

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΟΥΚΑΣ

ΑΜ: 719

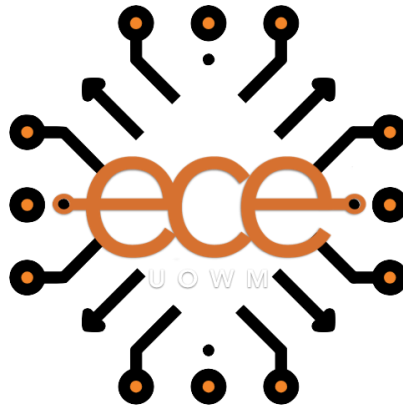
ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

ΛΟΥΤΑ ΜΑΛΑΜΑΤΗ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΒΑΡΔΑΚΑΣ

ΚΟΖΑΝΗ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς



**University of Western Macedonia
Faculty of Engineering**

Department of Electrical and Computer Engineering

DIPLOMA THESIS

Performance evaluation of converged optical-wireless 5G networks

NIKOS MOUKAS

STUDENT NUMBER: 719

SUPERVISORS:

MALAMATI LOUTA

JOHN VARDAKAS

KOZANH, OCTOBER 2019

Τίτλος: Αποτίμηση απόδοσης συγκλίνοντων
οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Περιγραφή: Διπλωματική εργασία στα πλαίσια των
σπουδών για την απόκτηση του Διπλώματος
που απονέμει το Πανεπιστήμιο Δυτικής
Μακεδονίας με τίτλο «Μηχανικός
Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών»

Δημιουργός: Μούκας Νικόλαος

Ημερομηνία Δημιουργίας: 30 Οκτωβρίου

Χρόνος έκδοσης: 2019

Χώρα έκδοσης: GR

Γλώσσα κειμένου: Gre

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία
εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών
για την απόκτηση του Διπλώματος
που απονέμει το
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας με τίτλο
«Μηχανικός Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών»

Εγκρίθηκε από την εξεταστική επιτροπή την/..../2019 αποτελούμενη από τους:

Όνοματεπώνυμο:	Βαθμίδα:	Υπογραφή:
1.
2.
3.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

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

“ Αποτίμηση απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς ”

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 Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη των μελών του Τμήματος κα. Λούτα Μαλαματή και κ. Βαρδάκα Ιωάννη.

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 & Επιβλέποντες, Έτος, Πόλη

Copyright (C) Μούκας Νικόλαος, Λούτα Μαλαματή, Βάρδακας Ιωάννης, 2019 , Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή:

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Βασικός στόχος της εργασίας αυτής είναι η μελέτη ενός τέτοιου δικτύου μέσα από την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης. Δημιουργήθηκαν τοπολογίες δικτύου ασύρματων αισθητήρων με τυχαία κατανομή με σκοπό την αποτίμηση απόδοσης κατά την λειτουργία τους με την χρήση συγκεκριμένων μεθόδων δρομολόγησης. Πιο αναλυτικά, εφαρμόζουμε στην λειτουργία του δικτύου δρομολόγηση, για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων και για την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής. Προσομοιώνοντας το δίκτυο με βάση τις τεχνικές αυτές για αραιές και πυκνές τοπολογίες συλλέγουμε αποτελέσματα για να προσδιορίσουμε τις επιπτώσεις που επιφέρει η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης της μετάδοσης στην διάρκεια λειτουργίας των δικτύων που μελετούμε. Στην κατάσταση δρομολόγησης με στόχο να παρατείνουμε την διάρκεια ζωής του δικτύου αναζητώντας αποδοτικότερα ενεργειακά μονοπάτια επικοινωνίας συγκρίνουμε τις αλλαγές που προκύπτουν στην καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων πληροφορίας και το μέγεθος των αλλαγών αυτών για κάθε μια από τις τοπολογίες που αναλύουμε. Τέλος, τροποποιώντας τις παραμέτρους του δικτύου μας μελετούμε τι αντίκτυπο έχουν στην λειτουργία του όσον αφορά την καθυστέρηση μετάδοσης και διάρκεια αυτονομίας. Τέτοιοι παράμετροι είναι η απόσταση μετάδοσης, η απορρόφηση ενέργειας κατά την μετάδοση πακέτων πληροφοριών, η αυξομείωση στο μέγεθος των πακέτων δεδομένων που δημιουργούν οι κόμβοι-αισθητήρες και η αύξηση της διαθέσιμης ισχύς των αισθητήρων.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Abstract

The subject of this diploma thesis is the analysis of wireless sensor networks (WSN). The main objective of this work is to study such networks through the development of a mathematical optimization model. Random-distributed wireless sensor network topologies were created to evaluate the performance during the operation of the network using specific routing models. More specifically, we apply routing policies for the minimization of hops within the network and the maximization of lifetime. We simulated the network using these policies for sparse and dense topologies and we collected the results to determine the effect of minimizing transmission delay (latency) during the operation of the network. Using the routing model for the lifetime maximization of the network, we searched for more energy efficient communication paths and we compare the effect that result in the increase of the transmission delay for data packets and the magnitude of these effect for each of the topologies we analyzed. Finally, by modifying the parameters of our network, we study the impact they have on its behavior in terms of transmission delay and lifetime. Such parameters are the transmission distance, the energy absorption during data transmission, fluctuation of the data packet size that sensor nodes create and increasing the available sensor battery.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές, την κυρία Λούτα Μαλαματή και τον κύριο Ιωάννη Βαρδάκα που δέχτηκαν να συνεργαστούν μαζί μου για την ανάθεση και την υλοποίηση του συγκεκριμένου θέματος. Η καθοδήγηση και η εμπιστοσύνη τους ήταν πολύτιμη καθ' όλη την διάρκεια του έργου.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους που στάθηκαν δίπλα μου μέχρι το τέλος αυτά τα χρόνια της φοίτησης μου στην Κοζάνη καθώς με γέμισαν εμπειρίες, στιγμές χαράς πολλά ενδιαφέροντα και με βοήθησαν να γινώ καλύτερος άνθρωπος.

Δεν είναι δυνατόν να παραλείψω την οικογένεια μου η οποία βρίσκεται στο πλάι μου όλα αυτά τα χρόνια και στηρίζει τις επιλογές μου προσφέροντας όλα όσα χρειάζονται απλόχερα. Η ψυχολογική τους υποστήριξη και η εμπύχωση τους σε δύσκολες στιγμές ήταν απαραίτητη για να συνεχίσω να κυνηγώ τους στόχους μου.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους που με βοήθησαν να αποκτήσω τις βάσεις για να μπορέσω να ενταχθώ σε αυτό το τμήμα και με έμαθαν να θέτω υψηλούς στόχους στη ζωή μου. Χωρίς την συμβολή τους δεν θα ήταν εφικτή η επιτυχία αυτή.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	- 9 -
ABSTRACT.....	- 11 -
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	- 13 -
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	- 15 -
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	- 19 -
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	- 23 -
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ.....	- 25 -
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 27 -
1.1 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	- 27 -
1.2 Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	- 28 -
1.2.1 Είδη δικτύων ασύρματων αισθητήρων	- 29 -
1.3 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΓΙΑ ΤΗ ΣΤΟΙΒΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	- 29 -
1.4 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	- 31 -
1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	- 31 -
1.6 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	- 32 -
2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	- 33 -
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	- 33 -
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	- 35 -
2.2.1 Ασύρματοι αισθητήρες Mica2	- 37 -
2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	- 38 -
2.3.1 Δρομολόγηση ελάχιστων αλμάτων(minimum hop routing)	- 38 -
2.3.2 Μοντέλο ελάχιστων αλμάτων(minimum hop routing)	- 38 -
2.3.3 Μοντέλο μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής(maximizing lifetime).....	- 40 -
2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ	- 41 -
2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	- 42 -
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	- 43 -
3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΣΤΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ MATLAB	- 43 -
3.1.1 Τοποθέτηση κόμβων και υπολογισμός αποστάσεων	- 43 -
3.1.2 Δημιουργία συνόλων δικτύου	- 44 -
3.1.3 Αποθήκευση επίπεδων απορρόφησης ενέργειας των μονοπατιών επικοινωνίας	- 45 -

