελοποίηση δικτύων αναμονής (queueing networks),
- Μοντελοποίηση πολυεπεξεργαστών (multiprocessors),
- Επικύρωση αρχιτεκτονικών υλικού (hardware architectures),
- Αξιολόγηση των επιδόσεων πολύπλοκων συστημάτων λογισμικού,
- Μοντελοποίηση οποιουδήποτε άλλου συστήματος, στο οποίο είναι δυνατό να εφαρμοστεί η αρχή των σειριακών εκτελούμενων γεγονότων.

Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του OMNeT++ είναι [ΠΧ]:

- **Ιεραρχικά Μοντέλα:** Τα μοντέλα του OMNeT++ δομούνται ιεραρχικά, όπως ακριβώς και τα πραγματικά συστήματα τα οποία μοντελοποιούν.
  - **Αντικειμενοστραφής χαρακτήρας:** Τα συστήματα στο OMNeT++ συντελούνται από αντικείμενα, το καθένα από τα οποία έχει τις δικές του ιδιότητες (attributes). Τα αντικείμενα ανήκουν σε κλάσεις. Υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης ή «εξειδίκευσης» των κλάσεων.
  - **Ειδίκευση στα Δίκτυα Επικοινωνιών και τα Πληροφοριακά συστήματα:** Το OMNeT++ διευκολύνει τη μοντελοποίηση συστημάτων πληροφορικής και επικοινωνιών, προσφέροντας κατάλληλες δομές και αρχιτεκτονικές. Οι μονάδες έχουν επικοινωνία μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων. Τα μηνύματα
- [51]

ενδέχεται να περιλαμβάνουν τις αυθαίρετα σύνθετες δομές δεδομένων. Οι μονάδες έχουν τη δυνατότητα αποστολής των μηνυμάτων είτε άμεσα στον προορισμό τους είτε κατά το μήκος μιας προκαθορισμένης πορείας, μέσω των πυλών και των συνδέσεων.

- **Γραφικό Περιβάλλον:** Η διαδικασία της μοντελοποίησης εξυπηρετείται μέσω του διαδραστικού γραφικού περιβάλλοντος που παρέχεται.
- **Ευελιξία:** Με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού υψηλού επιπέδου C++, το OMNeT++ παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησής με ευελιξία όλων των πρωτοκόλλων, των αλγόριθμων και των τεχνολογιών.
- **Αυτόματη παραγωγή προσομοιώσεων:** Γίνεται αυτόματη μεταγλώττιση των μοντέλων σε εκτελέσιμες προσομοιώσεις.
- **Ενσωματωμένα Στατιστικά:** Το OMNeT++ κατέχει μία σειρά από ενσωματωμένα στατιστικά μεγέθη τα οποία μπορούν να συλλεχθούν κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων για την μέτρηση συγκεκριμένων μεγεθών. Παράλληλα, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τα δικά του μεγέθη.
- **Εύκολη Αποσφαλμάτωση:** Με τη βοήθεια ενός εξελιγμένου διορθωτή λαθών (debugger) είναι εφικτή η εύκολη αναγνώριση και διόρθωση των σφαλμάτων.
- **Animation:** Μέσω του OMNeT++ μπορούν να δημιουργηθούν γραφικά (animations) σε διάφορα επίπεδα λεπτομέρειας. Τα γραφικά διευκολύνουν την οπτικοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος, μέσω της δυναμικής γραφικής απεικόνισης συγκεκριμένων γεγονότων που συνέβησαν κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης.
- **Εργαλεία Ανάλυσης:** Το OMNeT++ προσφέρει κατάλληλα εργαλεία που διευκολύνουν την ανάλυση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

### 4.3. Mixim

Το Mixim αποτελεί ένα πλαίσιο OMNeT ++ μοντελοποίησης που κατασκευάστηκε για κινητά και σταθερά ασύρματα δίκτυα ( δίκτυα περιοχή του σώματος, ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ad-hoc δίκτυα, δίκτυα οχημάτων, κλπ). Παρέχει λεπτομερή μοντέλα της μετάδοσης ραδιοφωνικών κυμάτων, εκτίμηση παρεμβολών, κατανάλωση ενέργειας και ασύρματα πρωτόκολλα MAC (π.χ. Zigbee). Ως εκ τούτου, το Mixim, θεωρείται μια μίξη προσομοιωτή που διαθέτει διάφορα πλαίσια προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν για ασύρματες και κινητές προσομοιώσεις στο OMNeT ++. Προσφέρει λεπτομερή μοντέλα και πρωτόκολλα , καθώς και υποδομές στήριξης [25]. Αυτά διαιρούνται σε πέντε ομάδες:

**Περιβάλλοντα Μοντέλα:** Σε μια εικονική πραγματικότητα, μόνο τα σχετικά μέρη του πραγματικού κόσμου θα χρειάζεται να αντικατοπτρίζονται, όπως τα εμπόδια που παρακωλύουν την ασύρματη επικοινωνία.

**Συνδεσιμότητα και κινητικότητα:** όταν οι κόμβοι μετακινούνται, η επιρροή τους σε άλλους κόμβους του δικτύου διαφέρει. Ο προσομοιωτής είναι αναγκαίο να παρακολουθεί αυτές τις αλλαγές και να προσφέρει λεπτομερή γραφική αναπαράσταση.

**Υποδοχή και σύγκρουση:** Για τις ασύρματες προσομοιώσεις, κινήσεις των αντικειμένων και οι κόμβοι να ασκούν επίδραση στη λήψη του μηνύματος. Ο χειρισμός της παραλαβής έχει υπευθυνότητα για την μοντελοποίηση πώς ένα μεταδιδόμενο σήμα μεταβάλλει την πορεία της προς τους δέκτες, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταδόσεις των άλλων αποστολέων.

**Πείραμα που υποστηρίζουν:** Η στήριξη του πειραματισμού είναι αναγκαία για να συμβάλλει στην προσπάθεια του ερευνητή να κάνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με την ιδέα της κατάστασης και να τον βοηθήσει στον εντοπισμό ενός κατάλληλου προτύπου για την εφαρμογή του και να στηρίξει διάφορες μεθόδους αξιολόγησης.

**Βιβλιοθήκη πρωτοκόλλου:** Τελευταίο, αλλά, επίσης, σημαντικό, μια πλούσια βιβλιοθήκη πρωτοκόλλου που να δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να συγκρίνουν τις ιδέες τους με αυτά που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί.

#### **4.4. Opnet**

Το OPNET εξυπηρετεί στη δημιουργία πληρέστατων και μεγάλων δικτύων σχεδιασμένων μέχρι και τη παραμικρή λεπτομέρεια, τα οποία μπορούν να «στηθούν» με σχετική ευκολία, να δοκιμαστούν με χρήση πολλών σύγχρονων τεχνολογιών και να βελτιστοποιηθούν γενικότερα. Αν και το OPNET σε διάφορες εκδόσεις του σαν ισχυρός προσομοιωτής παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής του είδους της δομής του δικτύου στο οποίο θα δουλέψει, το πιο διαδεδομένο μοντέλο αποτελεί αυτό των δικτύων [8]. Το μοντέλο κόμβων και το μοντέλο επεξεργασίας ολοκληρώνουν τη βασική τριάδα των προαναφερθέντων ειδών αλλά εστιάζουν περισσότερο στη μοντελοποίηση εσωτερικών χαρακτηριστικών και λειτουργιών όπως δημιουργία δεδομένων, αποθήκευση κ.τ.λ. ή διαγράμματα πεπερασμένων καταστάσεων (finite state machines - FSMs) που είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο της εσωτερικής λειτουργικότητας των αντικειμένων στο μοντέλο κόμβων. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γίνει σαφές ότι το OPNET λόγω της ευρείας γκάμας τεχνολογιών και δικτύων που ειδικεύεται προσφέρει ανώτερες δυνατότητες στο χρήστη.

#### **4.5. Castalia**

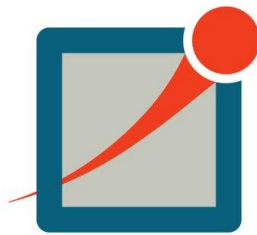
Η Castalia αποτελεί ένα προσομοιωτή ασύρματων δικτύων αισθητήρων για την αρχική φάση δοκιμών αλγορίθμου - πρωτοκόλλου που κατασκευάστηκε στα δίκτυα και τα διάχτυα προγράμματα υπολογιστών. Ενισχύει μοντέλα καναλιού και ραδιοκυμάτων, ένα βασικό στοιχείο αποτελεί η ακριβής προσομοίωση WSN αρχικής φάσης. Στηρίζει επίσης, ενισχυμένη μοντελοποίηση των συσκευών ανίχνευσης και άλλα συχνά παραμελημένα χαρακτηριστικά ενός WSN όπως, για παράδειγμα, το ρολόι του κόμβου μετακίνησης.

## 5. Πειραματικό Μέρος

Στην παρακάτω αναφορά, μπορεί να εντοπιστεί μία συνοπτική ανάλυση του εργαλείου Omnet++, του τρόπου λειτουργίας του, της δομής που κατασκευάστηκε για τους αλγορίθμους AODV, DYMO, DSDV, GPSR για 10, 20, 50, 100 και 200 κόμβους αντίστοιχα, της κίνησή τους στο χώρο καθώς και της ανάλυση των αποτελεσμάτων, που ζητήθηκαν.

### 5.1. Omnet++

Το Omnet++ αποτελεί μία εφαρμογή ανοιχτού λογισμικού με υποστήριξη GUI όπου βρίσκει εφαρμογή κυρίως στον τομέα των τηλεπικοινωνιών αλλά και έχει επεκταθεί σε μελέτες των δομών του hardware κτλ.



Εικόνα 14 - Το Logo του Omnet++

Στην περίπτωση αυτή, πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση της έκδοσης για Win10, 64 bit και έγινε κυρίως χρήση του IDE της εφαρμογής, που είναι γραμμένο σε Python.

Το συγκεκριμένο περιβάλλον, χρησιμοποιείται για την κατασκευή των εκάστοτε

```
simple Txcl
{
    gates:
        input in;
        output out;
}
network Tictocl
{
    submodules:
        tic: Txcl;
        toc: Txcl;
    connections:
        tic.out --> { delay = 100ms; } --> toc.in;
        tic.in <-- { delay = 100ms; } <-- toc.out;
}
```

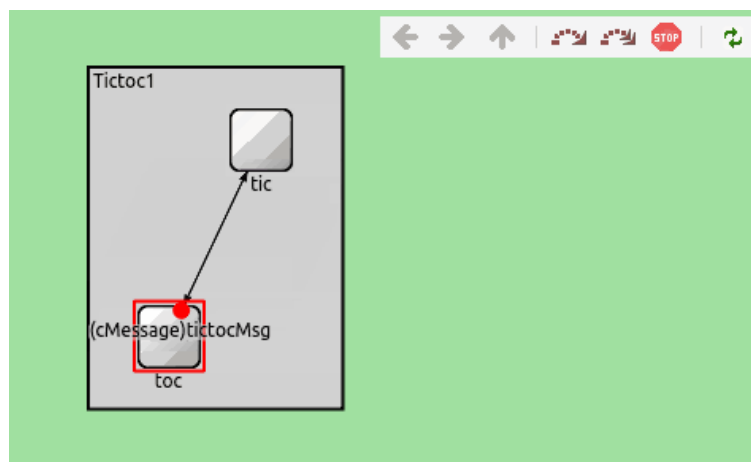
στοιχείων, τα οποία θα αποτελέσουν έπειτα το προς μελέτη δίκτυο ή γλώσσα NED.

Από τα παραπάνω, εύκολα συνάγεται το συμπέρασμα ότι έγινε η δήλωση σαν module το Tictoc1 το οποίο έχει μία είσοδο/έξοδο ενώ στο δεύτερο, δηλώνεται ένα δίκτυο με δύο modules τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους με ένα delay μετάδοσης του μηνύματος στα 100ms.

Το επόμενο σημαντικό κομμάτι είναι το .ini αρχείο το οποίο επιτρέπει την εκτέλεση της εκάστοτε προσομοίωσης. Εδώ παραδείγματος χάρη θα γινόταν η προσθήκη μόνο του παρακάτω:

```
[General]
network = Tictoc1
```

Πραγματοποιώντας την προσομοίωση, το περιβάλλον είναι το παρακάτω:



Εικόνα 15 - Περιβάλλον Εκτέλεσης

Η ολοκλήρωση της προσομοίωσης προσφέρει την δυνατότητα της μελέτης των αντίστοιχων μετρήσεων που παρέχονται για την εξαγωγή των συμπερασμάτων.



## 5.2. Πειραματικό Υπόβαθρο

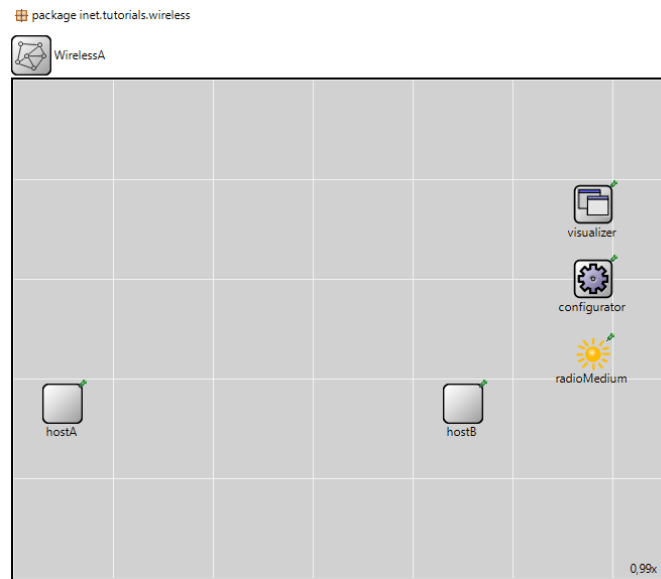
Στην παρακάτω προσομοίωση, έγινε εκμετάλλευση του γεγονότος ότι υπήρχαν έτοιμες βιβλιοθήκες υλοποίησης για την AODV, DYMO, DSDV και GPSR λειτουργία, οι οποίες βρίσκονται συγκεκριμένα στο framework INET, το οποίο αποτελεί ένα πακέτο ανοιχτού κώδικα, γραμμένο συγκεκριμένα για επικοινωνία δικτύων στο το Omnet++. Το ίδιο περιλαμβάνει πολλά πρωτόκολλα, τόσο ενσύρματης όσο και ασύρματης επικοινωνίας ενώ συνέχεια βελτιώνεται.

Με την εγκατάσταση του παραπάνω, και συγκεκριμένα του ανανεωμένου πακέτου inet4.4 το οποίο παρέχει τα βασικά εργαλεία τόσο ως προς την προσομοίωση όσο και στα αποτελέσματα, γεγονός που επιτρέπει την επέκταση της λειτουργίας του με σκοπό την δημιουργία και εκτέλεση μίας προσομοίωσης αλλά και την εξαγωγή των απαραίτητων αποτελεσμάτων για την εν λόγω εργασία. Οπότε, ουσιαστικά έγινε η επέκταση των τοπολογιών των κόμβων με βάση το δίκτυο που είναι επιθυμητό να στηθεί αλλά και η απαραίτητη τροποποίηση της κίνησή τους.

Λαμβάνοντας υπόψη την αρχική δομή, που φαίνεται παρακάτω στο WirelessA.ned αρχείο, το οποίο προϋπάρχει ήδη και διαθέτει τους 2 Hosts να επικοινωνούν μεταξύ τους, στην συνέχεια έγινε η τοποθέτηση 8 επιπλέον κόμβων προκειμένου το δίκτυο να φτάσει συνολικά στους 10 κόμβους που χρειάστηκαν για την υλοποίησή του. Μάλιστα ο απαιτούμενος αριθμός των κόμβων εντάσσεται στο δίκτυο με την βοήθεια μιας σταθεράς numHosts που είναι τύπος ακέραιου αριθμού (int) και προσαρμόζεται ανάλογα με το παράδειγμα που απαιτεί προσομοίωση.

```
int numHosts;
```

```
*.numHosts = 8
```



Εικόνα 16 - Αρχική Δομή



Εικόνα 17 - Επέκταση της αρχικής δομής

Παρακάτω φαίνεται η νέα τοπολογία του δικτύου, αξιοποιώντας την δομή των υπάρχοντων host από την βιβλιοθήκη του inet στην οποία τοποθετήθηκε ο απαραίτητος αριθμός υπολογιστών οι οποίοι θα αρχικοποιηθούν σε τυχαίες θέσεις στο χώρο του δικτύου που ορίστηκε.

```
import inet.networklayer.configurator.ipv4.Ipv4NetworkConfigurator;
import inet.node.inet.INetworkNode;
import inet.visualizer.contract.IIntegratedVisualizer;
import inet.physicallayer.contract.packetlevel.IRadioMedium;

network NetA
{
    parameters:

        int numHosts;

        @display("bgb=805.392,605.80804;bgg=100,1,grey95");
        @figure[title](type=label; pos=0,-1; anchor=sw; color=darkblue);

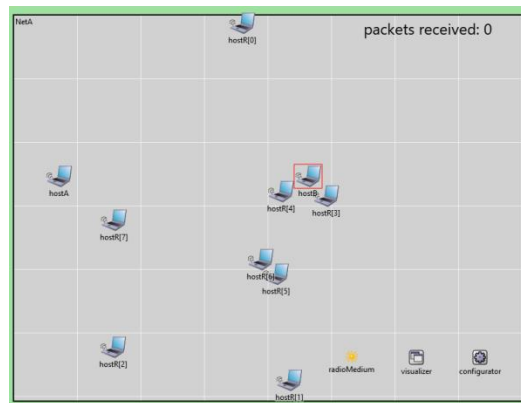
        @figure[rcvdPkText](type=indicatorText; pos=550,20; anchor=w;
font=,18;textFormat="packets received: %g"; initialValue=0);
        @statistic[packetReceived](source=hostB.app[0].packetReceived;
record=figure(count); targetFigure=rcvdPkText);

    submodules:
        radioMedium: <default("UnitDiskRadioMedium")> like IRadioMedium {
            @display("p=531.04803,537.138;is=s");
        }
        visualizer: <default("IntegratedCanvasVisualizer")> like
IIntegratedVisualizer if hasVisualizer() {
            @display("p=633.36005,538.356;is=s");
        }
        configurator: Ipv4NetworkConfigurator {
            @display("p=733.236,538.356;is=s");
        }

        hostA: <default("WirelessHost")> like INetworkNode {
            @display("p=70.560005,253.00801");
        }
        hostB: <default("WirelessHost")> like INetworkNode {
            @display("p=462.67203,253.00801");
        }

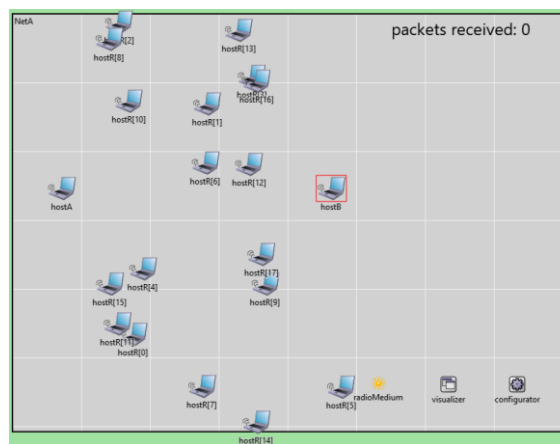
        hostR[numHosts]: <default("WirelessHost")> like INetworkNode;
}
}
```

Για 10 κόμβους :



Εικόνα 18 - 10 κόμβοι στο δίκτυο

Για 20 κόμβους:



Εικόνα 19 - 20 κόμβοι στο δίκτυο

Για 50 κόμβους:



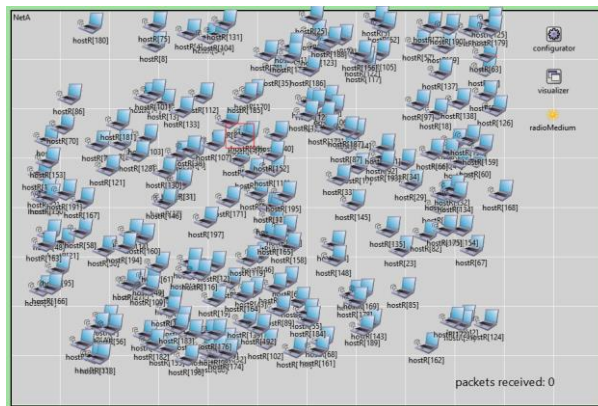
Εικόνα 20 - 50 κόμβοι στο δίκτυο

Για 100 κόμβους:



Εικόνα 21 - 100 κόμβοι στο δίκτυο

Για 200 κόμβους:



Εικόνα 22 - 200 κόμβοι στο δίκτυο

Έπειτα, προτού γίνει η εκτέλεση της προσομοίωσης, προστέθηκαν και οι συγκεκριμένες κινήσεις στους κόμβους κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ενώ αυξήθηκε αντίστοιχα και ο χρόνος κατά τον οποίο θα εκτελεστεί η προσομοίωση στο 1 λεπτό ( 60sec ).

```
sim-time-limit = 60s
```

Για τους hostA και hostB τοποθετήθηκε μία κυκλική κίνηση με ακτίνα 80 μέτρα και ταχύτητα 60mps για τον hostA και 120 μέτρα ακτίνα και ταχύτητα 80mps αντίστοιχα για τον hostB όπως φαίνεται και παρακάτω, ενώ για τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου δόθηκε μία ευθεία γραμμική κίνηση που τους οδηγεί να ανεβοκατεβαίνουν μέσα στα όρια του δικτύου στα οποία έχουν αρχικοποιηθεί. Η ταχύτητα των υπόλοιπων κόμβων έχει οριστεί στα 5mps

```
description = Configuring node movements
extends = Wireless06

*.hostR*.mobility.typename = "LinearMobility"
*.hostR*.mobility.speed = 5mps
*.hostR*.mobility.initialMovementHeading = 270deg

*.hostA.mobility.typename = "CircleMobility"

*.hostA.mobility.cx = 170m
*.hostA.mobility.cy = 253m
*.hostA.mobility.r = 80m
*.hostA.mobility.speed = 60mps
*.hostA.mobility.startAngle = 90deg

*.hostB.mobility.typename = "CircleMobility"

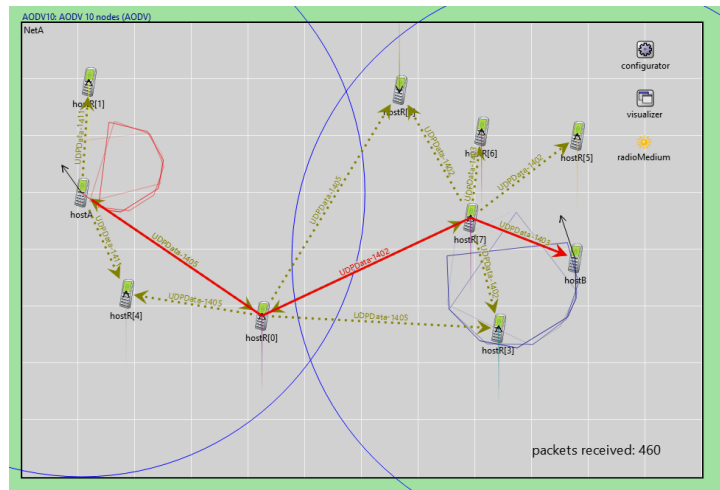
*.hostB.mobility.cx = 862m
*.hostB.mobility.cy = 453m
*.hostB.mobility.r = 120m
*.hostB.mobility.speed = -80mps
*.hostB.mobility.startAngle = 270deg

*.host*.wlan[0].mac.queue.packetCapacity = 10

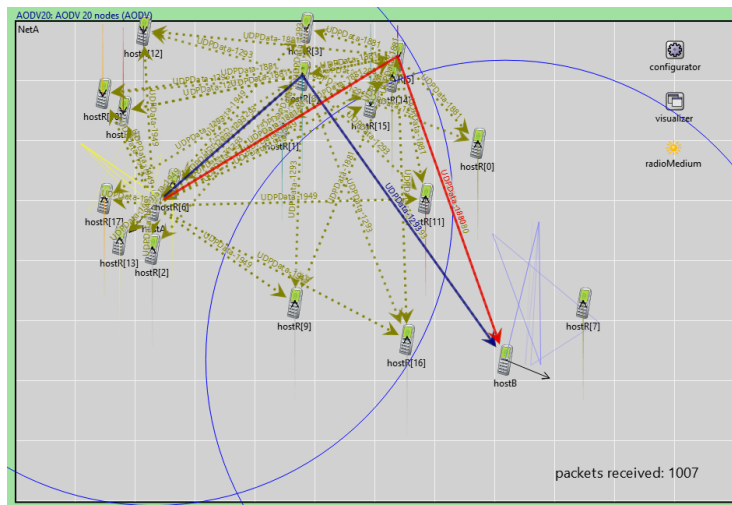
*.visualizer.mobilityVisualizer.displayVelocities = true
*.visualizer.mobilityVisualizer.displayMovementTrails = true
```

### 5.3. AODV

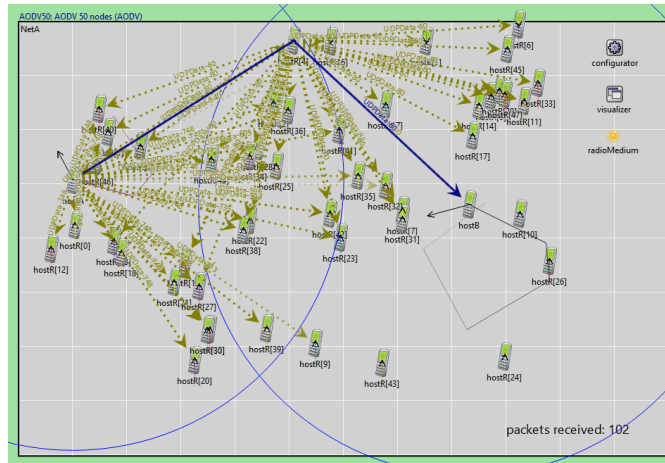
Παρακάτω φαίνονται ορισμένα τυχαία στιγμιότυπα της προσομοίωσης αυτής:



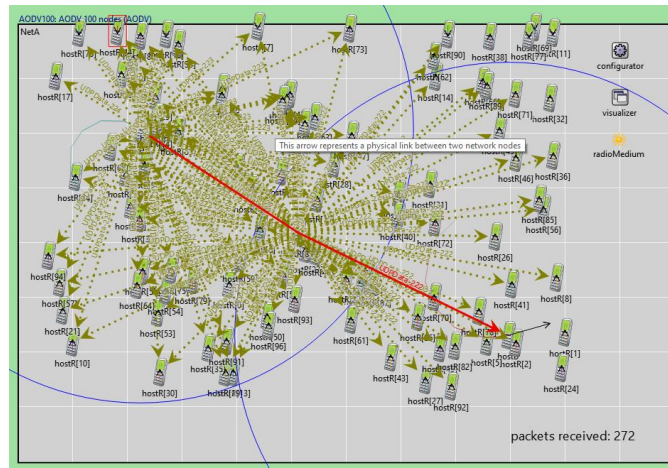
Εικόνα 23 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 10 κόμβους



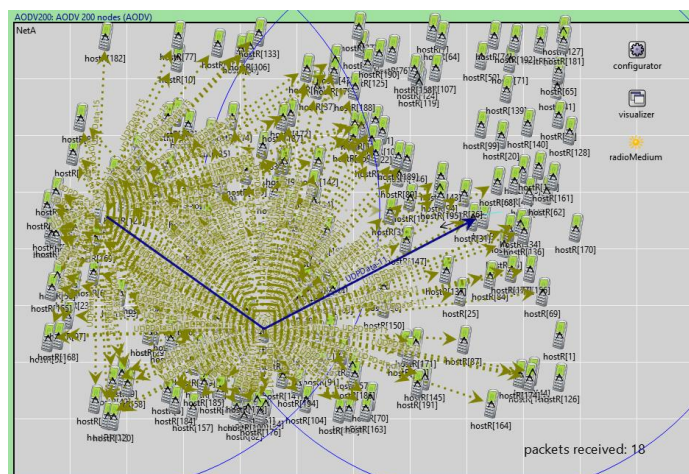
Εικόνα 24 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 20 κόμβους



Εικόνα 25 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 50 κόμβους



Εικόνα 26 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 100 κόμβους



Εικόνα 27 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του AODV για 200 κόμβους

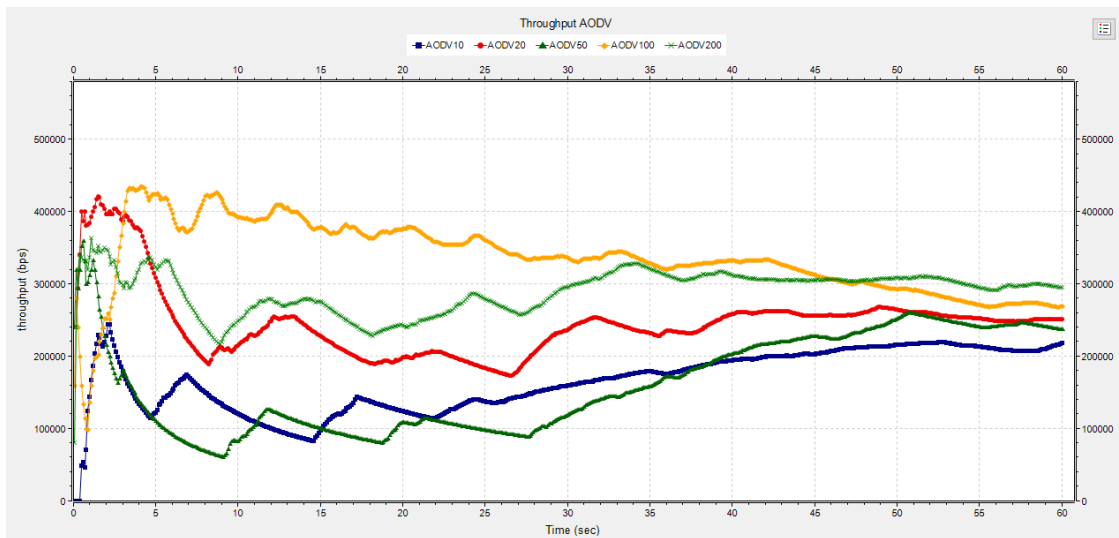


Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλους τους αλγορίθμους που εκτελέστηκαν.

Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν μπορούν να φανούν παρακάτω και είναι τα εξής:

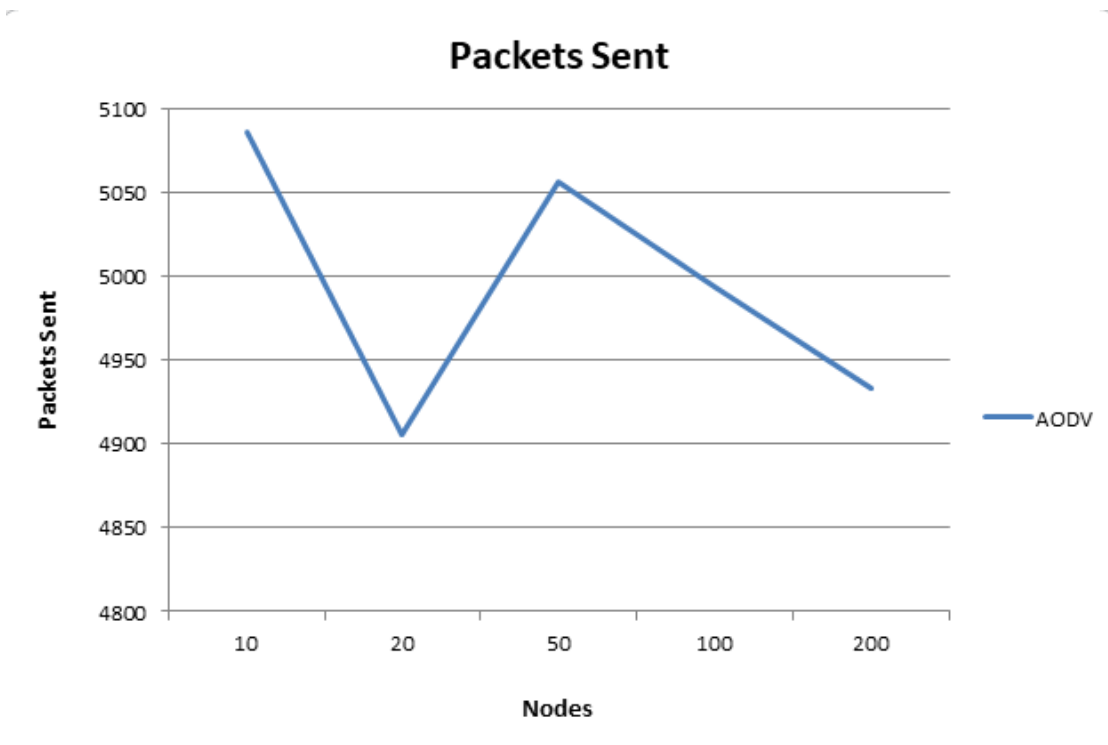
- Throughput : Στα δίκτυα επικοινωνιών, το throughput υποδεικνύει τον ρυθμό της επιτυχούς παράδοσης των μηνυμάτων μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας, όπως είναι το Ethernet ή το ραδιόφωνο. Το throughput συνήθως μετριέται σε bits ανά δευτερόλεπτο (bits/sec ή bps)
- Packet Sent: Υποδεικνύει τον αριθμό των πακέτων που στάλθηκαν από τον πατρικό κόμβο (κόμβος πηγή).
- Packet Received: Υποδεικνύει τον αριθμό των πακέτων που παραλήφθηκαν επιτυχώς από τον κόμβο στόχο (κόμβος προορισμός).
- End-to-End Delay: Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο αναφέρεται στον χρόνο που χρειάζεται για να μεταδοθεί ένα πακέτο σε ένα δίκτυο από τον κόμβο πηγή στον κόμβο προορισμό.
- Energy Consumption: Η κατανάλωση ενέργειας είναι η ποσότητα της ενέργειας ή της ισχύος που χρησιμοποιείται από τον εκάστοτε κόμβο.
- Packet Error Rate: Είναι ο αριθμός των πακέτων σφαλμάτων διαιρεμένος με τον συνολικό αριθμό των ληφθέντων πακέτων.

### 5.3.1. Throughput

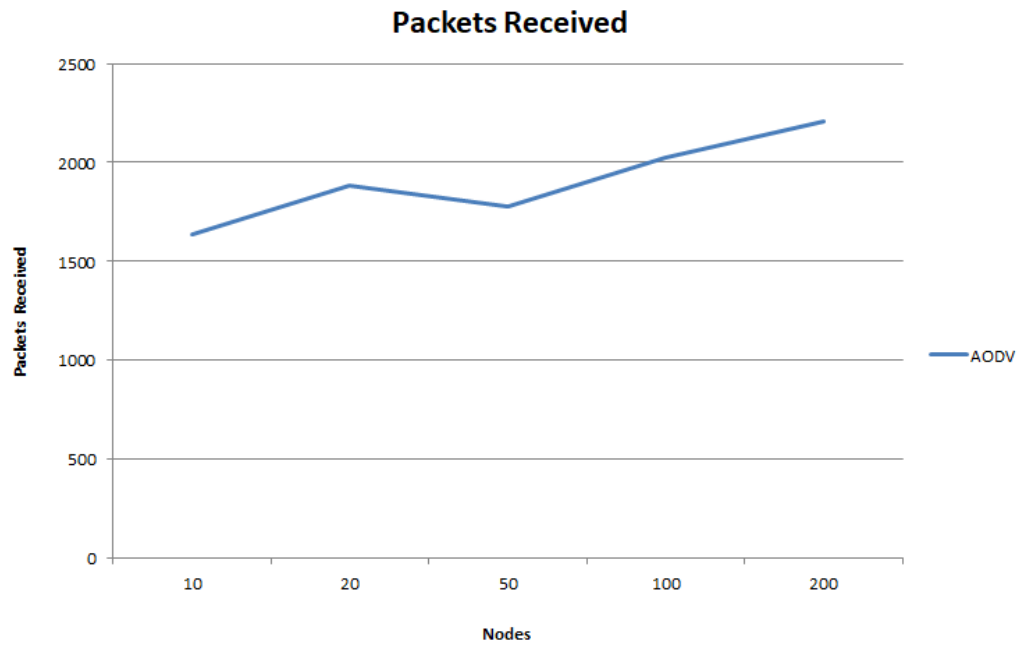


Εικόνα 28 – Γραφική αναπαράσταση του Throughput για τον αλγόριθμο AODV των προσομοιώσεων για 10, 20, 50, 100, 200 κόμβους