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

3.1.4 Υπολογισμός επίπεδων απορρόφησης ενέργειας στα μονοπάτια επικοινωνίας ..	- 46 -
3.1.5 Δημιουργία γραφήματος της τοπολογίας δικτύου και εκτέλεση της αριθμητικής ανάλυσης	- 47 -
3.1.6 Αρχείο εκτέλεσης προσκηνίου	- 48 -
3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΤΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ GAMS	- 49 -
3.2.1 Ορισμός συνόλων δικτύου ασύρματων αισθητήρων	- 49 -
3.2.2 Ορισμός μεταβλητών και εξισώσεων του μοντέλου WSN	- 51 -
3.2.3 Αναπαράσταση εξισώσεων μοντέλου ελαχιστοποίησης αλμάτων	- 52 -
3.2.4 Αναπαράσταση εξισώσεων μοντέλου μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής του δικτύου	- 52 -
3.2.5 Ορισμός μοντέλων επίλυσης	- 54 -
3.2.6 Επίλυση μοντέλου ελάχιστων αλμάτων	- 55 -
3.2.7 Επίλυση μοντέλου μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής με περιορισμό την ελαχιστοποίηση των αλμάτων	- 56 -
3.2.8 Επίλυση μοντέλου μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής του δικτύου	- 57 -
3.2.9 Επίλυση μοντέλου ελαχιστοποίησης αλμάτων με περιορισμό την μέγιστη διάρκεια ζωής	- 58 -
3.2.10 Αποφυγή μη ρεαλιστικών τοπολογιών δικτύου	- 59 -
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	- 63 -
4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΡΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗ	- 63 -
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΛΜΑΤΩΝ	- 63 -
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ	- 64 -
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	- 66 -
4.4.1 Αύξηση απορρόφησης της ενέργειας μετάδοσης κατά 10%	- 66 -
4.4.2 Αύξηση απορρόφησης της ενέργειας μετάδοσης κατά 25%	- 69 -
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	- 71 -
4.5.1 Αύξηση απόστασης μετάδοσης κατά 10%	- 71 -
4.5.2 Αύξηση απόστασης μετάδοσης κατά 25%	- 74 -
4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ	- 77 -
4.6.1 Μείωση του πακέτου πληροφορίας στα 512 bits	- 77 -
4.6.2 Αύξηση του πακέτου πληροφορίας στα 2048 bits	- 79 -
4.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗΝ ΙΣΧΥ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	- 82 -
-	
4.7.1 Αύξηση της μπαταρίας των αισθητήρων κατά 10%	- 82 -
4.7.2 Αύξηση της μπαταρίας των αισθητήρων κατά 25%	- 84 -
5. ΣΥΝΟΨΗ	- 87 -
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 87 -

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΟΚΙΕΣ..... - 88 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - 89 -

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1. ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ[20].	- 28 -
ΕΙΚΟΝΑ 2. (Α) ΔΙΚΤΥΟ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΑΣΤΕΡΑ[22]. (Β) ΔΙΚΤΥΟ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ[22].	- 29 -
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΣΤΟΙΒΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ [20].	- 30 -
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΑΣΥΡΜΑΤΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΙCΑ2 [17].	- 38 -
ΕΙΚΟΝΑ 5. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ WSN.	- 42 -
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ	- 43 -
ΕΙΚΟΝΑ 7. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ $Etx(l)$ ΚΑΙ $Rmaxl$ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΡΧΕΙΟΥ NODES.	- 44 -
ΕΙΚΟΝΑ 8. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΡΧΕΙΟΥ OUT OF RANGE DISTANCES ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ETx OPT TABLE.	- 46 -
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ FIND OPTIMAL ENERGY LEVEL.	- 47 -
ΕΙΚΟΝΑ 10. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ, ΕΚΤΕΛΕΣΗ BATCH FILE.	- 48 -
ΕΙΚΟΝΑ 11. ΑΡΧΕΙΟ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ BATCH .	- 49 -
ΕΙΚΟΝΑ 12. GAMS LOGO.	- 49 -
ΕΙΚΟΝΑ 13. ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΩΝ.	- 50 -
ΕΙΚΟΝΑ 14. ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.	- 51 -
ΕΙΚΟΝΑ 15. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ.	- 52 -
ΕΙΚΟΝΑ 16. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.	- 54 -
ΕΙΚΟΝΑ 17. ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ.	- 55 -
ΕΙΚΟΝΑ 18. ΚΛΗΣΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FINDMINIMUMHOPCOUNT ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.	- 56 -
ΕΙΚΟΝΑ 19. ΚΛΗΣΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MINIMUMHOPCOUNTENFORCED ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.	- 57 -
ΕΙΚΟΝΑ 20. ΚΛΗΣΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MAXIMUMLIFETIMEENFORCED ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.	- 58 -
ΕΙΚΟΝΑ 21. ΚΛΗΣΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HOPCOUNTWITHMAXIMUMLIFETIME ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.	- 59 -
ΕΙΚΟΝΑ 22. ΣΥΝΘΗΚΗ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.	- 60 -
ΕΙΚΟΝΑ 23. ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗ.	- 60 -
ΕΙΚΟΝΑ 24. ΜΗ ΡΕΑΛΙΣΤΙΚΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ (ΑΠΟΚΟΜΜΕΝΟΙ ΚΟΜΒΟΙ).	- 61 -
ΕΙΚΟΝΑ 25. ΜΗ ΡΕΑΛΙΣΤΙΚΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ (ΑΠΟΚΟΜΜΕΝΟΙ ΚΟΜΒΟΙ).	- 61 -
ΕΙΚΟΝΑ 26. ΜΗ ΡΕΑΛΙΣΤΙΚΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ (ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΠΟΚΟΜΜΕΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ).	- 62 -
ΕΙΚΟΝΑ 27. ΜΗ ΡΕΑΛΙΣΤΙΚΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ (ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΑΠΟΚΟΜΜΕΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ).	- 62 -
ΕΙΚΟΝΑ 28. ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΛΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΜΕΣΟ ΟΡΟ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ.	- 64 -
ΕΙΚΟΝΑ 29. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ.	- 65 -
ΕΙΚΟΝΑ 30. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.	- 66 -

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

ΕΙΚΟΝΑ 31. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΤΧ.	- 67 -
ΕΙΚΟΝΑ 32. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΤΧ.....	- 67 -
ΕΙΚΟΝΑ 33. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΤΧ.	- 68 -
ΕΙΚΟΝΑ 34. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΤΧ.	- 68 -
ΕΙΚΟΝΑ 35. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΤΧ.	- 69 -
ΕΙΚΟΝΑ 36. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΤΧ.....	- 70 -
ΕΙΚΟΝΑ 37. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΤΧ.	- 70 -
ΕΙΚΟΝΑ 38. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΤΧ.	- 71 -
ΕΙΚΟΝΑ 39. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ RMAX.	- 72 -
ΕΙΚΟΝΑ 40. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ RMAX.	- 73 -
ΕΙΚΟΝΑ 41. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ RMAX.	- 73 -
ΕΙΚΟΝΑ 42. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ RMAX.	- 74 -
ΕΙΚΟΝΑ 43. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 25% ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ RMAX.	- 75 -
ΕΙΚΟΝΑ 44. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 25% ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ RMAX.	- 75 -
ΕΙΚΟΝΑ 45. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 25% ΣΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ RMAX.	- 76 -
ΕΙΚΟΝΑ 46. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 25% ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ RMAX.	- 76 -
ΕΙΚΟΝΑ 47. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΑ 512 BITS ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ LP.....	- 77 -
ΕΙΚΟΝΑ 48. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΑ 512 BITS ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ LP.....	- 78 -
ΕΙΚΟΝΑ 49. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΑ 512 BITS ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ LP.	- 78 -
ΕΙΚΟΝΑ 50. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΑ 512 BITS ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ LP.....	- 79 -
ΕΙΚΟΝΑ 51. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΑ 2048 BITS ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ LP.....	- 80 -

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

ΕΙΚΟΝΑ 52. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΑ 2048 BITS ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ LP. - 80 -

ΕΙΚΟΝΑ 53. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΑ 2048 BITS ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ LP. - 81 -

ΕΙΚΟΝΑ 54. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΑ 2048 BITS ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ LP. - 81 -

ΕΙΚΟΝΑ 55. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. - 82 -

ΕΙΚΟΝΑ 56. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. - 83 -

ΕΙΚΟΝΑ 57. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. - 83 -

ΕΙΚΟΝΑ 58. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 10% ΣΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. - 84 -

ΕΙΚΟΝΑ 59. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 25% ΣΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. - 85 -

ΕΙΚΟΝΑ 60. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 25% ΣΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. - 85 -

ΕΙΚΟΝΑ 61. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 25% ΣΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. - 86 -

ΕΙΚΟΝΑ 62. ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ 25% ΣΤΗΝ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. - 86 -

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Κατάλογος πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (E_{txl} -NJ/BIT) ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ($R_{max}(l)$ -M) ΑΝΑ ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ l ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΙCΑ2 ΜΟΤΕS[1].	- 36 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΜΕΤΑΒΛΗΤΕS ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ[1].	- 37 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ (β_{min}) ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ[1].	- 40 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ (t) ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ[1].	- 41 -

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Ευρετήριο ακρωνύμων

G

GAMS

General Algebraic Modeling System, -
42 -, - 49 -

GGA

Global Greedy Algorithm, - 33 -

M

M2M

Machine 2 Machine, - 88 -

MAC

Media access control, - 30 -

MIP

Mixed Integer Programming, - 34 -

O

OSI

Open Systems Interconnection, - 29 -

S

SDN

Software Defined Networking, - 33 -

SDN-WISE

Software Defined Networking solution
for Wireless Sensor Networks, - 34 -

SDSN

Software Defined Sensor Networks, - 33

-

SDWN

Software Defined Wireless Networking, -
34 -

SNSP

Sensor Network Services Platform, - 30 -

W

WSN

Wireless Sensor Network, - 27 -, - 37 -, -
51 -

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

1. Εισαγωγή

1.1 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και εφαρμογές

Η ύπαρξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN) σήμερα οφείλεται στον σχεδιασμό και την βελτίωση μικρών συσκευών επιταχύνοντάς έτσι την προώθησή τους σε μια μορφή χαμηλού κόστους και κατανάλωσης ενέργειας [20].

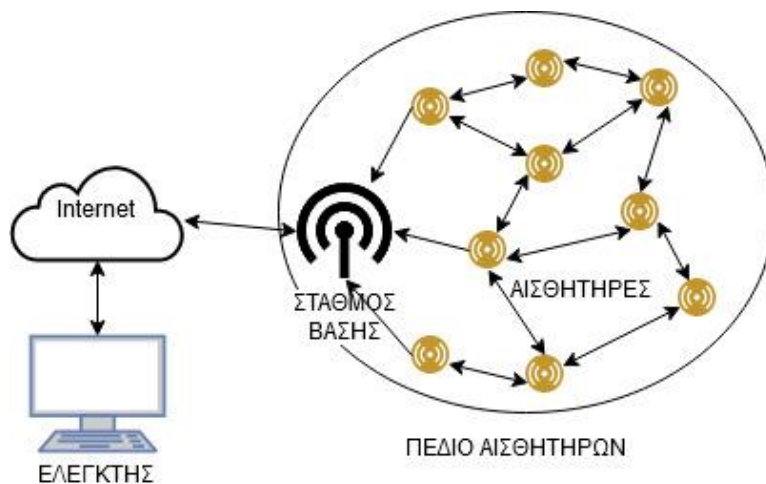
Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) αποτελείται από διασκορπισμένους αυτόνομους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντολογικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, ο ήχος, η ατμοσφαιρική πίεση και μέσω ασύρματης επικοινωνίας να μεταφέρει τα δεδομένα μέσω του δικτύου σε έναν σταθμό βάσης (access point). Καθώς εξελίσσονται πιο μοντέρνα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων είναι ικανά και να δίνουν αλλά και να δέχονται πληροφορίες πράγμα που τους επιτρέπει να ελέγχουν την δραστηριότητα των αισθητήρων. Το αρχικό κίνητρο για την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων με αισθητήρες ήταν οι στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση των πεδίων μάχης. Σήμερα τέτοια δίκτυα χρησιμοποιούνται σε πολλές καταναλωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές, η παρακολούθηση και ο έλεγχος της βιομηχανικής παραγωγής, την παρακολούθηση των μηχανημάτων υγείας και πολλά άλλα.

Αξιοσημείωτο είναι πως σε τέτοια δίκτυα μεγάλης κλίμακας ο αισθητήρας-κόμβος λόγω απόστασης δεν έχει την δυνατότητα να μεταδώσει το πακέτο πληροφορίας του απευθείας στον σταθμό βάσης-αποδέκτη (sink). Αυτό καθιστά απαραίτητο οι γειτονικοί κόμβοι-αισθητήρες να μπαίνουν σε ρολό αναμεταδότη για να μεταφέρουν τις πληροφορίες μέσω του δικτύου στον τελικό προορισμό τους. Με στόχο να καλυφθεί αυτή η ανάγκη οι πίνακες δρομολόγησης επιλύουν το πρόβλημα παρέχοντας τους υποψήφιους κόμβους αναμετάδοσης για κάθε πακέτο πληροφορίας προς τον προορισμό του.

Έχουν προταθεί αρκετά πρωτόκολλα για την δρομολόγηση των δικτύων, ωστόσο υπάρχουν επιπτώσεις ανάλογα με το πρωτόκολλο που επιλέγεται. Επιλέγοντας το πρωτόκολλο για την εύρεση της πιο σύντομης διαδρομής ενός πακέτου πληροφορίας προς τον σταθμό βάσης παρατηρούνται αρνητικές επιπτώσεις στην διάρκεια ζωής του δικτύου, διότι οι κόμβοι που δρουν ως αναμεταδότες καταναλώνουν γρηγορότερα την διαθέσιμη ισχύ τους. Αντιθέτως, σε άλλες περιπτώσεις η χρήση αυτού του πρωτοκόλλου μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης (latency) αλλά και στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Είναι φανερό, λοιπόν, πως η εφαρμογή καθορίζει τον μηχανισμό και τις τεχνικές δρομολόγησης.

1.2 Η δομή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν πυκνή τυπολογικά ανάπτυξη η οποία αλλάζει συνεχώς, περιορισμένους πόρους και ο αριθμός των κόμβων-αισθητήρων είναι αρκετά μεγάλος σε σχέση με υπόλοιπα δίκτυα. Αναλυτικότερα ένα τέτοιο δίκτυο αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη[20].

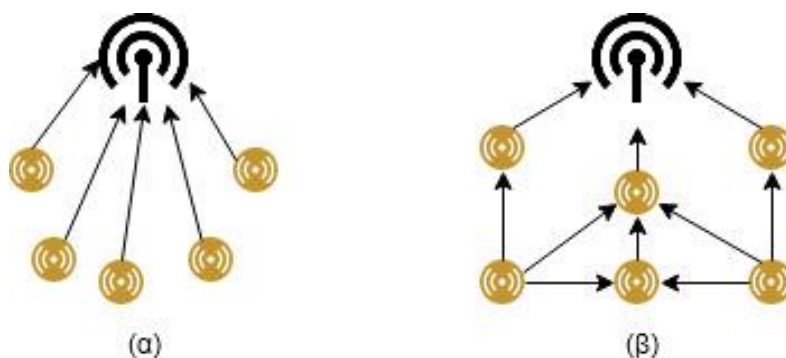


Εικόνα 1. Τα βασικά μέρη ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων[20].

- **Πεδίο αισθητήρων:** Ως πεδίο χαρακτηρίζεται η περιοχή που τοποθετούνται οι κόμβοι συνήθως μιλώντας για περιοχή με μορφή δίσκου.
- **Αισθητήρες-Κόμβοι:** Οι κόμβοι αποτελούν το κύριο μέρος αυτών των δικτύων και κύριο μέλημα τους είναι η συλλογή πληροφοριών μεταδίδοντάς την προς τον σταθμό βάσης. Επίσης, έχουν την δυνατότητα να δρουν ως κόμβοι αναμετάδοσης πακέτων πληροφοριών από άλλους κόμβους προς τον προορισμό τους.
- **Αποδέκτης-Σταθμός βάσης:** Ο σταθμός βάσης είναι ένας κόμβος αισθητήρας που οι αρμοδιότητες του είναι να λαμβάνει να επεξεργάζεται και να αποθηκεύει δεδομένα. Έχει καταλυτικό ρόλο για την αποδοτική ενεργειακή κατανάλωση και την καθυστέρηση μετάδοσης του δικτύου.
- **Ελεγκτής:** Ο ελεγκτής είναι το κεντρικό σημείο ελέγχου μέσα στο δίκτυο, το οποίο είναι υπεύθυνο για την εξαγωγή πληροφοριών από το δίκτυο και για την μεταφορά πληροφοριών ελέγχου προς το δίκτυο.