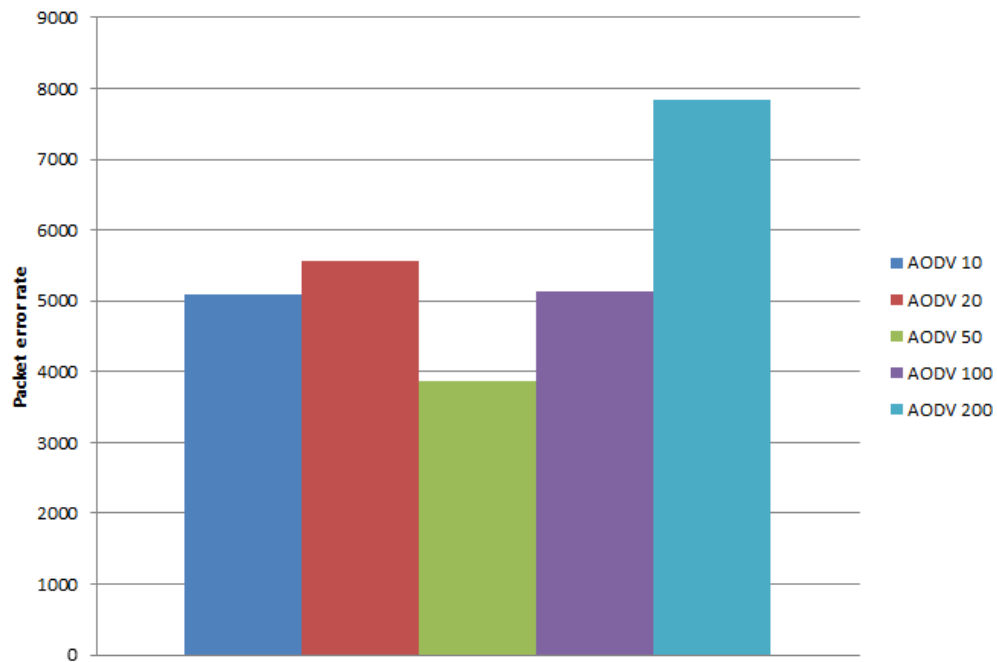
### 5.3.2. Packets



Εικόνα 29 - Packet Sent για τον AODV σε συνάρτηση με τους κόμβους

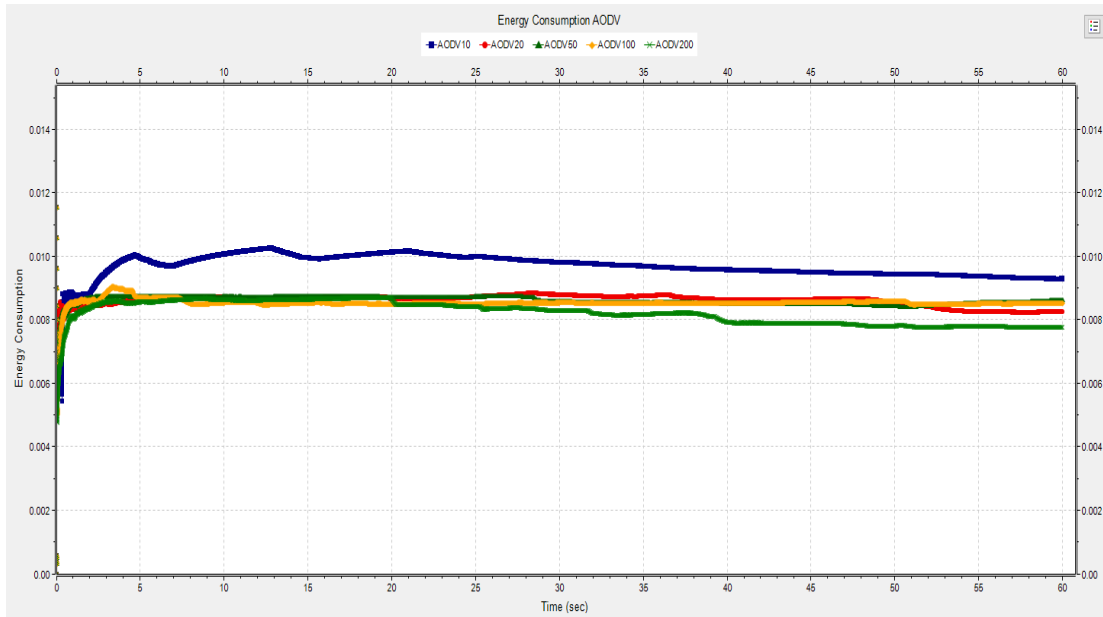


Εικόνα 30 - Packet Received για τον AODV σε συνάρτηση με τους κόμβους

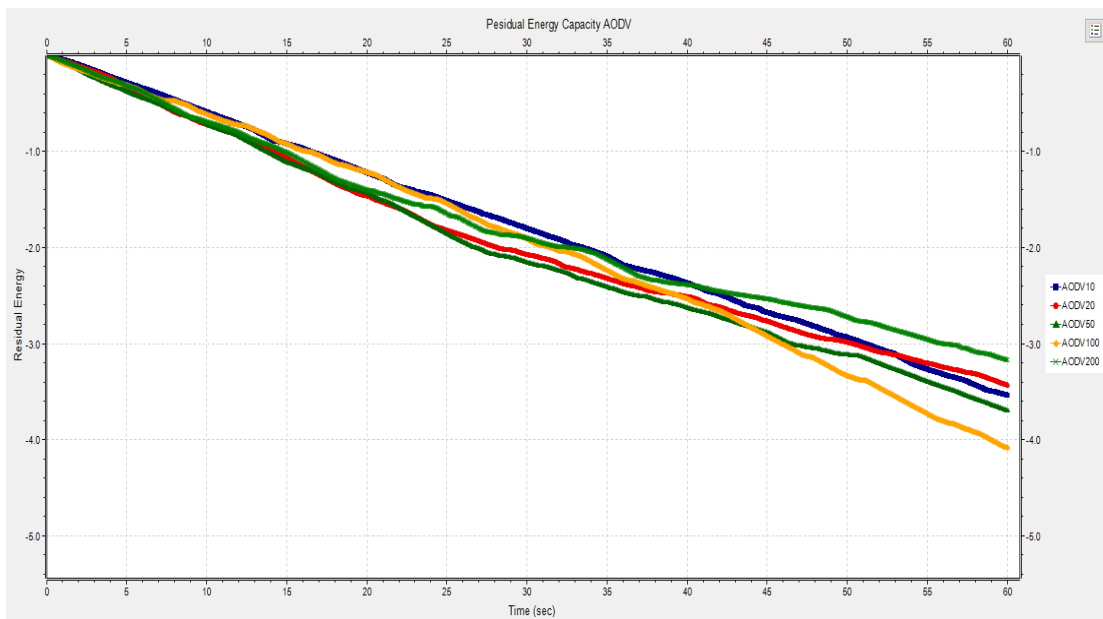


Εικόνα 31 - Packet error rate για τον AODV αλγόριθμο για όλους τους κόμβους

### 5.3.3. Κατανάλωση

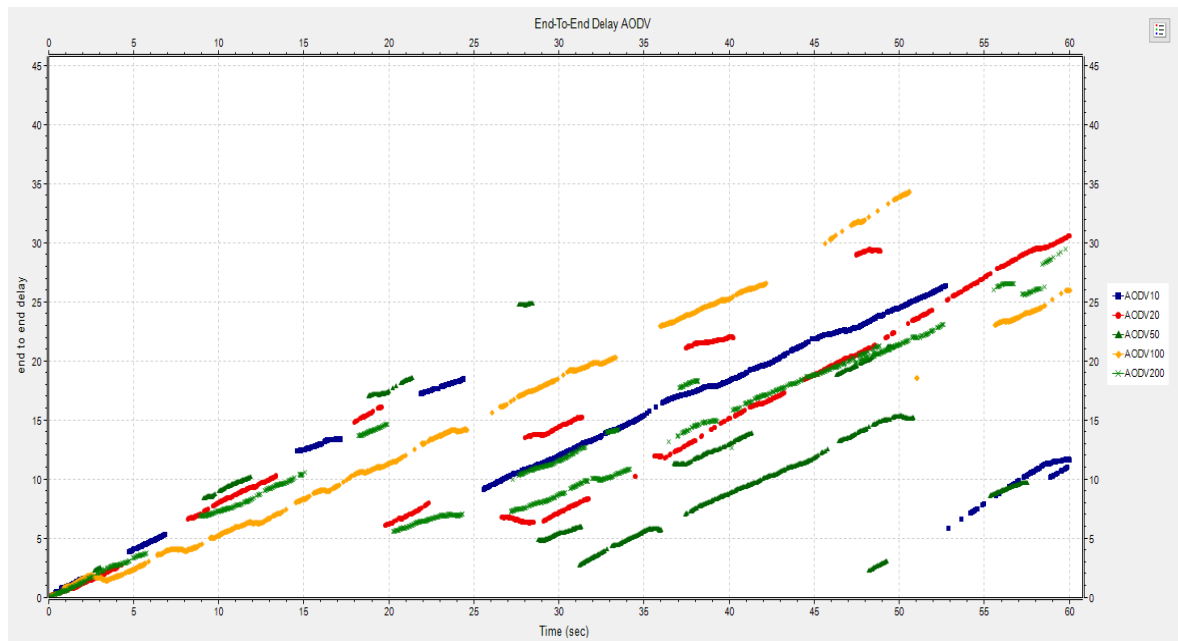


Εικόνα 32 - Κατανάλωση ενέργειας στον AODV για όλους τους κόμβους



Εικόνα 33 - Υπολειπόμενη ενέργεια στον AODV για τους διάφορους κόμβους

### 5.3.4. Delay



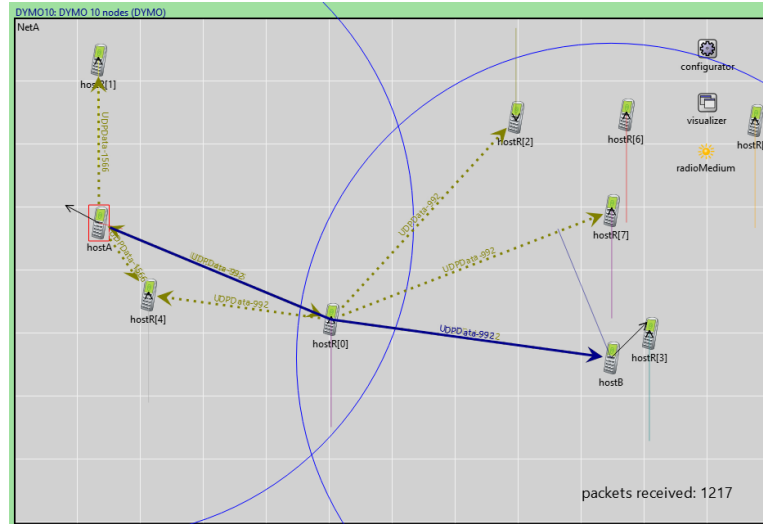
Εικόνα 34 - Delay του AODV για τους διάφορους κόμβους

Αρχικά και όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 28), το μεγαλύτερο throughput, κατά το μεγαλύτερο μέρος της προσομοίωσης, το διαθέτει το δίκτυο το οποίο αποτελείται από 100 κόμβους, ενώ η μεγαλύτερη αποστολή πακέτων γίνεται στο δίκτυο με τους περισσότερους κόμβους. Επιπρόσθετα, η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργεια συμβαίνει στο δίκτυο με τους λιγότερους κόμβους και αυτό γίνεται διότι παράγονται πολύ περισσότερα μηνύματα σε σχέση με τις άλλες προσομοιώσεις. Τέλος γίνεται αντιληπτό ότι την μεγαλύτερη καθυστέρηση την έχει το σύστημα που απαρτίζεται από εκατό (100) κόμβους συστήματος.

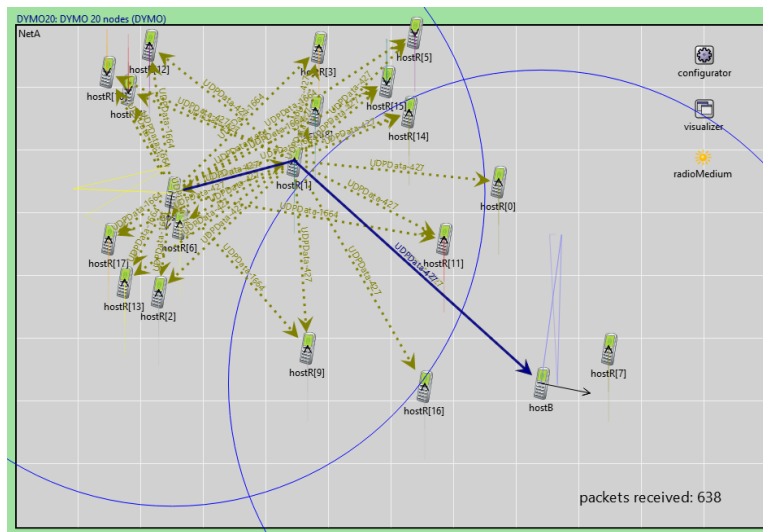
Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται ανάλογα με τα τοπολογικά χαρακτηριστικά των κόμβων του εκάστοτε δικτύου.

## 5.4. DYMO

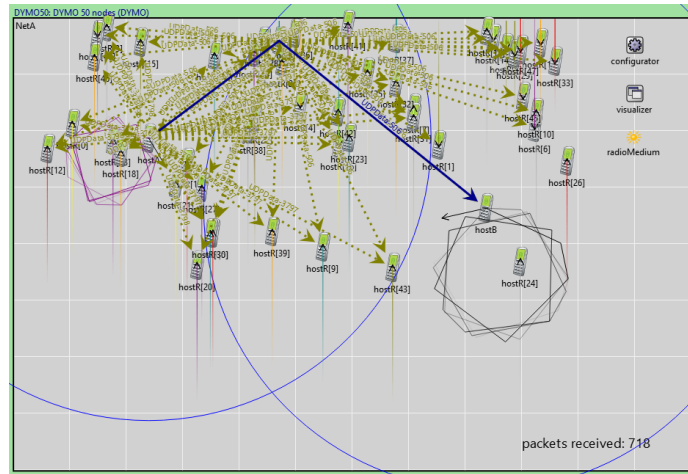
Παρακάτω φαίνονται ορισμένα τυχαία στιγμιότυπα της προσομοίωσης αυτής:



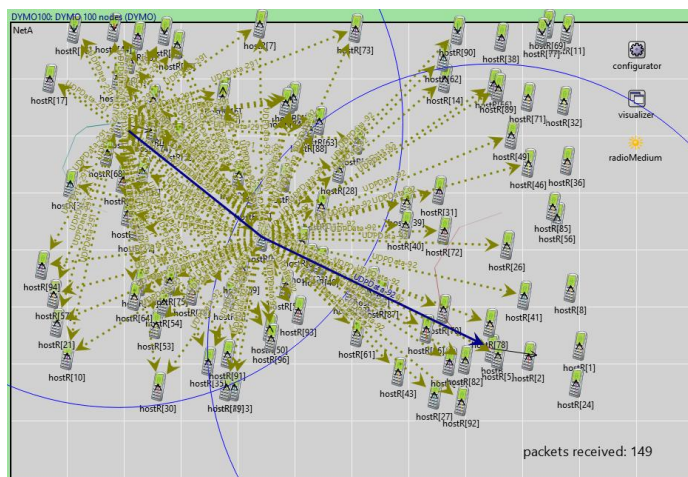
Εικόνα 35 - Στιγμιότυπο εκτέλεσης του DYMO για 10 κόμβου



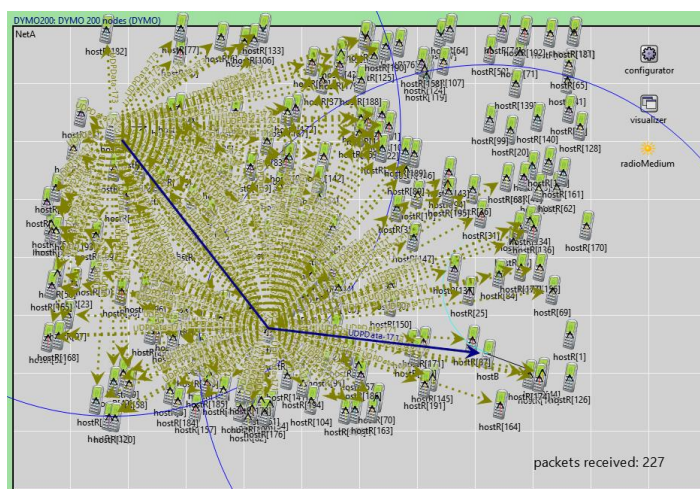
Εικόνα 36 - Στιγμιότυπο εκτέλεσης του DYMO για 20 κόμβους



Εικόνα 37 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DYMO για 50 κόμβους

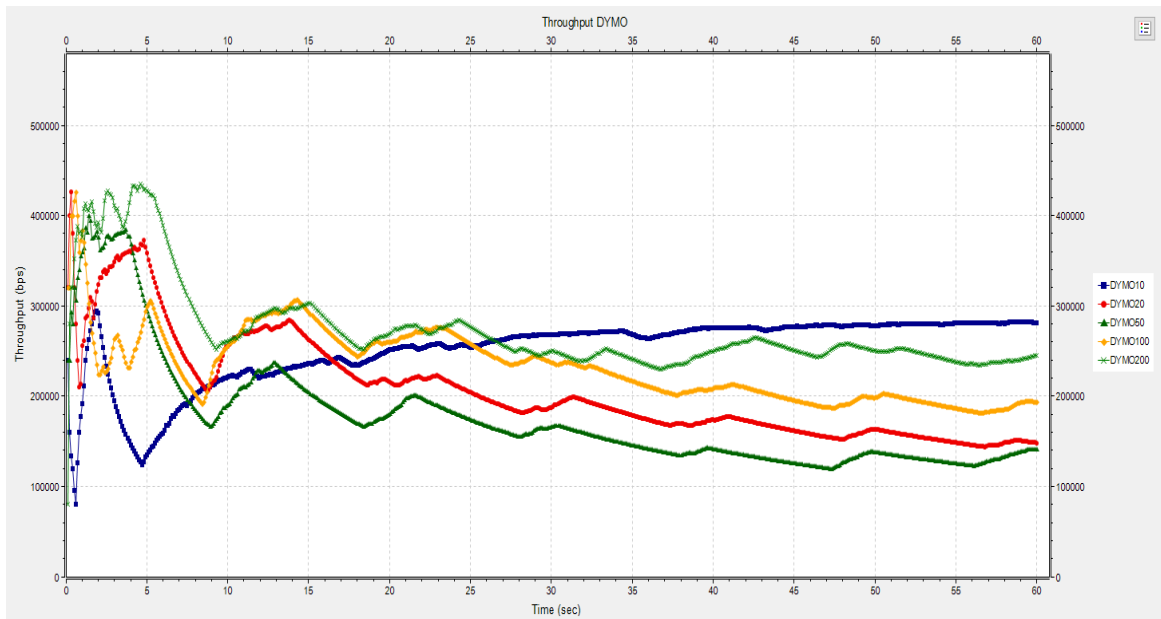


Εικόνα 38 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DYMO για 100 κόμβους



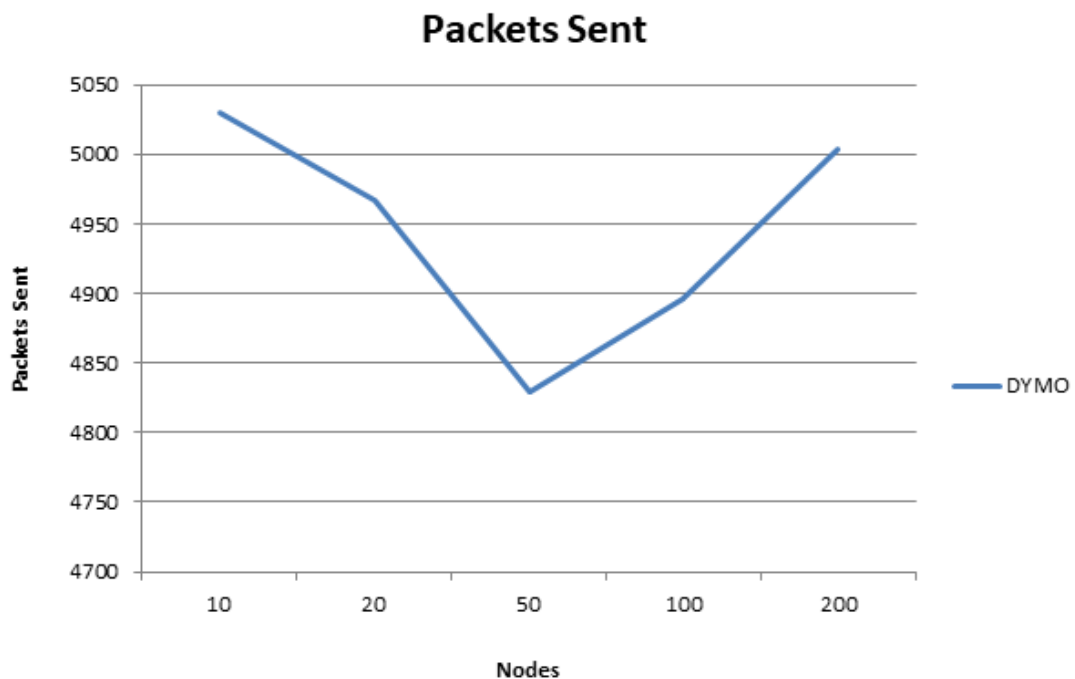
Εικόνα 39 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DYMO για 200 κόμβους