1.2.1 Είδη δικτύων ασύρματων αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ταξινομούνται με βάση τη δομή τους. Δίκτυο αστέρα αποτελεί ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στο οποίο ένας σταθμός βάσης μεταδίδει και δέχεται πακέτα πληροφοριών από απομακρυσμένους κόμβους. Το δίκτυα στα οποία οι κόμβοι έχουν την δυνατότητα να μεταδώσουν πληροφορίες σε γειτονικούς κόμβους εντός εμβέλειας με τελικό προορισμό τον σταθμό βάσης ονομάζονται δίκτυο πλέγματος.



Εικόνα 2. (α) Δίκτυο ασύρματων αισθητήρων αστέρα[22]. (β) Δίκτυο ασύρματων αισθητήρων πλέγματος[22].

1.3 Η αρχιτεκτονική για τη στοίβα πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Όπως όλα τα πρωτόκολλα επικοινωνίας βασίζονται στα επίπεδα του μοντέλου ανοικτού συστήματος διασύνδεσης (OSI), έτσι και η αρχιτεκτονική επικοινωνίας των δικτύων ασύρματων αισθητήρων μπορεί να ταξινομηθεί σε διάφορα στρώματα. Με την διαφορά ότι αυτά τα δίκτυα δεν τηρούν ακριβώς την πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του μοντέλου OSI σε σύγκριση με δίκτυα άλλου τύπου [20].

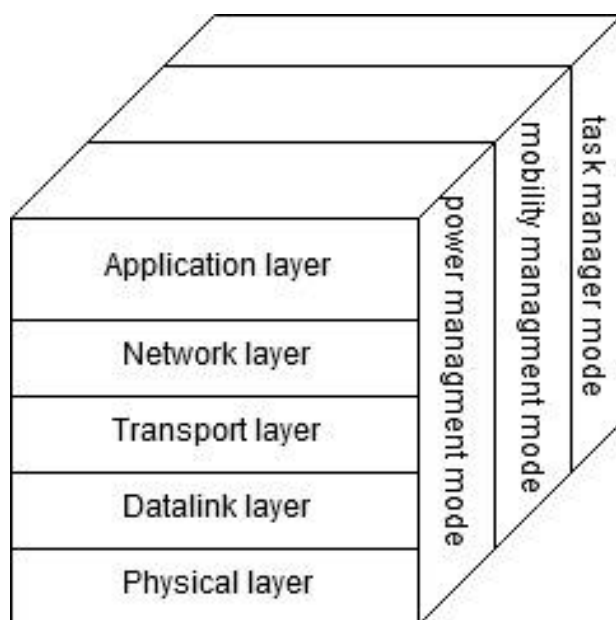
Η στοίβα πρωτοκόλλων μπορεί να ταξινομηθεί σε πέντε κύρια στρώματα. Το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο ζεύξης δεδομένων, το επίπεδο μεταφοράς, το επίπεδο δικτύου και το επίπεδο εφαρμογής.

- Το φυσικό επίπεδο (**Physical layer**) παρέχει εύρωστες τεχνικές λήψης, μετάδοσης και διαμόρφωσης.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

- Ο έλεγχος πρόσβασης μέσου (MAC) έχει καθοριστική συμβολή στο στρώμα διασύνδεσης δεδομένων (**Datalink layer**) και πρέπει να είναι προσεκτική έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις.
- Το στρώμα δικτύου (**Network layer**) έχει ως κύρια ενέργεια την δρομολόγηση δεδομένων και κυρίως την επιλογή των διαδρομών-μονοπατιών για την αποστολή δεδομένων στο εσωτερικό του δικτύου.
- Το στρώμα μεταφοράς (**Transport layer**) συμβάλει στην διατήρηση της ροής δεδομένων. Αυτό το στρώμα παίζει καθοριστικό ρόλο όταν θελήσουμε να κάνουμε προσβάσιμο το σύστημα μας μέσω διαδικτύου η άλλων εξωτερικών δικτύων.
- Το στρώμα εφαρμογής (**Application layer**) ορίζει ένα σύνολο υπηρεσιών και πρωτογενών διεπαφών. Ένα παράδειγμα είναι η πλατφόρμα υπηρεσιών δικτύου αισθητήρων (SNSP Sensor Network Services Platform).

Κάθετα σε αυτά τα επίπεδα ορίζονται τα επίπεδα της ισχύος, της κινητικότητας και της διαχείρισης εργασιών τα οποία είναι υπεύθυνα για την παρακολούθηση της ισχύος της κίνησης και της κατανομής καθηκόντων μεταξύ των κόμβων – αισθητήρων. Η ύπαρξη αυτών των επίπεδων είναι καθοριστική, διότι συντονίζουν τις λειτουργίες των αισθητήρων και μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας στο σύνολο του δικτύου.



Εικόνα 3. Στοιβά πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [20].

1.4 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Οι βλέψεις της παρούσας διπλωματικής είναι να δημιουργήσουμε τοπολογίες δικτύου ασύρματων αισθητήρων σε μια εικονική περιοχή μορφής δίσκου με διαφορετικές ακτίνες διασποράς προκειμένου να προσομοιώσουμε την συμπεριφορά του σε συγκεκριμένες καταστάσεις. Χρησιμοποιώντας εργαλεία για την τυχαία κατανομή των αισθητήρων και εν τέλει την δημιουργία της τοπολογίας του δικτύου θα μελετήσουμε μεθόδους βελτιστοποίησης ως αναφορά την λειτουργία του.

Στόχοι λοιπόν είναι:

- Η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης (latency) του δικτύου με την χρήση ανάλογης τεχνικής δρομολόγησης.
- Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας (Lifetime) για την αύξησή της διάρκειας ζωής στο σύνολο του δικτύου αλλά και στον κάθε κόμβο-αισθητήρα ξεχωριστά.
- Να ερευνηθούν οι επιπτώσεις που προκύπτουν ανάλογα με τις αλλαγές σε συγκεκριμένες παραμέτρους που οριοθετούν τις δυνατότητές του.
- Μια τέτοια μελέτη να αποτελέσει κίνητρο για την ανάπτυξη και την καθιέρωση αυτόνομων, αποδοτικών ενεργειακά δικτύων ασύρματων αισθητήρων στον τομέα δικτύων νέας γενιάς (5G).

1.5 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η δομή της συγκριμένης διπλωματικής περιλαμβάνει την εξοικείωση με το θεωρητικό μέρος των τεχνικών δρομολόγησης που υιοθετούνται στο δίκτυό μας και την ανάλυση του πειραματικού μέρους που αναπτύχθηκε σε εργαλεία μαθηματικής μοντελοποίησης για την αποτίμηση της απόδοσης του δικτύου ασύρματων αισθητήρων και την βελτιστοποίησή του.

Με αυτόν τον τρόπο, δίνουμε την δυνατότητα στον αναγνώστη να ακολουθήσει με σχετική ευκολία την διαδικασία βελτιστοποίησης του δικτύου και να κατανοήσει την αναγκαιότητα ύπαρξης αποδοτικών ενεργειακά δικτύων.

- Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται η τεχνική δρομολόγησης ελαχιστοποίησης των αλμάτων του δικτύου. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική αρχικά σκοπός στο δίκτυο είναι να αναζητηθεί και να επιλεγθεί το πιο σύντομο μονοπάτι επικοινωνίας από τον κόμβο

προς τον σταθμό βάσης για την μετάδοση πακέτων πληροφοριών. Επιπρόσθετα, επεξηγείται μια ακόμα τεχνική δρομολόγησης η οποία μεγιστοποιεί την διάρκεια ζωής ενός τέτοιου δικτύου αλλά και οι επιπτώσεις τις σχετικά με την αύξηση της καθυστέρησης (latency) του δικτύου.

- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται και επεξηγείται εκτενώς ο κώδικας ο οποίος αναπτύχθηκε στα εργαλεία μαθηματικής μοντελοποίησης MATLAB και GAMS. Δίνεται ξεκάθαρα η μέθοδος με την οποία δημιουργείται η τοπολογία του κάθε δικτύου και ο τρόπος που συνδυάζονται οι δύο προαναφερόμενες τεχνικές δρομολόγησης για την μαθηματική επίλυση του δικτύου ασύρματων αισθητήρων.
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την μαθηματική επίλυση του δικτύου μας. Επεξηγείται το μέγεθος στο οποίο μπορεί να βελτιστοποιηθεί το δίκτυο ως αναφορά την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης αλλά και την μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας του και τι αντίκτυπο επιφέρει στην συμπεριφορά του η ανάλογη επιλογή δρομολόγησης.
- Στο Κεφάλαιο 5 το οποίο αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται η σύνοψη της μελέτης του έργου και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την συλλογή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και μαθηματικής επίλυσης των τοπολογιών που μελετήθηκαν. Επίσης, παραθέτουμε πιθανούς τομείς που μπορούν να υιοθετηθούν αποδοτικά ενεργειακά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων στο μέλλον.