### 5.4.1. Throughput



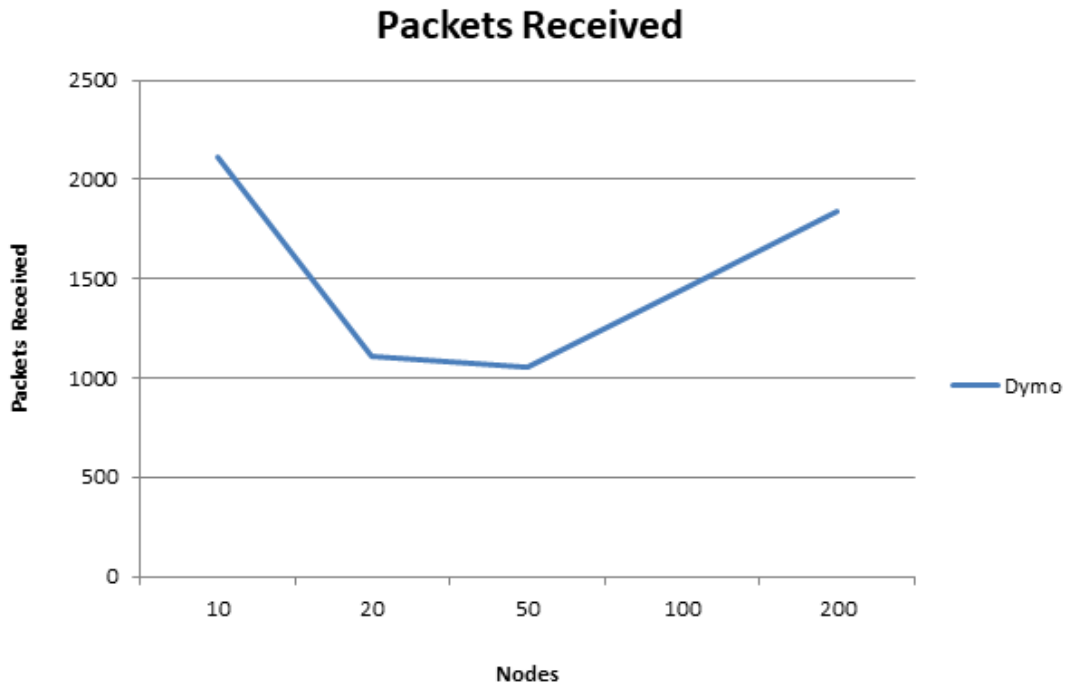
Εικόνα 40 - Γραφική αναπαράσταση του Throughput για τον αλγόριθμο DYMO των προσομοιώσεων για 10, 20, 50, 100, 200 κόμβους

### 5.4.2. Packets



Εικόνα 41 - Packet Sent του DYMO σε συνάρτηση με τους κόμβους



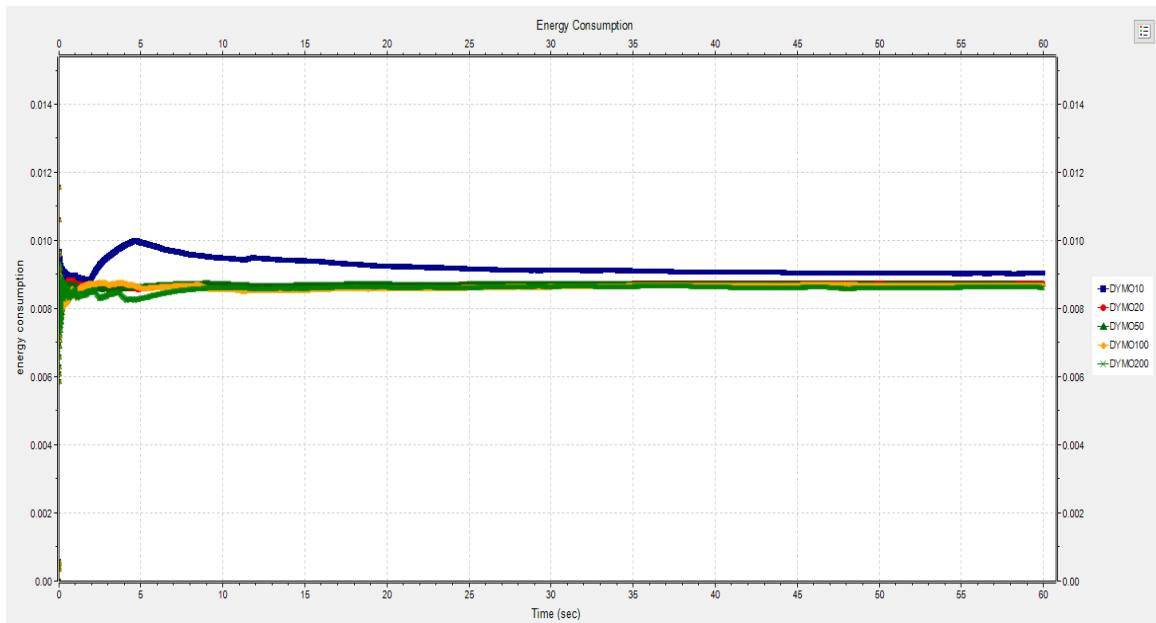


Εικόνα 42 - Packets received για τον DYMO σε συνάρτηση με τους κόμβους

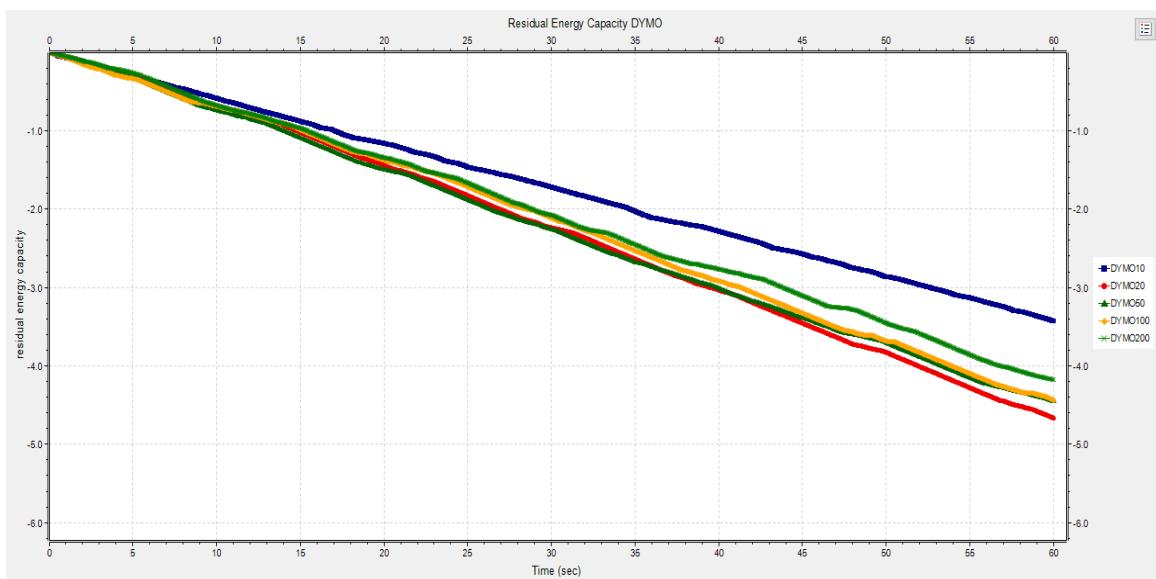


Εικόνα 43 - Packet error rate για τον DYMO αλγόριθμο

### 5.4.3. Κατανάλωση

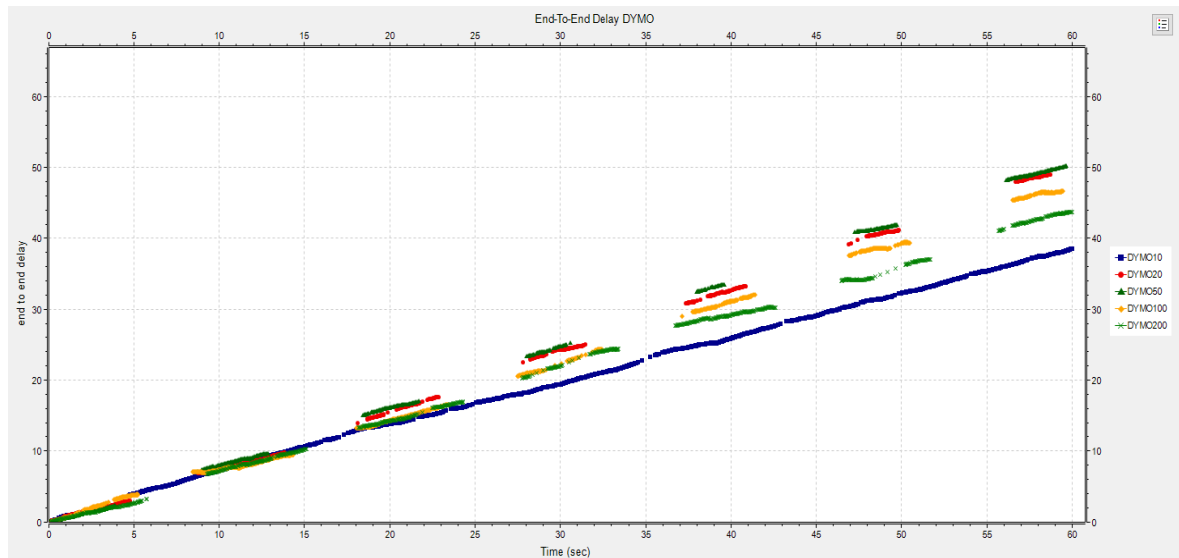


Εικόνα 44 - Κατανάλωση ενέργειας στον DYMO για όλους τους κόμβους



Εικόνα 45 - Υπολειπόμενη ενέργεια στον DYMO για τους διάφορους κόμβους

#### 5.4.4. Delay

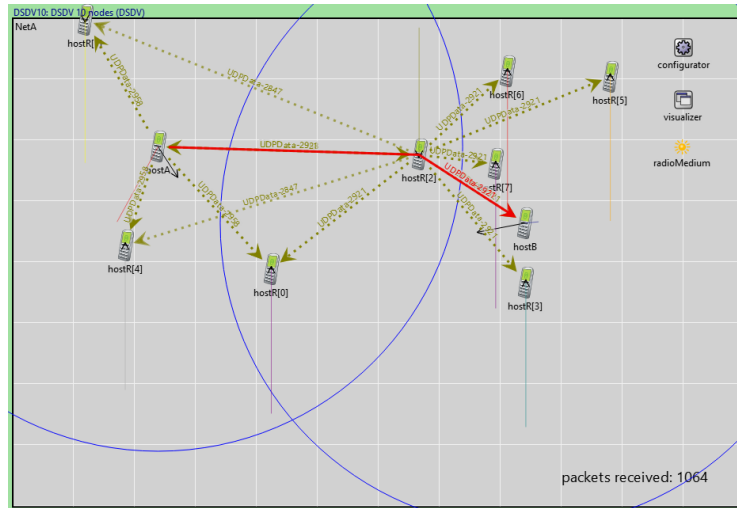


Εικόνα 46 - Delay του DYMO για τους διάφορους κόμβους

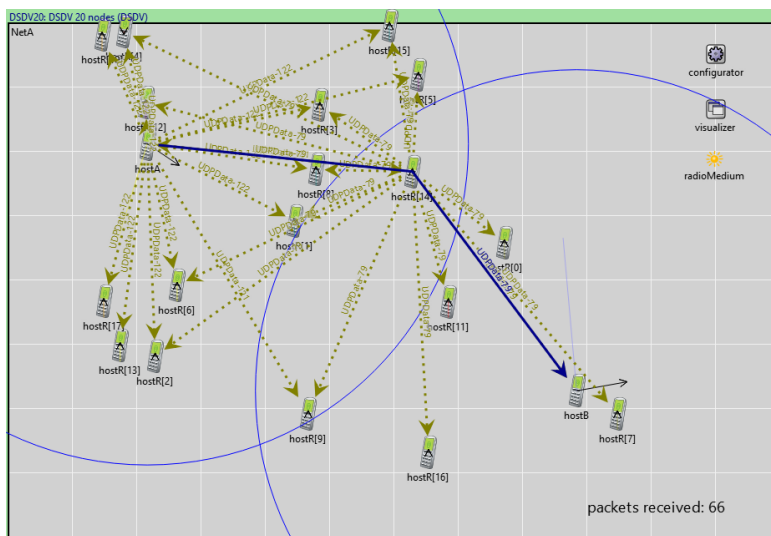
Για τον παραπάνω αλγόριθμό εξάγονται τα εξής συμπεράσματα με βάση τα γραφήματα. Αρχικά, παρατηρείται ότι τα περισσότερα πακέτα που παράγονται κατά την διαδικασία εκτέλεσης του DYMO αλγόριθμου είναι στην πειραματική διαδικασία με τους 10 κόμβους δικτύου και αντίστοιχα παραλαμβάνονται και τα περισσότερα πακέτα στην ίδια πειραματική διαδικασία. Όσο αφορά στην κατανάλωση ενέργειας του συστήματος, γίνεται αντιληπτό πως πάλι η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας συντελείται στην εκτέλεση του DYMO για 10 κόμβους δικτύου. Την μεγαλύτερη καθυστέρηση την έχει το δίκτυο με τους 50 κόμβους. Τέλος, το μεγαλύτερο throughput το διαθέτει η εκτέλεση του αλγορίθμου για 100 κόμβους στα πρώτα 30 δευτερόλεπτα, ενώ στο υπόλοιπο μισό το μεγαλύτερο throughput το διαθέτει η προσομοίωση με τους 10 κόμβους συστήματος.

## 4.5 DSDV

Παρακάτω φαίνονται τυχαία στιγμιότυπα της προσομοίωσης αυτής:



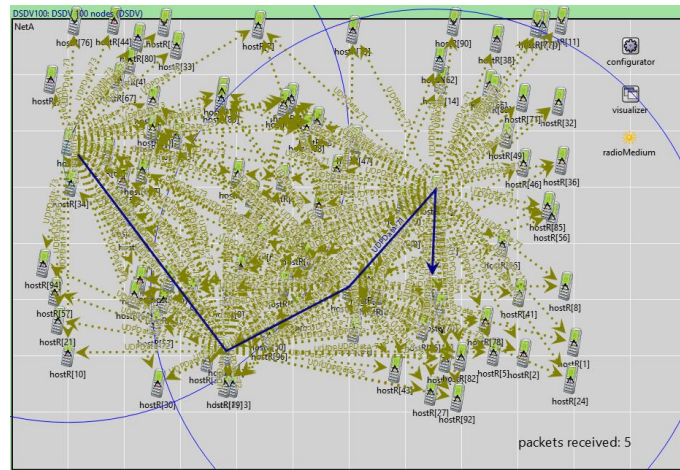
Εικόνα 47 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 10 κόμβους



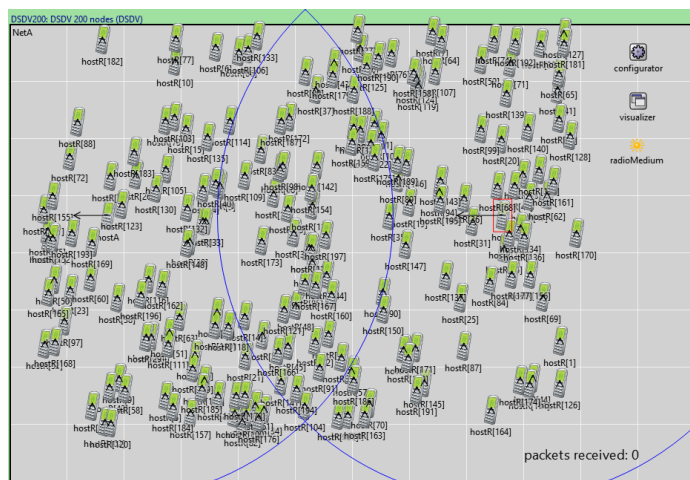
Εικόνα 48 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 20 κόμβους



Εικόνα 49 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 50 κόμβους

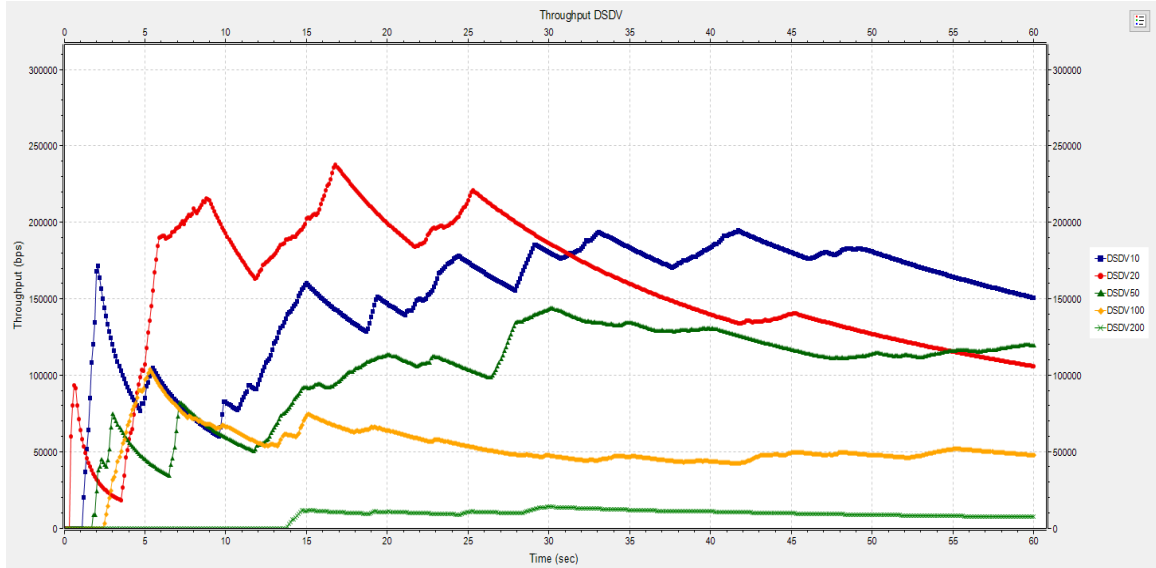


Εικόνα 50 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 100 κόμβους



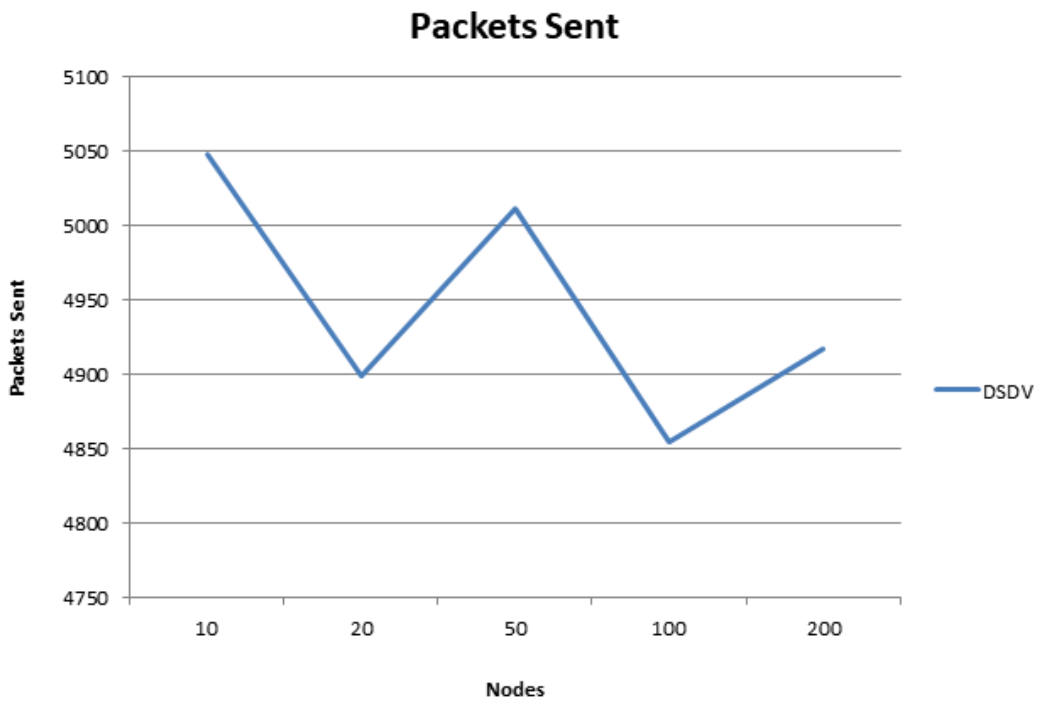
Εικόνα 51 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του DSDV για 200 κόμβους