1.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό κεφάλαιο παρουσιάστηκε η έννοια των δικτύων ασύρματων αισθητήρων (WSN) και της χρησιμότητάς τους στην τεχνολογία των επικοινωνιών. Επίσης, γνωρίσαμε τους τύπους τους οποίους συναντάμε τα δίκτυα αυτά αλλά και τα πρωτόκολλα τα οποία οριοθετούν την λειτουργία τους. Αναφέραμε επίσης τους στόχους και τις προσδοκίες του έργου της διπλωματικής εργασίας. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναφερθούν ήδη υπάρχουσες μελέτες και έρευνες σχετικά με την βελτιστοποίηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, τις μεθόδους τις οποίες ακολουθήθηκαν και θα αναλυθούν τα μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης που υιοθετήθηκαν στην παρούσα εργασία για την μαθηματική επίλυση και βελτιστοποίηση του δικτύου μας.

2. Μοντελοποίηση ασύρματων δικτύων αισθητήρων

2.1 Περιγραφή μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Έχοντας εξοικειωθεί με την έννοια των δικτύων ασύρματων αισθητήρων δημιουργείται η ανάγκη να μοντελοποιήσουμε τέτοια δίκτυα με σκοπό την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Μερικές από τις βελτιστοποιήσεις που καθίστανται ως αντικείμενο μελέτης είναι η ελαχιστοποίηση των αλμάτων (minimum hop count routing) και η αύξηση της διάρκειας λειτουργίας τους μέσω δικτύων λογισμικού (Software Defined Networking (SDN)).

Η μέθοδος της ελαχιστοποίησης των αλμάτων έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [3], [4]. Αναλύοντας την μέθοδο αυτή από τις υπάρχουσες έρευνες, οι αισθητήρες οι οποίοι αποτελούν το δίκτυο μπορούν να μεταδίδουν το πακέτο πληροφορίας τους προς τον σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας ένα μονοπάτι το οποίο περιλαμβάνει τον μικρότερο αριθμό κόμβων αναμετάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι η διαδρομή που θα ακολουθήσει το πακέτο πληροφορίας θα είναι αυτή στην οποία θα μεσολαβούν όσο το δυνατόν λιγότεροι αισθητήρες για την αναμετάδοσή του προς την σταθμό βάσης. Κατά την διάρκεια της μετάδοσης των δεδομένων αυτών οι αισθητήρες με τα μεγαλύτερα αποθέματα ενέργειας επιλέγονται ως κόμβοι αναμετάδοσης.

Στρέφοντας την προσοχή μας στην εξοικονόμηση ενέργειας, παρατηρούμε και εδώ διάφορες προσεγγίσεις αυτού του προβλήματος με διαφορετικές οπτικές από προηγούμενες μελέτες. Υπάρχει η δυνατότητα της εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της έξυπνης δρομολόγησης που προτάθηκε στη μελέτη [5]. Μια άλλη προσέγγιση σε αυτό το πρόβλημα είναι η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας απενεργοποιώντας σταδιακά κόμβους και τις συνδέσεις [6]. Στην έρευνα αυτή δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού χρησιμοποιώντας έναν άπληστο αλγόριθμο για τη λύση του. Η προσέγγιση αυτή, όμως, περιορίζεται στην εξοικονόμηση ενέργειας στο κύριο δίκτυο (backbone). Μια ακόμα προσέγγιση στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι ο αλγόριθμος δρομολόγησης που αναλύθηκε στην μελέτη [7]. Ο αλγόριθμος ονομάζεται GGA (Global Greedy Algorithm) και εφαρμόζεται στα δίκτυα λογισμικού (Software Defined Networking (SDN)). Η λειτουργία του είναι να δρομολογεί την κίνηση του δικτύου μέσω διάφορων διαδρομών με σκοπό να ρυθμιστεί η συμφόρηση των συνδέσεων, όταν το δίκτυο βρίσκεται σχεδόν σε κατάσταση αδράνειας.

Μια ακόμα οπτική παρουσιάζεται στην εργασία [8], όπου μελετήθηκε η ελαχιστοποίηση της ενέργειας σε ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων λογισμικού (Software Defined Sensor Networks (SDSN)) ενεργοποιώντας και δρομολογώντας με την ελάχιστη ενέργεια τους κόμβους αισθητήρες. Σε αυτή την προσέγγιση αναλύονται διάφοροι παράγοντες, όπως το μέγεθος του

δικτύου, η κάλυψή του και ο λόγος ανίχνευσης κάτι το οποίο μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ενεργειακή απόδοση.

Στην κατηγορία των ασύρματων δικτύων λογισμικού (Software Defined Wireless Networking (SDWN)) στην εργασία [9] μελετήθηκε μια νέα αρχιτεκτονική, η οποία αποτελείται από κόμβους αισθητήρες και έναν σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης αποτελεί την πύλη μεταξύ των κόμβων αισθητήρων που μεταδίδουν τα πακέτα πληροφοριών και των στοιχείων που υλοποιούν τον έλεγχο του δικτύου. Όλα τα πακέτα ελέγχου θα πρέπει να μεταδοθούν μέχρι να καταλήξουν στο σταθμό βάσης, προκειμένου να επεξεργασθούν από τον ελεγκτή. Επίσης, στην μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο SDN-WISE (Software Defined Networking solution for Wireless Sensor Networks), το οποίο επιτρέπει μια αυθαίρετη επιλογή των διαδρομών και την προσαρμογή της ροής κατά την διάρκεια λειτουργίας του δικτύου κάτι το οποίο το απλοποιεί και διευκολύνει την διαχείρισή του.

Παράλληλα, έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες σχετικά με την βελτιστοποίηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων όσον αφορά την καθυστέρηση (latency) και την ενέργειά τους (Lifetime) [2], [3], [4], [7], [10]. Η δρομολόγηση ελάχιστων αλμάτων είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η οποία έχει αναλυθεί [11], [12], [13] όπου οι κόμβοι αισθητήρες στέλνουν τα πακέτα δεδομένων τους στο σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας τη διαδρομή που αποτελείται από τον ελάχιστο αριθμό κόμβων αναμετάδοσης. Επιπλέον, η προσέγγιση της ελάχιστης δρομολόγησης αλμάτων χρησιμοποιείται ως βασική περίπτωση για τη σύγκριση επιδόσεων των τεχνικών δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε πολλές μελέτες [14], [15]. Η κοινή παρατήρηση στις μελέτες αυτές σχετικά με την δρομολόγηση ελάχιστων αλμάτων είναι ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής του δικτύου, όταν ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων υιοθετεί την συγκεκριμένη δρομολόγηση.

Ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των αλμάτων και μεγιστοποιώντας την διάρκεια ζωής του δικτύου προκύπτει μια κατάσταση στην οποία καλούμαστε να ισορροπήσουμε αυτά τα δύο μοντέλα με σκοπό την βέλτιστη λειτουργία του δικτύου. Με την ελαχιστοποίηση του αριθμού αλμάτων, ορισμένοι κόμβοι αναγκάζονται να αναμεταδώσουν υπερβολικά μεγάλη ποσότητα κίνησης του δικτύου με αποτέλεσμα, να εξαντλείται γρήγορα η ενέργεια της μπαταρίας τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να εκτελεστεί αποτελεσματικά η εξισορρόπηση ενέργειας για την επίτευξη της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μελετηθεί η μέθοδος που παρουσιάστηκε στην εργασία [1] και θα αναλυθεί η επίπτωση που έχει ο περιορισμός των αλμάτων στην διάρκεια ζωής του δικτύου ασύρματων αισθητήρων. Για τη βελτιστοποίηση του δικτύου εφαρμόζεται ένα μοντέλο μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (Mixed Integer Programming (MIP)) για την επέκταση της διάρκειας λειτουργίας του δικτύου (Lifetime), και την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης (Latency). Στην εφαρμογή του μοντέλου αυτού χρησιμοποιούμε το μοντέλο ισχύος των Mica Motes, το οποίο είναι ένα κοινό μοντέλο απορρόφησης ενέργειας σε δίκτυα αισθητήρων.

2.2 Ανάλυση μοντέλου βελτιστοποίησης του δικτύου

Ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων αντιπροσωπεύεται από ένα γράφημα $G=(V,A)$, όπου V ορίζουμε το σύνολο των κόμβων συμπεριλαμβανομένου του σταθμού βάσης (κόμβος-0), ενώ όπου A ορίζουμε το σύνολο $\{(i, j) : i \in W, j \in V - i\}$. Το σύνολο W περιλαμβάνει τους κόμβους του δικτύου εξαιρώντας τον σταθμό βάσης. Κάθε κόμβος-αισθητήρας γεννά μια πληροφορία η οποία δημιουργεί κίνηση στο δίκτυο και μεταφέρεται στον σταθμό βάσης άμεσα είτε χρησιμοποιώντας άλλους αισθητήρες ως κόμβους αναμετάδοσης. Η κίνηση που δημιουργείται από το κάθε κόμβο και κατευθύνεται από τον κόμβο- i προς τον κόμβο- j ορίζεται ως μια ακέραια μεταβλητή f_{ij}^k . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας σε κάθε κόμβο. Αναλυτικότερα, η απορρόφηση ενέργειας για την μετάδοση ενός bit πληροφορίας υπολογίζεται ανάλογα με την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων και το επίπεδο ενέργειας το οποίο διαθέτουν. Το επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας για την μετάδοση πληροφορίας ορίζεται ως $E_{tx}(l)$ και αντιστοιχίζεται με το ανάλογο επίπεδο απόστασης $R_{max}(l)$. Δεδομένου ότι ένα δίκτυο WSN μπορεί να έχει μεγάλη διασπορά υπάρχουν και περιορισμοί. Ένας από αυτούς είναι ότι αν η απόσταση μεταξύ δύο κόμβων είναι μεγαλύτερη από την απόσταση που μπορεί να μεταδώσει την πληροφορία ο αισθητήρας μας δεν πραγματοποιείται η κίνηση και επομένως αναζητείται γειτονικός κόμβος με αποδεκτή απόσταση. Αυτός ο περιορισμός ορίζεται ως εξής,

$$f_{ij}^k = 0, \text{ if } d_{ij} > R_{max}(l_{max}) \forall (i, j) \in A, \forall k \in W \quad (1).$$

Στο μοντέλο μας υιοθετούμε τα χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης των Mica2 motes (2.2.1), τα επίπεδα ενέργειας, οι αποστάσεις μετάδοσης και η απορρόφηση ενέργειας παρουσιάζονται στο πίνακα παρακάτω.

l	$E_{tx}(l)$	$R_{max}(l)$	l	$E_{tx}(l)$	$R_{max}(l)$
1	671.88	19.30	14	843.75	41.19
2	687.50	20.46	15	867.19	43.67
3	703.13	21.69	16	1078.13	46.29
4	705.73	22.69	17	1132.81	49.07
5	710.94	24.38	18	1135.42	52.01
6	723.96	25.84	19	1179.69	55.13

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

7	726.56	27.39	20	1234.38	58.44
8	742.19	29.03	21	1312.50	61.95
9	757.81	30.78	22	1343.75	65.67
10	773.44	32.62	23	1445.31	69.61
11	789.06	34.58	24	1500.01	73.79
12	812.50	36.66	25	1664.06	78.22
13	828.13	38.86	26(l_{max})	1984.38	82.92

Πίνακας 1. Κατανάλωση ενέργειας ($E_{tx}(l)$ -nJ/bit) και αποστάσεις μετάδοσης ($R_{max}(l)$ -m) ανά επίπεδο ενέργειας (l) για το μοντέλο Mica2 Motes[1].

Η ισχύς της μετάδοσης είναι διακριτή και αντιστοιχεί σε μια τιμή από ένα ορισμένο σύνολο S_L , δηλαδή υπάρχουν μόνο 26 επίπεδα ισχύος τα οποία μπορούμε να επιλέξουμε. Το βέλτιστο επίπεδο ισχύος (l_{opt-ij}) για μετάδοση σε μια απόσταση d_{ij} ορίζεται παρακάτω:

$$l_{opt-ij} = \operatorname{argmin} (E_{tx}(l)) \quad l \in S_L, d_{ij} \leq R_{max}(l) \quad (2).$$

Αναλυτικότερα, αν η απόσταση μεταξύ του κομβου-4 και του κομβου-7 είναι 20 μέτρα, ο κομβος-4 θα χρησιμοποιήσει το επίπεδο ισχύος 2 (l_2) για να μεταδώσει τα δεδομένα του στον κομβο-7 ($E_{tx}(l_{opt-47}) = 687.50$ nJ/bit), επειδή $19.30 \text{ m} < d_{47} \leq 20.46 \text{ m}$. Η απορρόφηση ενέργειας για την λήψη δεδομένων από έναν γειτονικό κόμβο είναι σταθερή και ορίζεται ως $E_{rx} = 922$ nJ/bit.

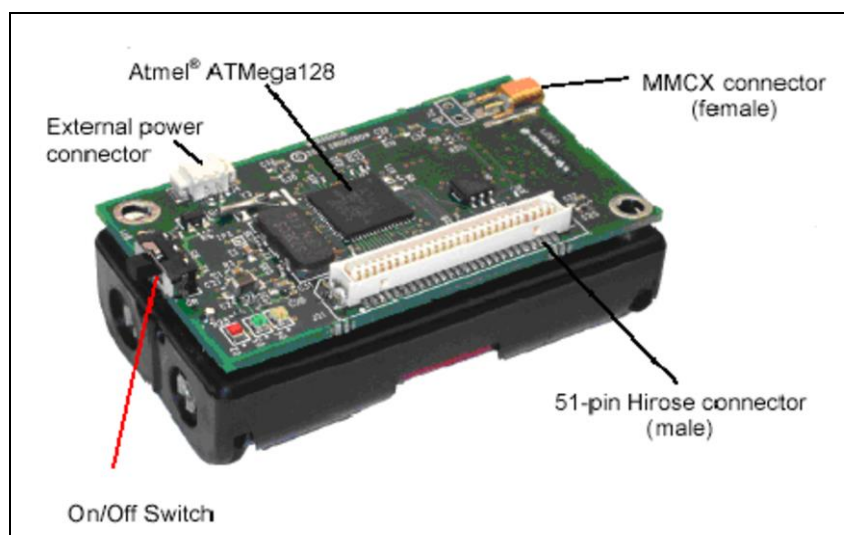
Μεταβλητή	Περιγραφή
N	Αριθμός κόμβων
f_{ij}^k	Η ροή από τον κόμβο- i προς τον κόμβο- j που μεταφέρει δεδομένα που δημιουργήθηκαν στον κόμβο- k (bits)
E_{rx}	Απορρόφηση ενέργειας για την λήψη ενός bit πληροφορίας
d_{ij}	Απόσταση μεταξύ κόμβου- i και του κόμβου- j
$G=(V,A)$	Το γράφημα το οποίο αποτελεί την τοπολογία του δικτύου
V	Σύνολο κόμβων συμπεριλαμβανομένου και του σταθμού βάσης

W	Σύνολο κόμβων εκτός του σταθμού βάσης
A	Σύνολο ακμών
t	Διάρκεια ζωής του δικτύου ανά γύρο
$R_{max}(l_{max})$	Μέγιστη απόσταση μετάδοσης στο μέγιστο επίπεδο ενέργειας
$R_{max}(l)$	Μέγιστη απόσταση μετάδοσης στο επίπεδο ενέργειας (l)
β_{min}	Αριθμός αλμάτων του δικτύου σε κάθε γύρο
L_p	Μέγεθος κάθε πακέτου (1024 bits)
e_i	Μπαταριά κάθε κόμβου αισθητήρα
E_{tx}	Απορρόφηση ενέργειας για την μετάδοση ενός bit πληροφορίας

Πίνακας 2. Μεταβλητές των μοντέλων βελτιστοποίησης του δικτύου[1].