### 4.5.1 Throughput

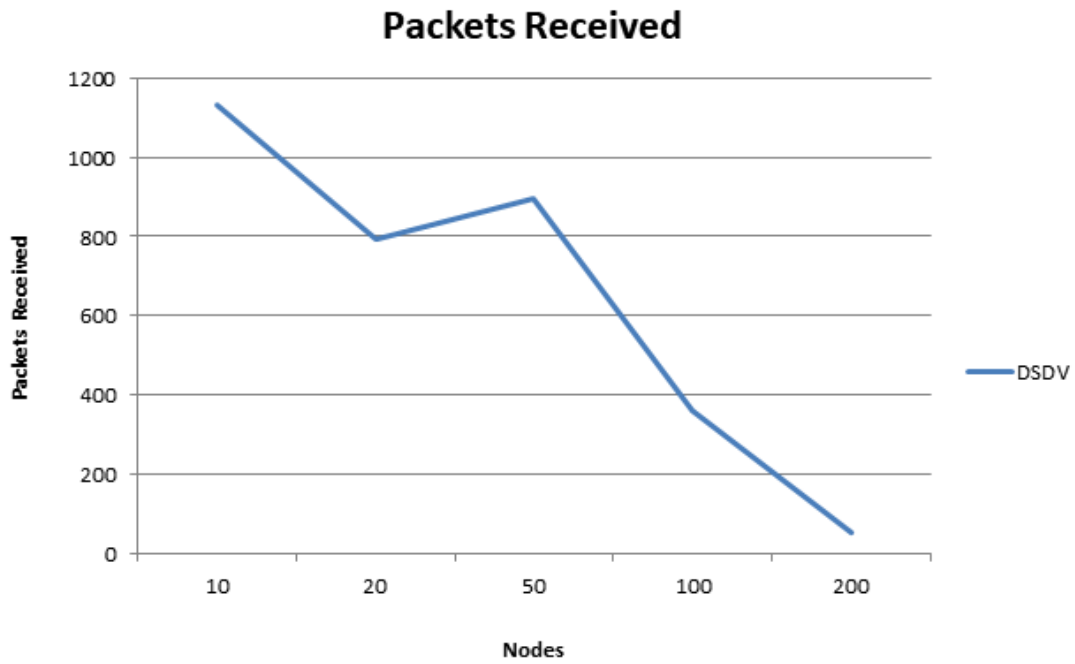


Εικόνα 52 - Γραφική αναπαράσταση του Throughput για τον αλγόριθμο DSDV των προσομοιώσεων για 10, 20, 50, 100, 200 κόμβους

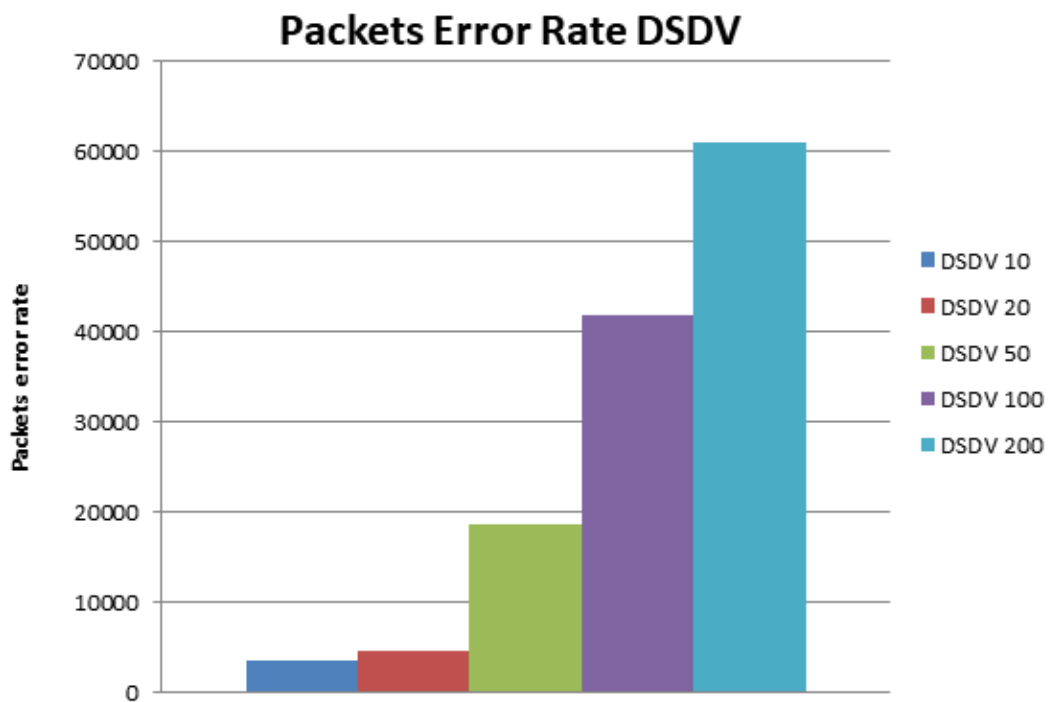
### 4.5.2 Packets



Εικόνα 53 - Packets sent για τον DSDV σε συνάρτηση με τους κόμβους

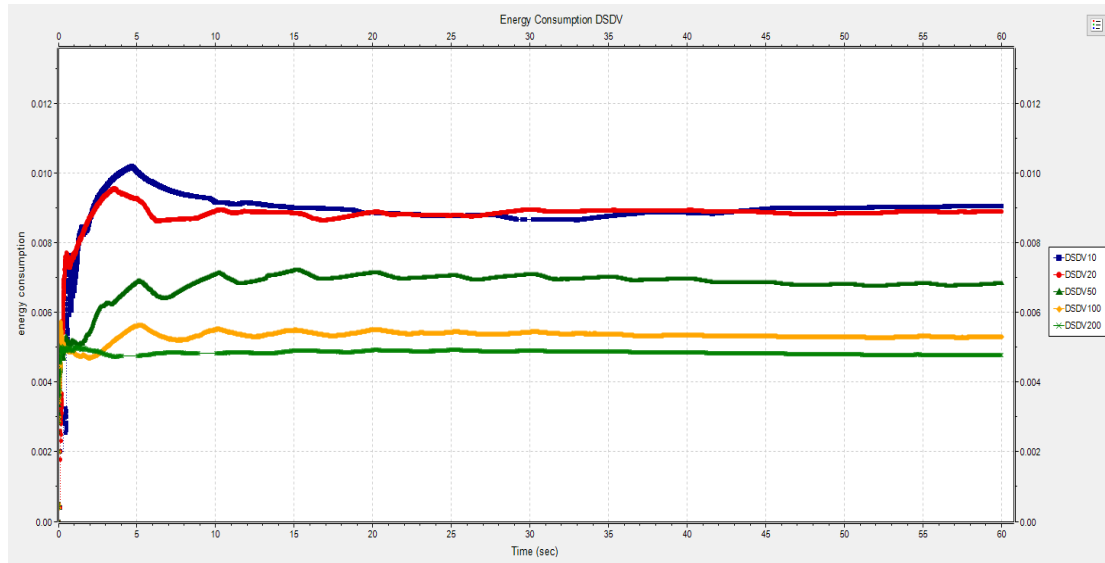


Εικόνα 54 - Packets received για τον DSDV σε συνάρτηση με τους κόμβους

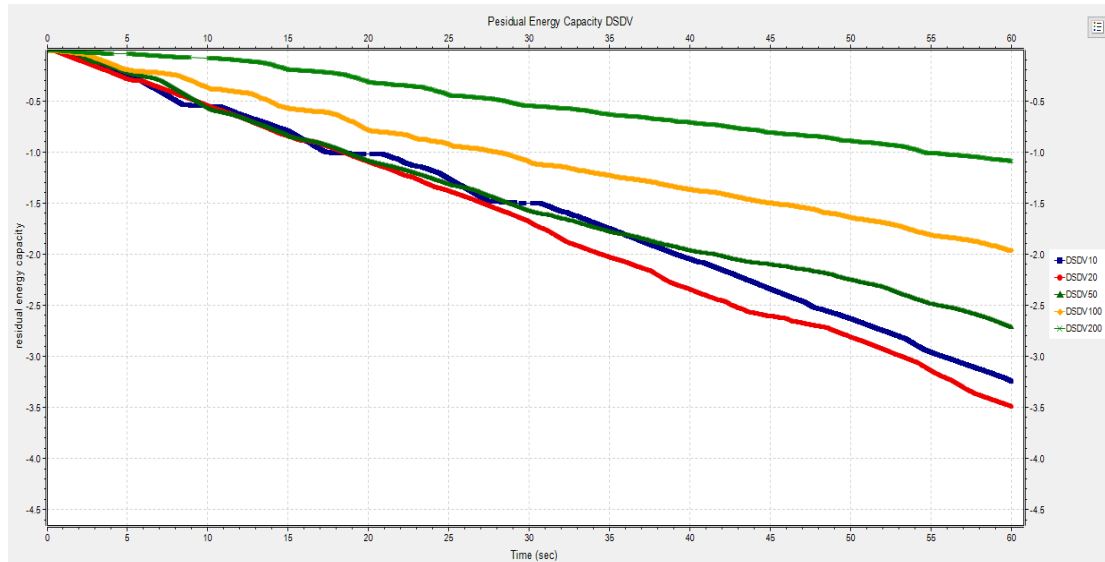


Εικόνα 55 - Packets error rate για τον DSDV αλγόριθμο

### 4.5.3 Κατανάλωση



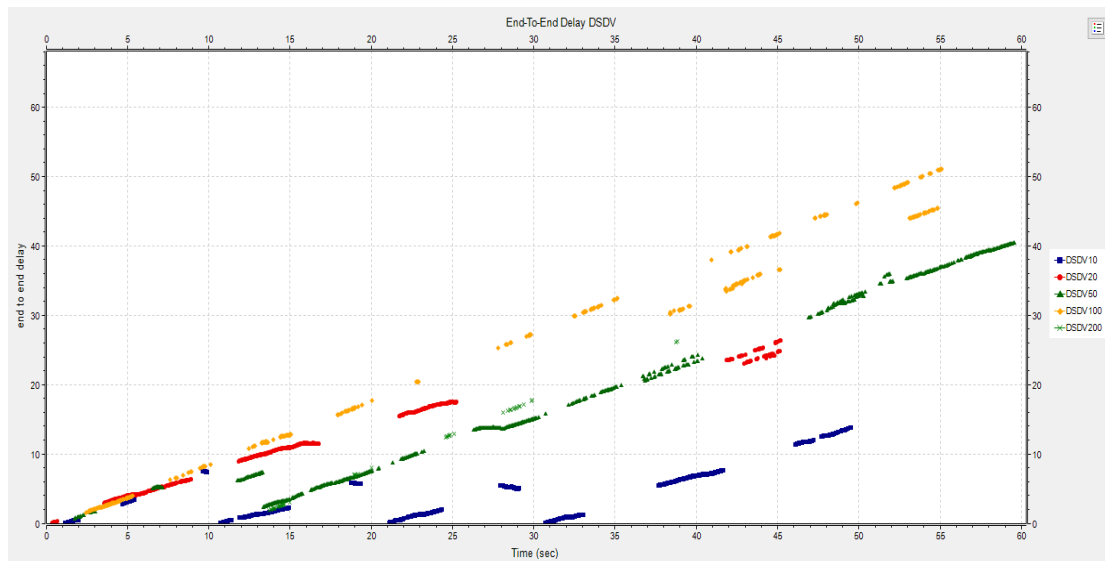
Εικόνα 56 - Κατανάλωση ενέργειας στον DSDV για όλους τους κόμβους



Εικόνα 57 - Υπολειπόμενη ενέργεια στον DSDV για όλους τους κόμβους



#### 4.5.4 Delay

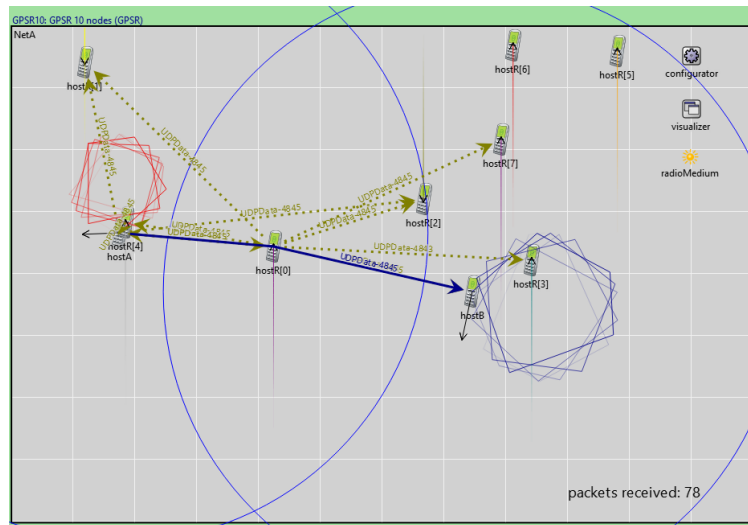


Εικόνα 58 - Delay του DSDV για τους διάφορους κόμβους

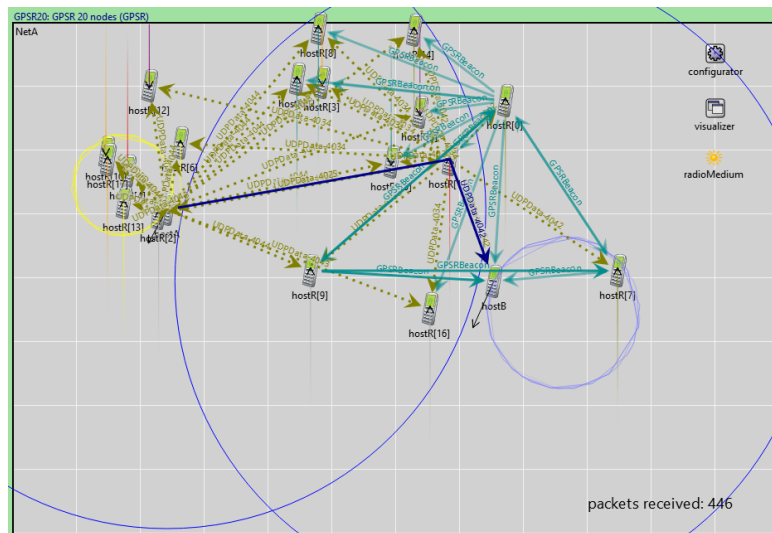
Για τον συγκεκριμένο αλγόριθμο μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα σύμφωνα με τα διαγράμματα που ελήφθησαν παραπάνω. Το συνολικό throughput υπερτερεί στα δίκτυα με μικρό αριθμό κόμβων σε αντίθεση με τα μεγάλα δίκτυα πολλών κόμβων. Επιπλέον, η μεγαλύτερη αποστολή και λήψη πακέτων γίνεται και πάλι στα μικρά δίκτυα λίγων κόμβων (10, 20 κόμβοι), ενώ η καθυστέρηση του δικτύου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη στο δίκτυο με τους 100 κόμβους συστήματος. Τέλος όσο αναφορά στην κατανάλωση ενέργειας, παρατηρείται ότι υπάρχει διαφορά στην καταναλισκόμενη ενέργεια στα μικρότερα δίκτυα το οποίο είναι λογικό λόγω της μεγάλης παραγωγής και λήψης μηνυμάτων από τους κόμβους.

## 4.6 GPSR

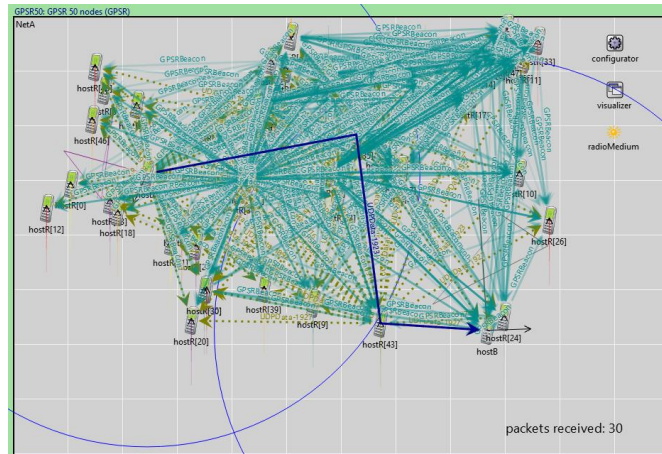
Παρακάτω φαίνονται ορισμένα τυχαία στιγμιότυπα της προσομοίωσης αυτής:



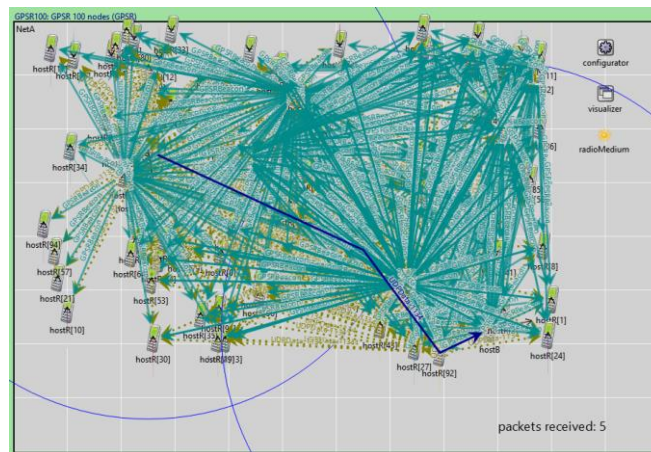
Εικόνα 59 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSR για 10 κόμβους



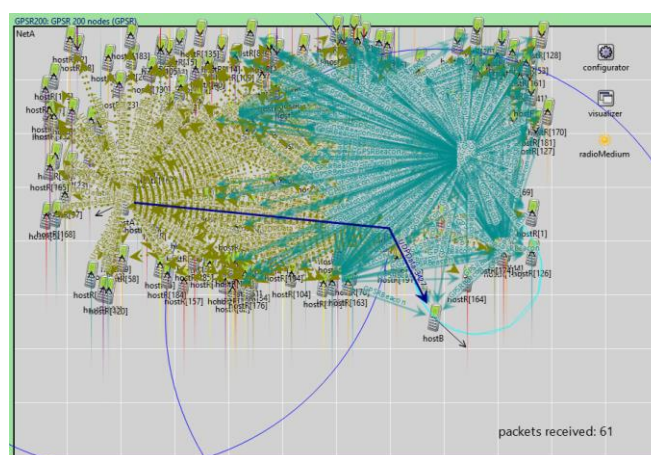
Εικόνα 60 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSR για 20 κόμβους



Εικόνα 61 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSSR για 50 κόμβους

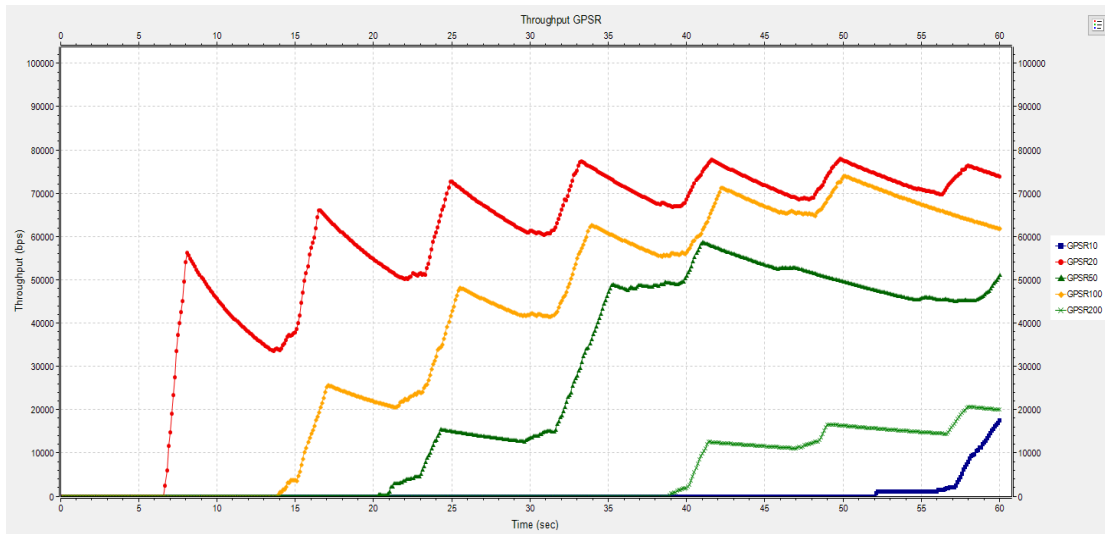


Εικόνα 62 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSSR για 100 κόμβους