2.2.1 Ασύρματοι αισθητήρες Mica2

Οι ασύρματοι αισθητήρες Mica2 είναι μια τρίτης γενιάς μονάδα που επιτρέπει την ανάπτυξη δικτύων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας [17]. Χρησιμοποιούνται ευρέως στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας για την παρακολούθηση περιβαλλοντολογικών συνθηκών σε διαφορετικές τοποθεσίες. Κάθε κόμβος αισθητήρας έχει την δυνατότητα δρομολόγησης, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Network (WSN)) και επικοινωνεί με τους γειτονικούς αισθητήρες μέσω της κεραίας που διαθέτει. Οι Mica2 διαθέτουν αισθητήρες που μπορούν να δώσουν πληροφορίες για την θερμοκρασία, τον φωτισμό, την επιτάχυνση και την υγρασία. Η λειτουργία τους είναι δυνατή μέσω μπαταριών τύπου AA και λόγω της μικρής κατανάλωσης ενέργειας έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Το λογισμικό TinyOS το οποίο χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό τους είναι ένα ανοιχτού κώδικα και ενεργειακά αποδοτικό λογισμικό που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο UC Berkeley και υποστηρίζει μεγάλης κλίμακας, αυτορρυθμιζόμενα δίκτυα αισθητήρων. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα σταθούμε στην βελτιστοποίηση ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων αποτελούμενο από κόμβους Mica2 σχετικά με την δρομολόγηση ελαχιστοποίησης των αλμάτων (Hops) και την μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας τους (Lifetime).



Εικόνα 4. Ασύρματος αισθητήρας Mica2 [17].

2.3 Μέθοδοι βελτιστοποίησης του δικτύου ασύρματων αισθητήρων

2.3.1 Δρομολόγηση ελάχιστων αλμάτων(minimum hop routing)

Η δρομολόγηση ελάχιστων αλμάτων είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Σε αυτή την τεχνική, οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα τους στον σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας την βέλτιστη διαδρομή που αποτελεί τον ελάχιστο αριθμό κόμβων αναμετάδοσης. Κατά την διάρκεια μετάδοσης δεδομένων μεταξύ των κόμβων του δικτύου, ο κόμβος που διαθέτει την μεγαλύτερη ισχύ αναλαμβάνει την επόμενη αναμετάδοση δεδομένων. Αυτή η τεχνική έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης (Latency) του δικτύου έχοντας αρνητικά αποτελέσματα για την διάρκεια ζωής του. Αυτό συμβαίνει, διότι δεν λαμβάνεται υπόψιν η διαχείριση της ισχύος των αισθητήρων, αλλά και τα βέλτιστα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας ανάλογα με την απόσταση των γειτονικών κόμβων.

2.3.2 Μοντέλο ελάχιστων αλμάτων(minimum hop routing)

Στον [Πίνακα 3](#) παρουσιάζονται οι εξισώσεις που αποτελούν το μοντέλο επίλυσης ελάχιστων αλμάτων. Αναλύοντας το μοντέλο, θέτοντας την μεταβλητή β_{min} ως το συνολικό αριθμό ελάχιστων αλμάτων, η εξίσωση (3) δηλώνει ότι όλα τα δεδομένα που παράγονται από τους κόμβους αισθητήρες τερματίζουν στον σταθμό βάσης. Για να προσδιορίσουμε τον

συνολικό αριθμό αλμάτων θέτουμε ως δεδομένο ότι κάθε κόμβος αισθητήρας παράγει ένα πακέτο δεδομένων με αποτέλεσμα η αθροιστική ανάλυση των ροών να υπολογίζει τον συνολικό αριθμό αλμάτων. Η εξίσωση (4) χρησιμοποιείται για να αποφευχθούν τυχόν βρόχοι στην μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων στην διαδρομή του από τον κόμβο γέννησης προς τον σταθμό βάσης. Παρατηρώντας το δεύτερο μέλος στην εξίσωση (3) είναι μηδέν λόγω της εξίσωσης (4). Η εξίσωση αυτή μας εξασφαλίζει ότι ο κόμβος- k_1 εγχέει μόνο ένα πακέτο δεδομένων στο δίκτυο ως πηγή ροής $f_{ij}^{k_1}$. Επομένως, ο περιορισμός διατήρησης τη ροής f από έναν συγκεκριμένο κόμβο- k_1 μπορεί να αποτυπωθεί ως $\sum_{j \in V, j \neq i} f_{k_1 j}^{k_1} = 1$ και για τον σταθμό βάσης

ως $\sum_{j \in W, j \neq i} f_{j 0}^{k_1} = -1$. Άρα, ο σταθμός βάσης δεν μπορεί να στείλει πακέτα δεδομένων σε άλλους

κόμβους, επομένως ο πρώτος όρος στην εξίσωση (3) είναι μηδέν. Στην περίπτωση που ένα πακέτο δεδομένων ληφθεί από έναν γειτονικό κόμβο- k_1 προς την ροή $f_{ij}^{k_1}$ πρέπει να αναμεταδοθεί στο δίκτυο είτε σε άλλον κόμβο αισθητήρα είτε προς την στον σταθμό βάσης. Ο περιορισμός διατήρησης τη ροής για αυτήν την περίπτωση αναπαρίσταται ως $\sum_{j \in V, j \neq i} f_{ij}^{k_1} -$

$\sum_{j \in W, j \neq i} f_{ji}^{k_1} = 0$. Η εξίσωση (5) χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το σύνολο των ελάχιστων αλμάτων του δικτύου. Τέλος, η εξίσωση (6) αποτρέπει την ύπαρξη αρνητικών ροών στο δίκτυο.

Minimize β_{min}

$$\sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} f_{ij}^k - \sum_{\substack{j \in W \\ i \neq j}} f_{ji}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } i = k \\ -1 & \text{if } i = 0 \\ 0 & \text{else o.w.} \end{cases}$$

$$\forall i \in A, \forall k \in W \quad (3)$$

$$\sum_{j \in W} f_{jk}^k = 0 \quad \forall k \in W \quad (4)$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} \sum_{k \in W} f_{ij}^k = \beta_{min} \quad (5)$$

$$f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in W \quad (6)$$

Πίνακας 3. Μοντέλο ελαχιστοποίησης των αλμάτων (β_{min}) του δικτύου[1].

2.3.3 Μοντέλο μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής(maximizing lifetime)

Το μοντέλο του [Πίνακα 4](#) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής (t) του ασύρματου δικτύου αισθητήρων λαμβάνοντας ως περιορισμό τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων β_{min} . Η εξίσωση (7) καθορίζει τον περιορισμό εξισορρόπησης ροής. Κάθε κόμβος αισθητήρας παράγει ένα μοναδικό πακέτο δεδομένων κάθε φορά και κατά τη διάρκεια ζωής του δικτύου κάθε κόμβος παράγει ποσότητα πακέτων δεδομένων που αντιστοιχεί στο (t). Στο μοντέλο αυτό η διάρκεια ζωής υπολογίζεται με βάση πόσους φορές μπορεί το δίκτυό μας να παράγει πακέτα δεδομένων. Στην εξίσωση (7) παρατηρούμε ότι η μόνη διαφορά με την εξίσωση (3) είναι ότι αντικαθιστούμε για τις πρώτες δύο περιπτώσεις την 1 και -1 με την t και $-t$ αντίστοιχα. Η λειτουργία της ως περιορισμός εξισορρόπησης ροής μας εξασφαλίζει ότι ο κόμβος- k_1 εγχείει t πακέτα δεδομένων συνολικά στο δίκτυο ως πηγή ροής $f_{ij}^{k_1}$ και ότι όλα αυτά τα πακέτα τερματίζουν στον σταθμό βάσης. Η διαφορά των εισερχομένων και εξερχομένων ροών για όλους τους κόμβους αισθητήρες εκτός από τον κόμβο- k_1 είναι ίσος με το μηδέν. Με αυτόν τον τρόπο, κανένα πακέτο δεν θα χαθεί στην διαδρομή του από τον κόμβο γέννησης προς τον σταθμό βάσης.

Η εξίσωση (9) δηλώνει ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας σε κάθε κόμβο περιορίζεται από την ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται στις μπαταρίες των αισθητήρων (e_i). Η σταθερά L_p αναπαριστά το μέγεθος των πακέτων δεδομένων σε bits και έχει τιμή ίση με 1024 bits. Προχωρώντας στην εξίσωση (10) κάθε κόμβος αισθητήρας λαμβάνει ως αρχική ενέργεια ίση με (ξ) στην αρχή της λειτουργίας του δικτύου. Η σταθερά (ξ) έχει τιμή 25 KJ. Η εξίσωση (11) υπολογίζει την διάρκεια ζωής του δικτύου με περιορισμό τον συνολικό αριθμό αλμάτων.