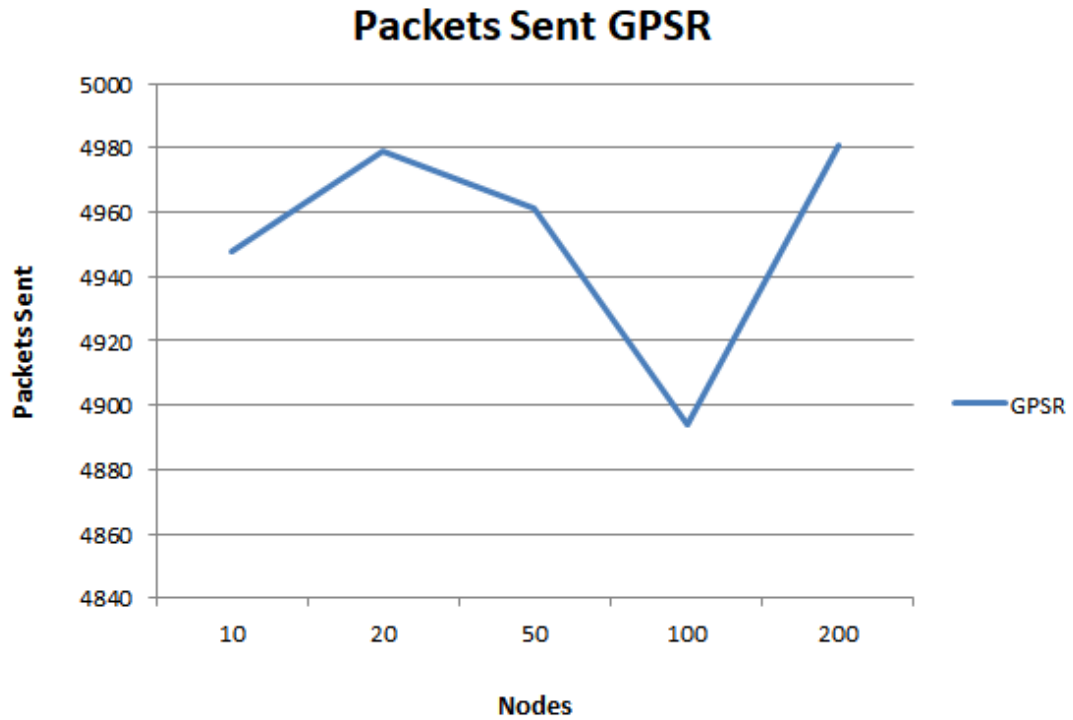
Εικόνα 63 - Στιγμιότυπο της εκτέλεσης του GPSSR για 200 κόμβους

### 4.6.1 Throughput

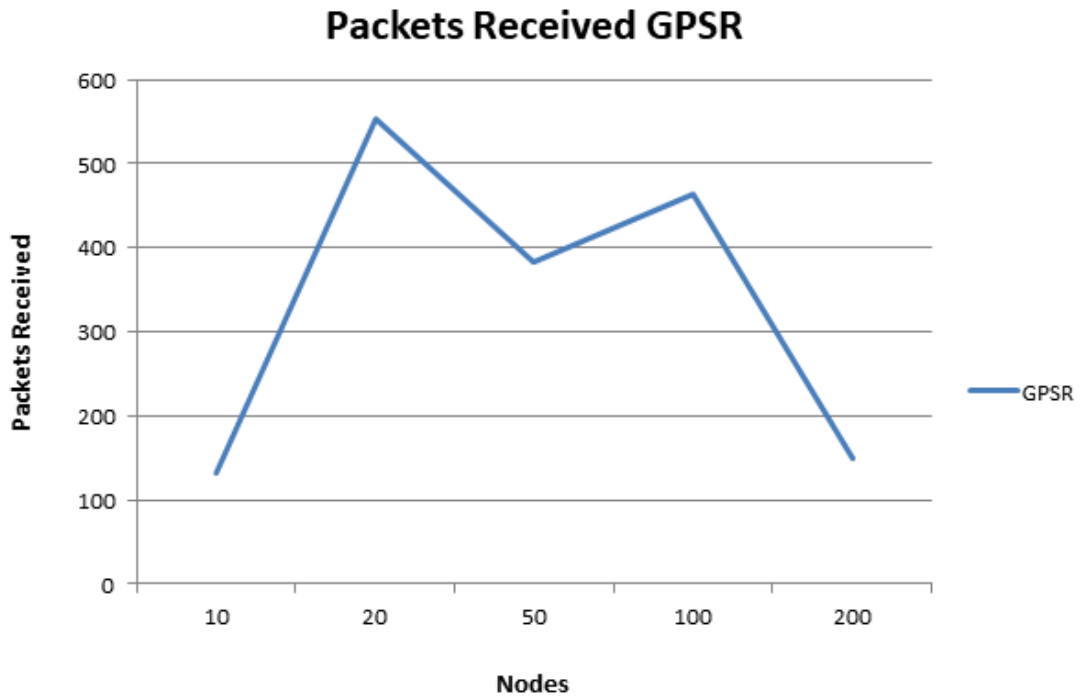


Εικόνα 64 - Γραφική αναπαράσταση του Throughput για τον αλγόριθμο GPSR των προσομοιώσεων για 10, 20, 50, 100, 200 κόμβους

### 4.6.2 Packets



Εικόνα 65 - Packets sent για τον GPSR σε συνάρτηση με τους κόμβους

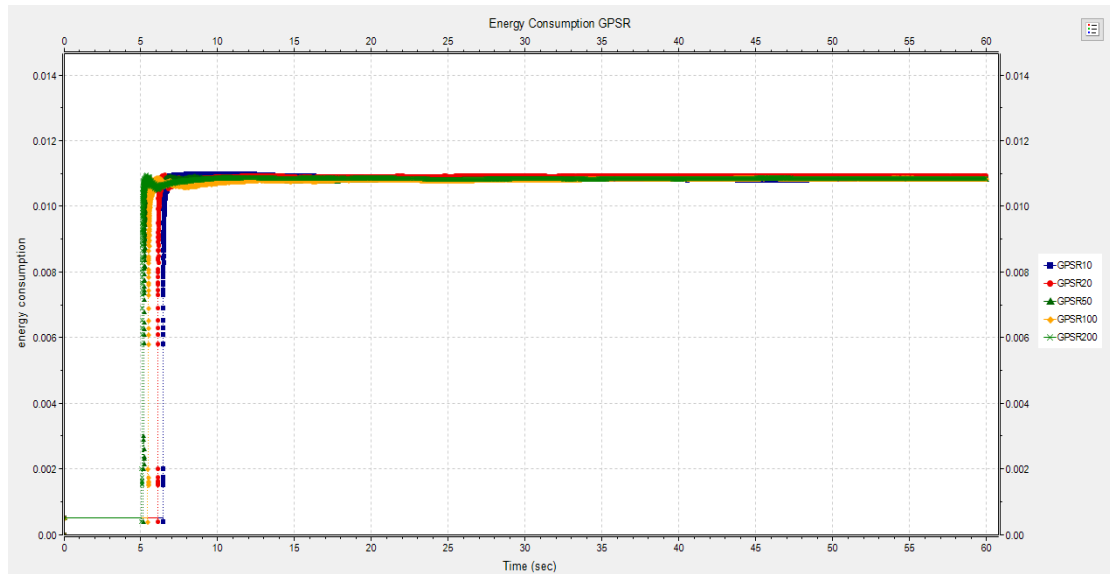


Εικόνα 66 - Packets received για τον GPSR σε συνάρτηση με τους κόμβους

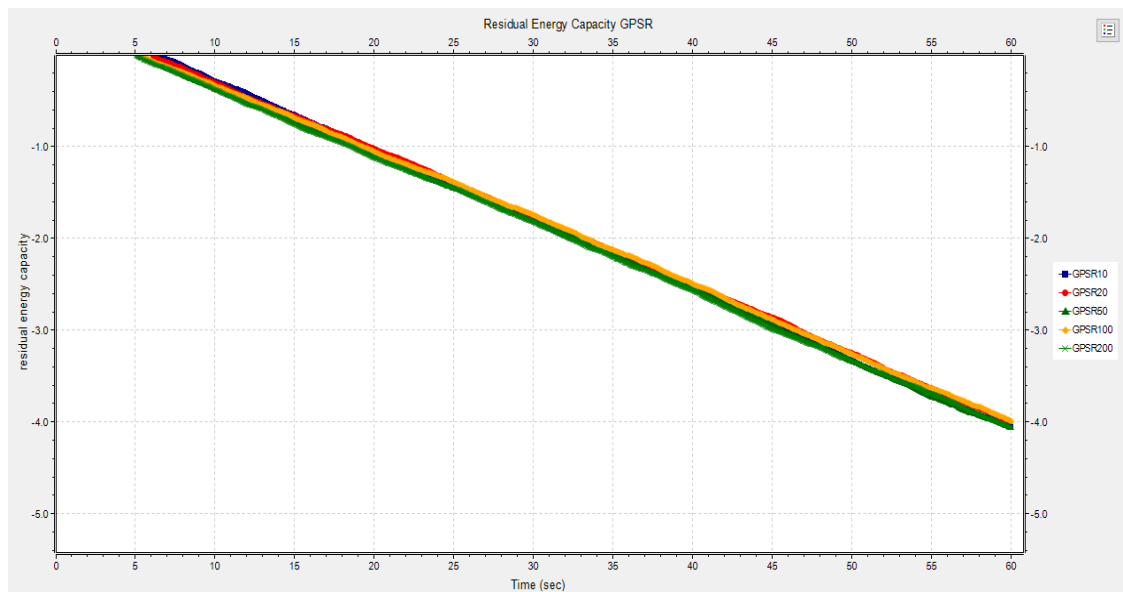


Εικόνα 67 - Packet error rate για τον GPSR αλγόριθμο

### 4.6.3 Κατανάλωση

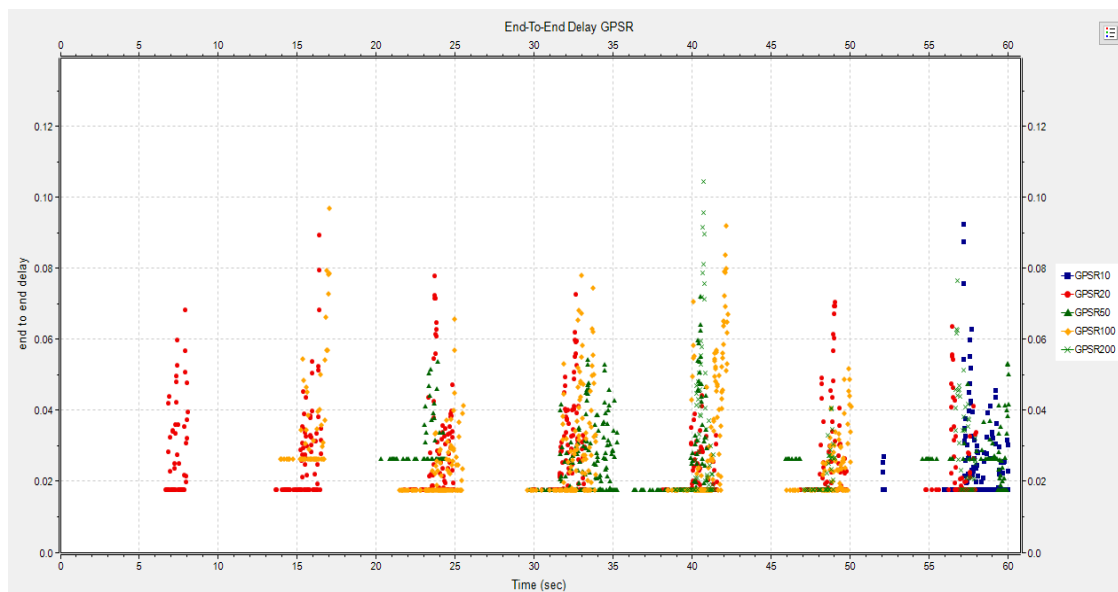


Εικόνα 68 - Κατανάλωση ενέργειας στον GPSR για όλους τους κόμβους



Εικόνα 69 - Υπολειπόμενη ενέργεια στον GPSR για όλους τους κόμβους

#### 4.6.4 Delay



Εικόνα 70 - Delay του GPSR για τους διάφορους κόμβους

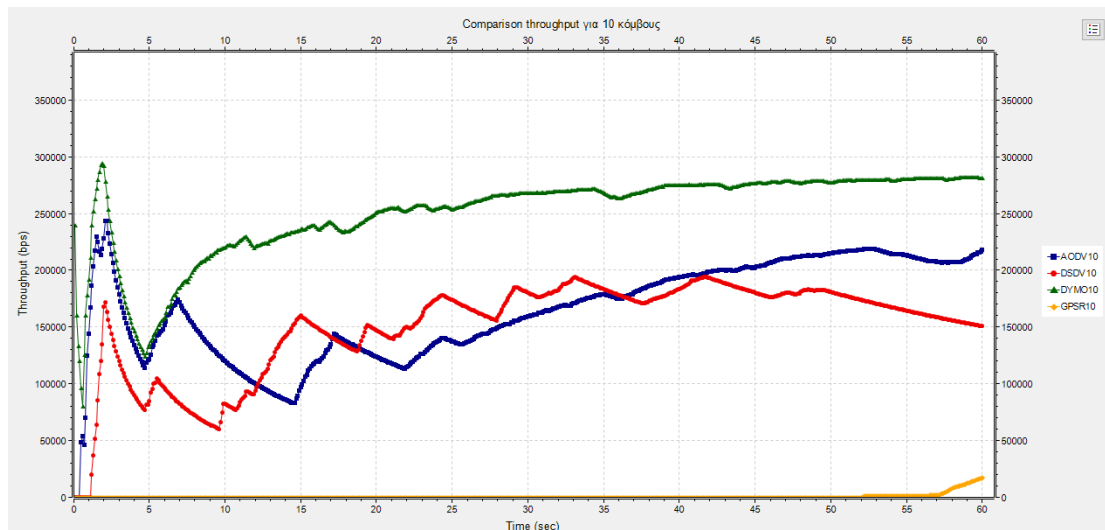
Σε αυτό το σημείο για τον σχολιασμό του GPSR αλγόριθμου παρατηρείται ότι η κατανάλωση της ενέργειας κατά την διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης παραμένει σχετικά σταθερή ανεξάρτητα από το πλήθος των κόμβων του δικτύου. Ακόμη, όσο αφορά στα πακέτα που στέλνονται γίνεται διακριτό ότι και εδώ υπάρχει μια σχετική σταθερότητα σε αντίθεση όμως με τα πακέτα που λαμβάνονται καθώς εκεί παρατηρείται ότι οι πιο αποδοτικές τιμές βρίσκονται στα μικρομεσαία δίκτυα. Τέλος το throughput του GPSR αλγόριθμου, έχει τις καλύτερες τιμές του για το δίκτυο των 20 κόμβων, όπου γίνεται και η μεγαλύτερη λήψη πακέτων

## 4.7 Σύγκριση AODV, DYMO, DSDV, GPSR

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων για τους αλγόριθμους AODV, DYMO, DSDV και GPSR που έχουν υλοποιηθεί για το δίκτυο με την χρήση 10, 20, 50, 100 και 200 κόμβων αντίστοιχα, προκειμένου να διαπιστωθούν οι διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων και της αποδοτικότητάς τους. Η σύγκριση των αλγορίθμων θα γίνει τους 10, 50 και 200 κόμβους δικτύου και για τις τιμές του συνολικού throughput, των πακέτων που παραλήφθηκαν επιτυχώς από τον κόμβο στόχο, των πακέτων που στάλθηκαν από τον πατρικό κόμβο καθώς και την συνολική κατανάλωση του κάθε αλγορίθμου.

A) Για τους 10 κόμβους στο δίκτυο :

### 1. Throughput :

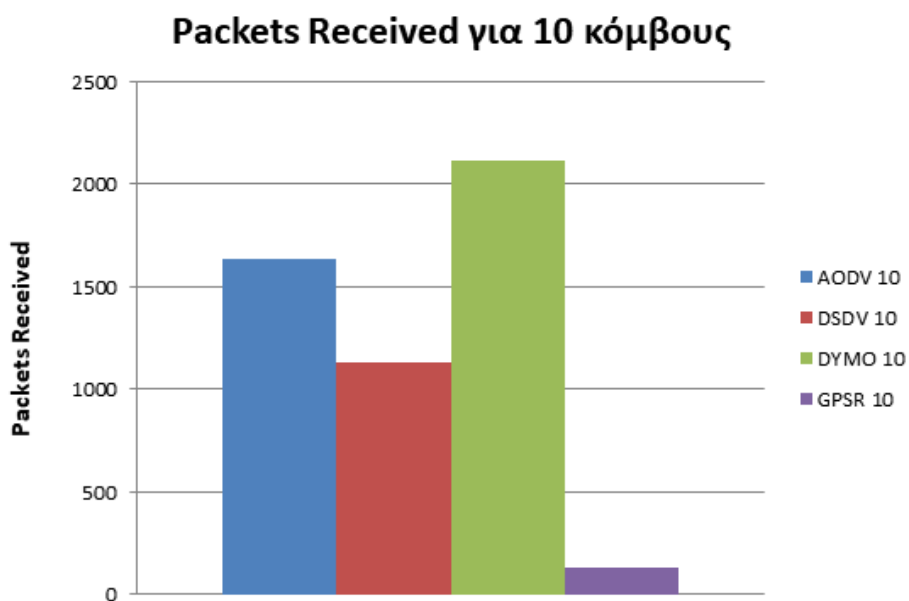


Εικόνα 71 - Σύγκριση του συνολικού throughput για 10 κόμβους όλων των αλγορίθμων

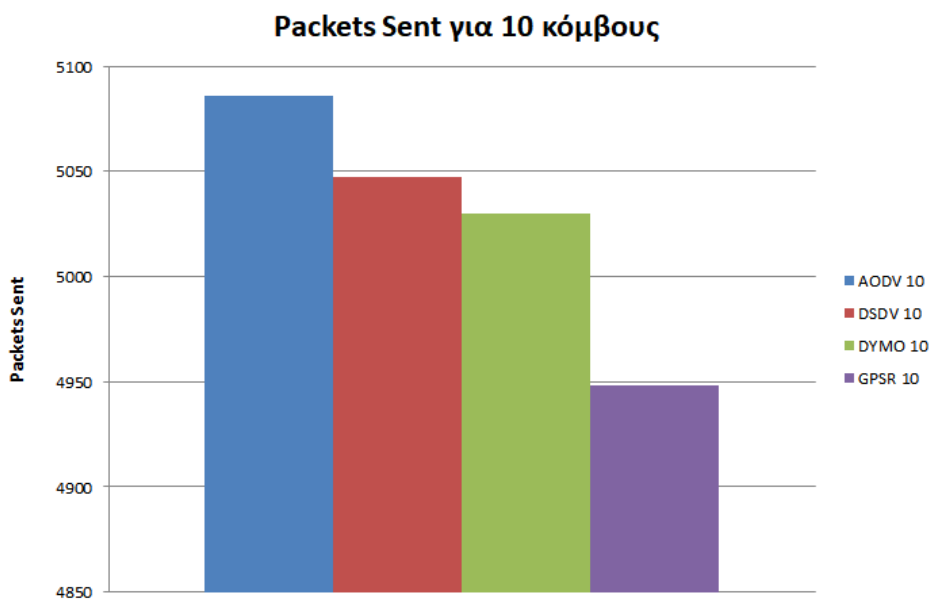
Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 71), γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το μεγαλύτερο throughput το έχει ο DYMO αλγόριθμος κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και αυτό συμβαίνει διότι ο αριθμός των παραγόμενων μηνυμάτων τα οποία φτάνουν στον κόμβο στόχο είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τους άλλους αλγορίθμους. Ο GPSR διαθέτει το μικρότερο throughput συγκριτικά με τους υπόλοιπους. Ο αλγόριθμος AODV, διαθέτει το αμέσως καλύτερο throughput μετά τον DYMO.



## 2. Packet:



Εικόνα 72 - Σύγκριση των πακέτων που παραλήφθηκαν για 10 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων

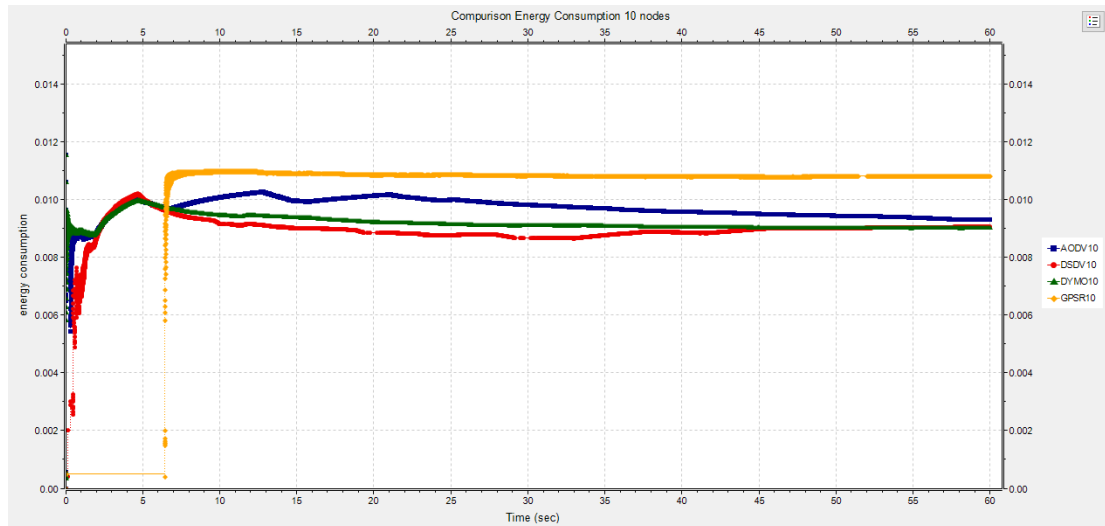


Εικόνα 73 - Σύγκριση των πακέτων που στάλθηκαν για 10 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων

Όπως παρατηρείται και από την παραπάνω εικόνα (εικόνα 72), ο πιο αποδοτικός αλγόριθμος όσο αναφορά στην παραλαβή των πακέτων από τον κόμβο στόχο του συστήματος είναι ο αλγόριθμος DYMO, ακολουθεί ο AODV, έπειτα ο DSDV και τέλος ο GPSR με μόλις 131 πακέτα να καταφέρνουν να φτάνουν τελικά στον

προορισμό τους, ενώ οι τιμές των πακέτων που στάλθηκαν κυμαίνονται περίπου στα ίδια νούμερα με ένα μικρό προβάδισμα του AODV αλγορίθμου.

### 3. Κατανάλωση ενέργειας :



Εικόνα 74 – Σύγκριση την κατανάλωσης ενέργειας όλων των αλγορίθμων για 10 κόμβους

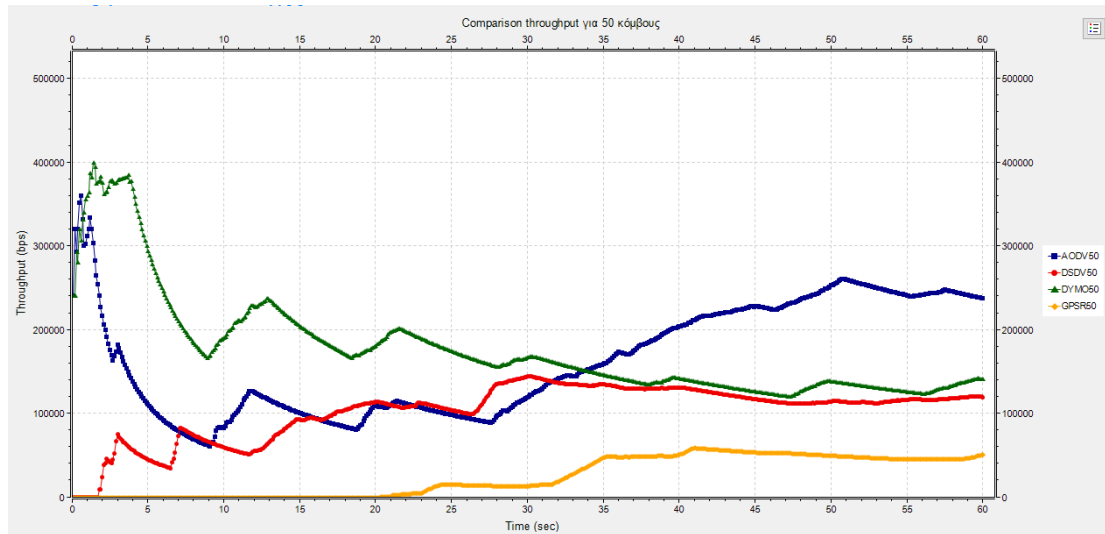
Σε αυτό το σημείο (Εικόνα 74), παρατηρείται ότι την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας την διαθέτει ο GPSR αλγόριθμος ενώ οι υπόλοιπες καταναλώσεις των άλλων αλγορίθμων είναι περίπου ίσες με αμέσως επόμενη μεγαλύτερη εκείνη του AODV και εμφανώς καλύτερη εκείνη του DSDV αλγορίθμου.

	AODV 10 nodes	DSDV 10 nodes	DYMO 10 nodes	GPSR 10 nodes
Throughput	Medium (μεσαίο)	Highest (μεγάλο)	Medium (μεσαίο)	Lowest (μικρό)
Packet Received	1634	2112	1130	131
Energy Consumption	Medium (μεσαίο)	Lowest (χαμηλότερη)	Medium (μεσαίο)	Highest (μεγαλύτερη)

Πίνακας 1 - Πίνακας συγκρίσεων AODV, DYMO, DSDV, GPSR για 10 κόμβους

B) Για τους 50 κόμβους στο δίκτυο :

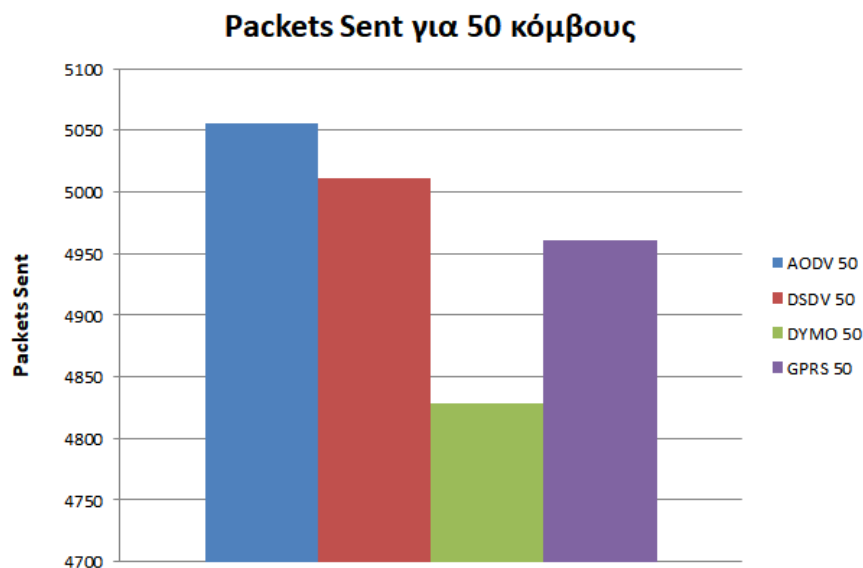
### 1. Throughput:



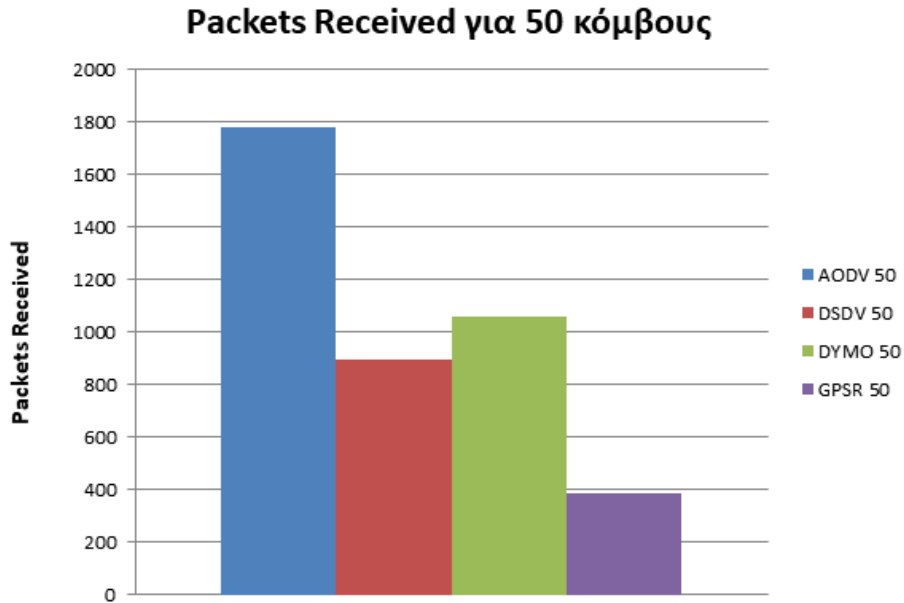
Εικόνα 75 - Σύγκριση του συνολικού throughput για 50 κόμβους όλων των αλγορίθμων

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 75), γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το μεγαλύτερο throughput το έχει και πάλι ο DYMO αλγόριθμος για μεγάλο χρονικό διάστημα της προσομοίωσης και ο αμέσως επόμενος να είναι ο AODV αλγόριθμος. Ο αλγόριθμος GPRS διαθέτει το μικρότερο throughput συγκριτικά με τους υπόλοιπους.

### 2. Packets:



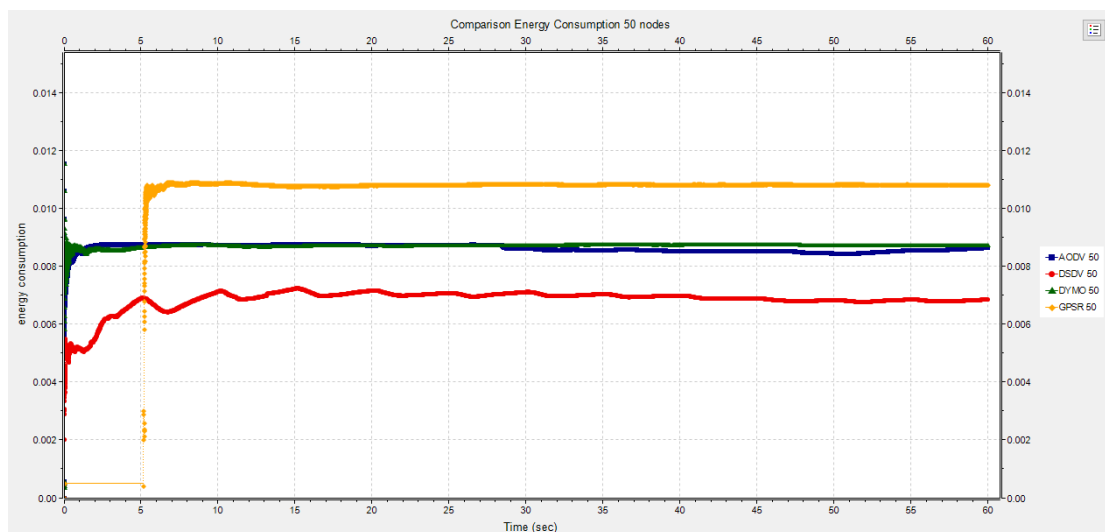
Εικόνα 76 - Σύγκριση των πακέτων που στάλθηκαν για 50 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων



Εικόνα 77 - Σύγκριση των πακέτων που παραλήφθηκαν για 50 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 77) και σε αυτή την περίπτωση, ο πιο αποδοτικός αλγόριθμος όσο αναφορά στην παραλαβή των πακέτων από τον κόμβο στόχο του συστήματος είναι ο αλγόριθμος AODV, ακολουθεί ο DYMO, έπειτα ο DSDV και τέλος ο GPSR με μόλις 1384 πακέτα να καταφέρνουν να φτάσουν τελικά στον προορισμό τους, ενώ οι τιμές των πακέτων που στάλθηκαν υποδεικνύουν την υπεροχή σε αυτή την περίπτωση του AODV με τον αμέσως επόμενο να είναι ο DSDV τελευταίος αυτή την φορά να είναι ο DYMO.

#### 4. Κατανάλωση ενέργειας



Εικόνα 78 - Σύγκριση την κατανάλωσης ενέργειας όλων των αλγορίθμων για 50 κόμβους

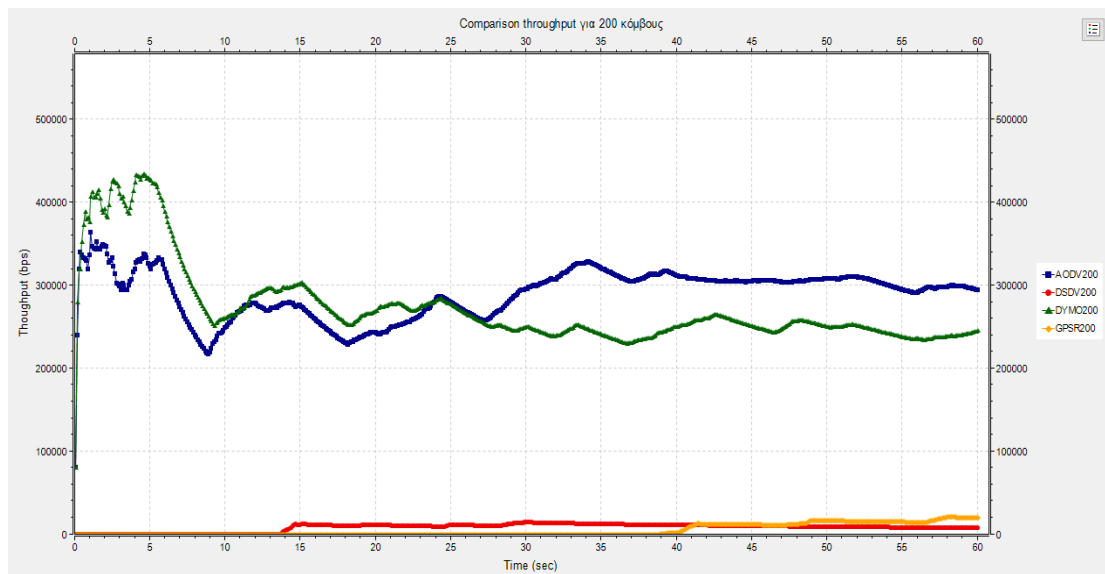
Η μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε αυτό το παράδειγμα με 50 κόμβους στο δίκτυο είναι εκείνη του DSDV αλγορίθμου με την χειρότερη κατανάλωση να την έχει για ακόμα μια φορά ο GPSR αλγόριθμος.

	AODV 50 nodes	DSDV 50 nodes	DYMO 50 nodes	GPSR 50 nodes
Throughput	Highest (μεγάλο)	Medium (μεσαίο)	Highest (μεγάλο)	Lowest (μικρό)
Packet Received	1778	895	1057	384
Energy Consumption	Medium (μεσαίο)	Lowest (χαμηλότερη)	Medium (μεσαίο)	Highest (μεγαλύτερη)

Πίνακας 2 - Πίνακας συγκρίσεων AODV, DYMO, DSDV, GPSR για 50 κόμβους

Γ) Για τους 200 κόμβους στο δίκτυο :

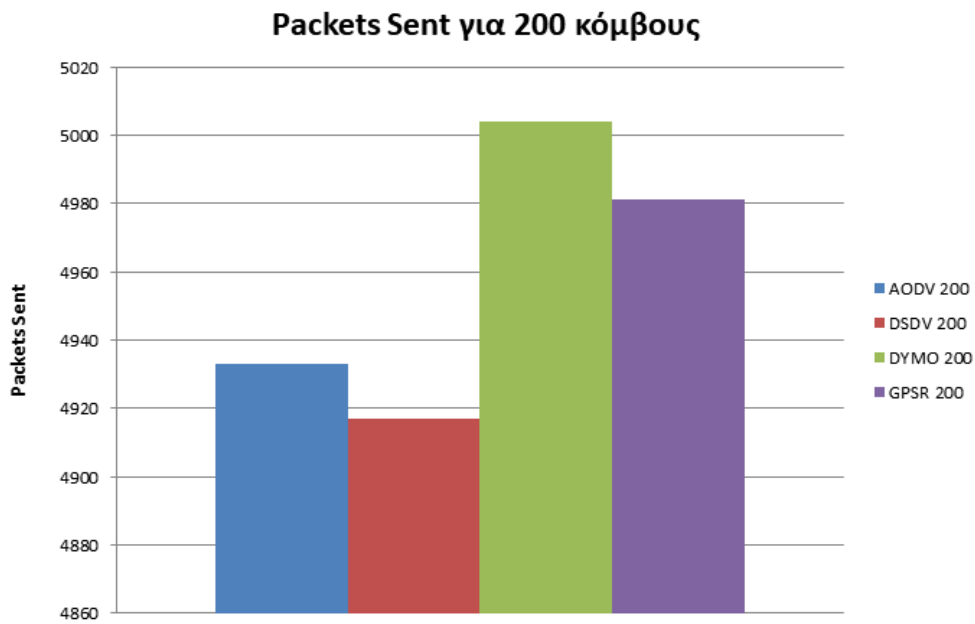
### 1. Throughput



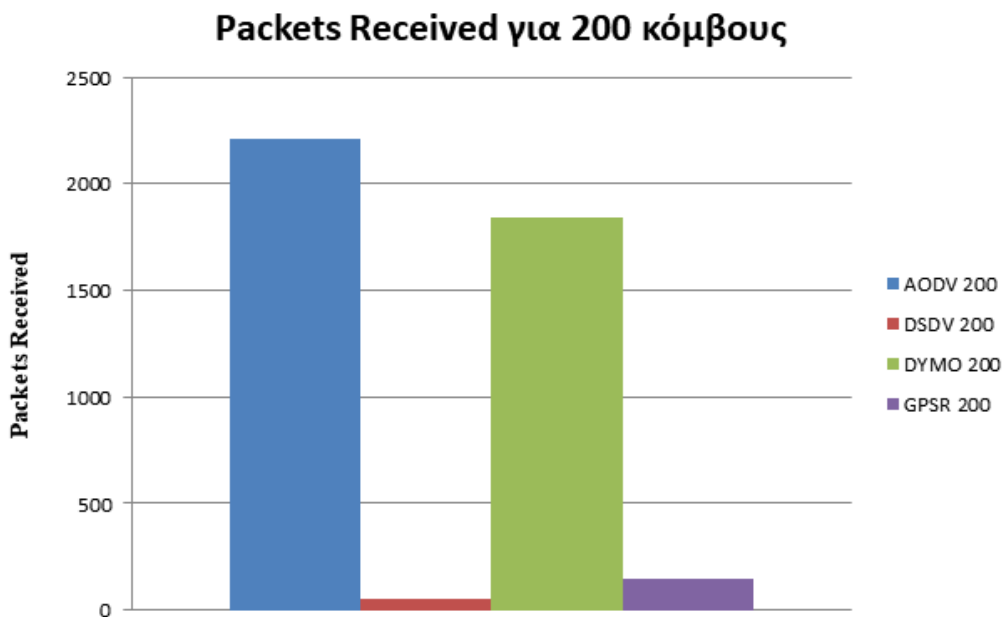
Εικόνα 79 - Σύγκριση του συνολικού throughput για 200 κόμβους όλων των αλγορίθμων

Για την παρακάτω προσομοίωση και όπως γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω εικόνα (Εικόνα 79), το καλύτερο throughput το έχουν οι αλγόριθμοι AODV και DYMO με τους DSDV και GPSR να έχουν εμφανώς πολύ χειρότερες τιμές για το throughput.

## 2. Packets



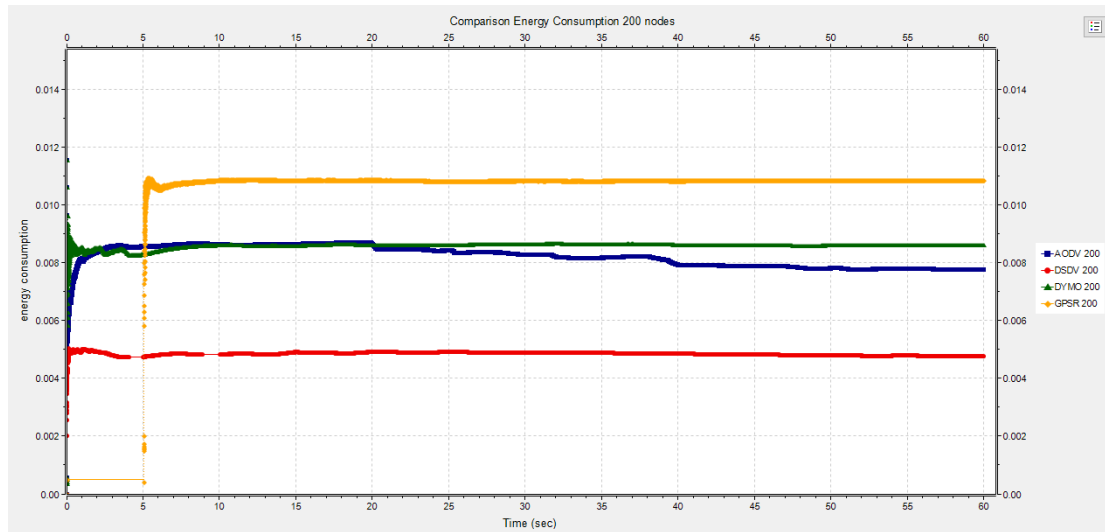
Εικόνα 80 - Σύγκριση των πακέτων που στάλθηκαν για 200 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων



Εικόνα 81 - Σύγκριση των πακέτων που παραλήφθηκαν για 200 κόμβους στο δίκτυο όλων των αλγορίθμων

Σε αυτή την προσομοίωση είναι εμφανής η μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα πακέτα που παραλήφθηκαν από τον κόμβο στόχο του συστήματος συγκριτικά με τους αλγορίθμους που εκτελέστηκαν. Ο AODV είναι ο πιο αποδοτικός όσο αφορά στα πακέτα που παραλήφθηκαν σε μεγάλα και περίπλοκα δίκτυα με τον DYMO αλγόριθμο να ακολουθεί. Τέλος τις μικρότερες τιμές σε τόσο μεγάλα δίκτυα της διαθέτει ο DSDV αλγόριθμος.

### 3. Κατανάλωση ενέργειας



Εικόνα 82 - Σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας όλων των αλγορίθμων για 200 κόμβους

Την μεγαλύτερη κατανάλωση κόμβων σε αυτή την προσομοίωση των 200 κόμβων συστήματος την διαθέτει και πάλι ο GPSR αλγόριθμος ενώ την καλύτερη την έχει ο DSDV αλγόριθμος. Οι τιμές της κατανάλωσης ενέργειας για τους AODV και DYMO είναι περίπου ίδιες.

	AODV 200 nodes	DSDV 200 nodes	DYMO 200 nodes	GPSR 200 nodes
Throughput	Highest (μεγάλο)	Lowest (μικρό)	Highest (μεγάλο)	Medium (μεσαίο)
Packet Received	2208	54	1838	150
Energy Consumption	Medium (μεσαίο)	Lowest (χαμηλότερη)	Medium (μεσαίο)	Highest (μεγαλύτερη)

Πίνακας 3 - Πίνακας συγκρίσεων AODV, DYMO, DSDV, GPSR για 200 κόμβους

## 6. Συμπεράσματα – Ανάλυση

Αρχικά, παρατηρώντας τις τοπολογίες των δικτύων που δημιουργήθηκαν, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η θεμελιώδης διαφορά βρίσκεται στους παραπάνω κόμβους που εισέρχονται στο δίκτυο με την μεταβλητή numHosts σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Ως αποτέλεσμα, της πειραματικής διαδικασίας και της εκτέλεσης του AODV, DYMO, DSDV και GPSR αλγορίθμου για 10, 20, 50, 100 και 200 κόμβους, το output rate του hostA στην πρώτη τοπολογία παρουσιάζει σημαντικότερες διακυμάνσεις στις τιμές του σχετικά με τις υπόλοιπες υλοποιήσεις αντίστοιχα, ενώ η κατανάλωση ενέργειας στον hostB, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα στην 1<sup>η</sup>, στην 2<sup>η</sup>, στην 3<sup>η</sup>, στην 4<sup>η</sup> και στην 5<sup>η</sup> περίπτωση αντίστοιχα είναι σημαντικά μεγαλύτερη όταν οι κόμβοι σε ένα δίκτυο πληθαίνουν. Βέβαια, όσον αφορά στον hostA μεγαλύτερη τελική τιμή έχει η καταναλισκόμενη ενέργεια στην πρώτη περίπτωση σε σύγκριση με τις άλλες.

Σχετικά με τα πακέτα, παρατηρείται μεγαλύτερη απώλεια στην τοπολογία των 200 κόμβων δικτύου σε σχέση με τις υπόλοιπες ενώ και σημαντικές αλλαγές είναι δυνατόν να εντοπιστούν και στο end to end delay όσον αφορά την μετάδοση τους στον hostB ο οποίος είναι ο κόμβος στόχος.

Ακόμη, όσο αφορά στην σύγκριση όλων των αλγορίθμων παρατηρούμε ότι υπάρχουν και εδώ σημαντικές διαφορές και διακυμάνσεις στις τιμές του throughput τους. Επιπλέον παρατηρείται ότι σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας οι καλύτερες τιμές βρίσκονται στον DSDV αλγόριθμο και φυσικά διακρίνεται με ευκολία ότι την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας την διαθέτει ο GPSR. Σχετικά με τα πακέτα που παραλήφθηκαν επιτυχώς από τον hostB (κόμβος στόχος), ο πιο αποδοτικός και με μεγάλη διαφορά είναι ο AODV και σε αυτή τη περίπτωση.

Επιπρόσθετα, παρατηρείται η μεγάλη υπεροχή του AODV αλγορίθμου συγκριτικά με τους υπόλοιπους για μεγάλα και πολύπλοκα δίκτυα.

Τέλος, είναι σημαντικό να γίνει η κατανόηση της μεγάλης υπεροχής που διαθέτει ο AODV αλγόριθμος σε σύγκριση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους, των οποίων οι υλοποιήσεις τους, προσφέρονται από το INET framework. Λαμβάνοντας υπόψη επίσης ότι ο AODV, είναι σε θέση να ανταποκριθεί γρήγορα σε τοπολογικές αλλαγές



και υποστηρίζει με ευκολία την επέκταση του σε μεγαλύτερα δίκτυα (αναφορικά με τον αν μπορούμε να το τοποθετήσουμε επιπλέον κόμβους στο δίκτυο και να παρατηρήσουμε την λειτουργία τους). Σε αυτό το πλαίσιο άλλοι αλγόριθμοι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μελλοντική επέκταση είναι ο DSR καθώς και ο OLSR.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1]. Agnihotri, S., & Ramkumar, K. R. (2017). A survey and comparative analysis of the various routing protocols of Internet of Things. *International Journal of Pervasive Computing and Communications*.
- [2]. Akhigbe, B. I., Munir, K., Akinade, O., Akanbi, L., & Oyedele, L. O. (2021). IoT technologies for livestock management: a review of present status, opportunities, and future trends. *Big Data and Cognitive Computing*, 5(1), 10.
- [3]. Aksoy, S., Tilton, J. C., & Tarabalka, Y. (2015). Image segmentation algorithms for land categorization. In *Remote sensing Handbook V. 1 Remotely sensed data characterization, classification, and accuracies* (pp. 317-342). Taylor & Francis.
- [4]. Andersson, K., & Hossain, M. S. (2014, May). Smart risk assessment systems using belief-rule-based DSS and WSN technologies. In *2014 4th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE)* (pp. 1-5). IEEE.
- [5]. Aznaoui, H., Raghay, S., Ullah, A., & Khan, M. H. (2021). Energy efficient strategy for WSN technology using modified HGAF technique. *iJOE*, 17(06), 5.
- [6]. Dhumane, A., Prasad, R., & Prasad, J. (2016, March). Routing issues in internet of things: a survey. In *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists* (Vol. 1, pp. 16-18).
- [7]. Franceschinis, M., Spirito, M. A., Tomasi, R., Ossini, G., & Pidala, M. (2008, August). Using wsn technology for industrial monitoring: A real case. In *2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications (sensorcomm 2008)* (pp. 282-287). IEEE.
- [8]. Fu, X., Fortino, G., Pace, P., Aloï, G., & Li, W. (2020). Environment-fusion multipath routing protocol for wireless sensor networks. *Information Fusion*, 53, 4-19.

- [9]. Gnoni, M. G., Bragatto, P. A., Milazzo, M. F., & Setola, R. (2020). Integrating IoT technologies for an “intelligent” safety management in the process industry. *Procedia manufacturing*, 42, 511-515.
- [10]. Gomathi, R. M., Krishna, G. H. S., Brumancia, E., & Dhas, Y. M. (2018, February). A survey on IoT technologies, evolution and architecture. In *2018 International Conference on Computer, Communication, and Signal Processing (ICCCSP)* (pp. 1-5). IEEE.
- [11]. Govinda, K., & Saravanaguru, R. A. (2016). Review on IOT technologies. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(4), 2848-2853.
- [12]. Han, Z., Li, Y., & Liang, J. (2018). Numerical improvement for the mechanical performance of bikes based on an intelligent PSO-ABC algorithm and WSN technology. *IEEE Access*, 6, 32890-32898.
- [13]. Henkel, J., Pagani, S., Amrouch, H., Bauer, L., & Samie, F. (2017, March). Ultra-low power and dependability for IoT devices (Invited paper for IoT technologies). In *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2017* (pp. 954-959). IEEE.
- [14]. Katyara, S., Shah, M. A., Chowdhary, B. S., Akhtar, F., & Lashari, G. A. (2019). Monitoring, control and energy management of smart grid system via WSN technology through SCADA applications. *Wireless Personal Communications*, 106(4), 1951-1968.
- [15]. Li, J., Silva, B. N., Diyan, M., Cao, Z., & Han, K. (2018). A clustering based routing algorithm in IoT aware Wireless Mesh Networks. *Sustainable cities and society*, 40, 657-666.
- [16]. Li, L. Y., Jaafar, H., & Ramli, N. H. (2018, August). Preliminary study of water quality monitoring based on WSN technology. In *2018 International Conference on Computational Approach in Smart Systems Design and Applications (ICASSDA)* (pp. 1-7). IEEE.
- [17]. Liu, Z., Feng, X., Zhang, J., Li, T., & Wang, Y. (2016). An improved GPSR algorithm based on energy gradient and APIT grid. *Journal of Sensors*, 2016.
- [18]. Losilla, F., Garcia-Sanchez, A. J., Garcia-Sanchez, F., Garcia-Haro, J., & Haas, Z. J. (2011). A comprehensive approach to WSN-based ITS applications: A survey. *Sensors*, 11(11), 10220-10265.

- [19]. Mainetti, L., Marasovic, I., Patrono, L., Solic, P., Stefanizzi, M. L., & Vergallo, R. (2016). A Novel IoT-aware Smart Parking System based on the integration of RFID and WSN technologies. *International Journal of RF Technologies*, 7(4), 175-199.
- [20]. Miraz, M. H. (2020). Blockchain of things (BCoT): The fusion of blockchain and IoT technologies. In *Advanced applications of blockchain technology* (pp. 141-159). Springer, Singapore.
- [21]. Mohan, P., Subramani, N., Alotaibi, Y., Alghamdi, S., Khalaf, O. I., & Ulaganathan, S. (2022). Improved metaheuristics-based clustering with multihop routing protocol for underwater wireless sensor networks. *Sensors*, 22(4), 1618.
- [22]. Parkhomenko, A., Tulenkov, A., Sokolyanskii, A., Zalyubovskiy, Y., & Parkhomenko, A. (2018). Integrated complex for IoT technologies study. In *Online Engineering & Internet of Things* (pp. 322-330). Springer, Cham.
- [23]. Samie, F., Bauer, L., & Henkel, J. (2016, October). IoT technologies for embedded computing: A survey. In *2016 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ ISSS)* (pp. 1-10). IEEE.
- [24]. Shah, S. H., & Yaqoob, I. (2016, August). A survey: Internet of Things (IOT) technologies, applications, and challenges. In *2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE)* (pp. 381-385). IEEE.
- [25]. Sharma, D., Ojha, A., & Bhondekar, A. P. (2019). Heterogeneity consideration in wireless sensor networks routing algorithms: a review. *The journal of supercomputing*, 75(5), 2341-2394.
- [26]. Tripathy, B. K., & Anuradha, J. (Eds.). (2017). *Internet of things (IoT): technologies, applications, challenges and solutions*. CRC press.
- [27]. Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2015, September). Long-range IoT technologies: The dawn of LoRa™. In *Future access enablers of ubiquitous and intelligent infrastructures* (pp. 51-58). Springer, Cham.
- [28]. Wu, S., Wang, X., & Yang, T. (2011). Improved GPSR model and simulation analysis. *Jisuanji Gongcheng yu Yingyong (Computer Engineering and Applications)*, 47(8), 100-104.

- [29]. Zhang, Q., Jiang, M., Feng, Z., Li, W., Zhang, W., & Pan, M. (2019). IoT enabled UAV: Network architecture and routing algorithm. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 3727-3742.
- [30]. Zhang, R., Ren, Z., Sun, J., Tang, W., Ning, D., & Qian, Y. (2017). Method for monitoring the cotton plant vigor based on the WSN technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 133, 68-79.
- [31]. Dynamic Source Routing protocol (DSR): Algorithm, Example, Advantages, Disadvantages.
- [32]. Acervo Lima Protocole de routage d'état de liaison optimisé
- [33]. RF Wireless World z-wave protocol stack | z-wave protocol layer basics
- [34]. Ευάγγελος Αντωνόπουλος Μελέτη λειτουργίας και κατανάλωσης ενέργειας δικτύου ασύρματης επικοινωνίας ZIGBEE ΑΠΘ
- [35]. Tara Salman Internet of Things Protocols and Standards
- [36]. ΜΑΥΡΑΚΗ ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (WSN) ΣΤΙΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ
- [37]. FL Lewis. "Wireless Sensor Networks." Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications ed. D.J. Cook and S.K. Das, John Wiley, New York, 2004. Paper: Wireless Sensor Networks
- [38]. Hossein Anisi, Gaddafi Abdul-Salaam, Hanan Abdullah, (April 2014) A survey of wireless sensor network approaches and their energy consumption for monitoring farm fields in precision agriculture
- [39]. Satyam Gupta Manpreet Singh Saumya Srivastava (October 2018) Wireless Sensor Network: A Survey
- [40]. Comparison and Analysis AODV and OLSR Routing Protocols in Ad Hoc Network , Zhan Huawei , Zhou Yun (978-1-4244-2108-4/08/\$25.00 © 2008 IEEE)
- [41]. An Implementation Study of the AODV Routing Protocol (Elizabeth M. Royer , Charles E. Perkins Royer, E.M.; Perkins, C.E. (2000). [IEEE IEEE Conference on Wireless Communications and Networking - Chicago, IL, USA (23-28 Sept. 2000)] 2000 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Conference Record (Cat. No.00TH8540) - An implementation study of the AODV routing protocol. , (0), 1003–1008. doi:10.1109/wcnc.2000.904764 )

- [42]. An Overview of AODV Routing Protocol (Prashant Kumar Maurya, Gaurav Sharma, Vaishali Sahu, Ashish Roberts, Mahendra// Srivastava International Journal of Modern Engineering Research (IJMER) Vol.2, Issue.3, May-June 2012 pp-728-732 ISSN: 2249-6645
- [43]. Network Working Group C. Perkins, Request for Comments: 3561 Nokia Research Center, Category: Experimental E. Belding-Royer, University of California, Santa Barbara S. Das-University of Cincinnati July 2003)
- [44]. AODV Routing Protocol Implementation Design Chakeres, I.D.; Belding-Royer, E.M. (2004). [IEEE 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2004. Proceedings. - Hachioji, Tokyo, Japan (2004.03.24-2004.03.24)] 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2004. Proceedings. - AODV routing protocol implementation design. , (), 698–703.
- [45]. Destination-sequenced distance vector (DSDV) routing protocol implementation in ns-3
- [46]. PERFORMANCE METRIC COMPARISON OF AODV AND DSDV ROUTING PROTOCOLS IN MANETs USING NS-2 (Sachin Kumar Gupta\* & R. K. Saket
- [47]. Performance Comparison of AODV, DSDV and I-DSDV Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks (European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.31 No.4 (2009), pp.566-576, Abdul Hadi Abd Rahman & Zuriati Ahmad Zukarnain)
- [48]. IMPLEMENTATION OF DYMO ROUTING PROTOCOL (Anuj K. Gupta, Harsh Sadawarti, Anil K. Verma, Cornell University)
- [49]. The DYMO Routing Protocol in VANET Scenarios (Sommer, Christoph; Dressler, Falko (2007). [IEEE 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference - Baltimore, MD, USA (2007.09.30-2007.10.3)] 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference - The DYMO Routing Protocol in VANET Scenarios. , (), 16–20.)
- [50]. Clausen T, Jacquet P, RFC 3626-“Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)”, Oct 2003
- [51]. Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV Routing Protocols using NS2 Simulator S. Mohapatra, P.Kanungo , 2011

- [52]. Comparison and Analysis AODV and OLSR Routing Protocols in Ad Hoc Network , Zhan Huawei , Zhou Yun (978-1-4244-2108-4/08/\$25.00 © 2008 IEEE)
- [53]. Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks (Jacquet, P.; Muhlethaler, P.; Clausen, T.; Laouiti, A.; Qayyum, A.; Viennot, L. (2001). [IEEE IEEE International Multi Topic Conference 2001. IEEE INMIC 2001 - Lahore, Pakistan (28-30 Dec. 2001)] Proceedings. IEEE International Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century. - Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. , (0), 62–68. doi:10.1109/inmic.2001.995315 )
- [54]. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks David B. Johnson David A. Maltz Computer Science Department Carnegie Mellon University
- [55]. Bal Krishna, Saraswat, Manish Bhardwaj, AnalpPathak, Optimum Experimental Results of AODV, DSDV & DSR Routing Protocol in Grid Environment