Maximize t

$$\sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} f_{ij}^k - \sum_{\substack{j \in W \\ i \neq j}} f_{ji}^k = \begin{cases} t & \text{if } i = k \\ -t & \text{if } i = 0 \\ 0 & \text{else o. w.} \end{cases}$$

$$\forall i \in A, \forall k \in W \quad (7)$$

$$\sum_{j \in W} f_{jk}^k = 0 \quad \forall k \in W \quad (8)$$

$$L_P \sum_{k \in W} \left(\sum_{j \in V} E_{tx,ij}^{opt} f_{ij}^k + E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji}^k \right) \leq e_i$$

$$\forall i \in W \quad (9)$$

$$e_i = \xi \quad \forall i \in W \quad (10)$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V} \sum_{k \in W} f_{ij}^k = \beta_{min} \times t \quad (11)$$

$$f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in W \quad (12)$$

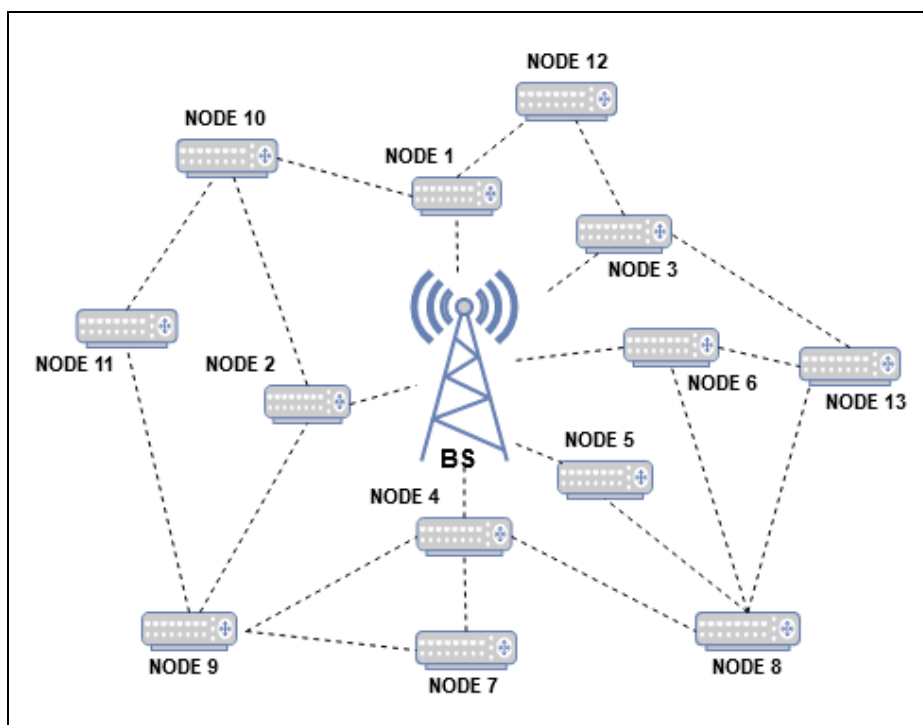
Πίνακας 4. Μοντέλο μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής (t) του δικτύου[1].

2.4 Υπολογισμός αλμάτων και διάρκειας ζωής

Προκειμένου να υπολογίσουμε με βάση τα μοντέλα αυτά των ελάχιστο αριθμό αλμάτων, αρχικά, ακολουθούμε τις εξισώσεις του μοντέλου στον Πίνακα 3. Εφόσον υπολογιστεί η τιμή β_{min} , μπορούμε να υπολογίσουμε την διάρκεια ζωής του δικτύου αυτού. Υιοθετούμε τις εξισώσεις του μοντέλου της μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής λαμβάνοντας ως περιορισμό την τιμή β_{min} έτσι ώστε να υπολογίσουμε την διάρκεια ζωής του δικτύου με προτεραιότητα την ελαχιστοποίηση των αλμάτων. Στην περίπτωση που θέλουμε να υπολογίσουμε την μέγιστη διάρκεια ζωής ενός δικτύου μη λαμβάνοντας υπόψιν των αριθμό αλμάτων ακολουθούμε το μοντέλο του Πίνακα 4 αφαιρώντας από το μοντέλο επίλυσης την εξίσωση (11). Εφόσον έχει βρεθεί πλέον η μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των αλμάτων για την συγκριμένη τιμή t , επιλύοντας το μοντέλο, έχοντας ως δεδομένο σύμφωνα με την εξίσωση (11) την μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου.

2.5 Ανάλυση τοπολογίας δικτύου ασύρματων αισθητήρων

Για την ρεαλιστική απεικόνιση της τοπολογίας του δικτύου και την μαθηματική επίλυση του χρησιμοποιούμε την πλατφόρμα MATLAB και το Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης (GAMS) με τον αλγόριθμο CPLEX για την αριθμητική επίλυση των μοντέλων. Με σκοπό την δημιουργία της τοπολογίας ορίζουμε ένα νοητό κυκλικό δίκτυο με ακτίνα R_{net} το οποίο περιέχει N αριθμό κόμβων αισθητήρων οι οποίοι τοποθετούνται τυχαία μέσα στον δίσκο. Προκειμένου να τοποθετήσουμε τυχαία τους κόμβους χρησιμοποιούμε ομοιόμορφη κατανομή (uniform distribution) για να προσδιορίσουμε τις θέσεις τους μέσα στο δίκτυο που θα δημιουργήσουμε. Η θέση κάθε κόμβου εκφράζεται σε πολικές συντεταγμένες με τη γωνία (θ_n) και την ακτίνα του (r_n). Η γωνία καθορίζεται από ομοιόμορφη τυχαία κατανομή με όρια $[0, 2\pi]$. Για να προσδιορίσουμε την ακτίνα, πρώτα υπολογίζουμε την τιμή r_{n0} , από την τυχαία κατανομή με τα όρια $[0, 1]$ και στην συνέχεια υπολογίζουμε την ακτίνα χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο: $r_n = R_{net} \sqrt{r_{n0}}$. Με αυτόν τον τρόπο, ο σταθμός βάσης βρίσκεται στο κέντρο του δικτύου και οι κόμβοι αισθητήρες τοποθετούνται περιμετρικά. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί ο κώδικας που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα MATLAB και GAMS στα πλαίσια της απεικόνισης και επίλυσης της βελτιστοποίησης του δικτύου ασύρματων αισθητήρων που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό.



Εικόνα 5. Αναπαράσταση τοπολογίας WSN.

3. Ανάλυση κώδικα δημιουργίας και επίλυσης του δικτύου

3.1 Ανάλυση κώδικα στη πλατφόρμα MATLAB

3.1.1 Τοποθέτηση κόμβων και υπολογισμός αποστάσεων

Σύμφωνα με την [Εικόνα 6](#) για να τοποθετήσουμε τυχαία τους κόμβους στο δίκτυο αρχικά παίρνουμε ως δεδομένα τον αριθμό των κόμβων N και την ακτίνα του δικτύου R_{net} . Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ακτίνας r_n που αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε την συνάρτηση *calculate Distance* για να υπολογίσουμε την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων, η οποία λαμβάνει ως δεδομένα τις τιμές που έχουν παραχθεί τυχαία με ομοιόμορφη κατανομή και έχουν τοποθετηθεί στον πίνακα *nodes*. Στην πρώτη στήλη του πίνακα *nodes* τοποθετούμε τυχαίες ομοιόμορφα κατανομημένες τιμές με όρια $[0, 2\pi]$ που αποτελούν την γωνία θ_n του κόμβου και στην δεύτερη στήλη με όρια $[0, 1]$ την ακτίνα r_n . Ο πίνακας *nodes* περιλαμβάνει N γραμμές όσοι και οι κόμβοι αισθητήρες του δικτύου. Για να μπορέσουμε να διαχειριστούμε την τοπολογία που θα δημιουργήσουμε τοποθετούμε στο πίνακα *distances* την τιμή η οποία προκύπτει από την κλήση της συνάρτησης *calculate Distance*. Η διαδικασία θα επαναληφθεί για όλους τους κόμβους ξεχωριστά με την χρήση δύο επαναλήψεων υπολογίζοντας την απόσταση μεταξύ όλων των κόμβων του δικτύου.

```
n= N;
Rnet= R;
rn=@(rn0) Rnet*sqrt(rn0);
calculateDistance=@(theta1,theta2,r1,r2)...
    sqrt(r1^2+r2^2-(2*r1*r2*cos(theta1-theta2)));
rng shuffle
nodes=rand(n,2);
nodes(:,1)=nodes(:,1)*(2*pi);
nodes(:,2)=rn(nodes(:,2));
distance=zeros(n);
for i=1:n
    for j=1:n
        distance(i,j)=calculateDistance(nodes(i,1),...
            nodes(j,1), nodes(i,2), nodes(j,2));
    end
end
```

Εικόνα 6. Τοποθέτηση και υπολογισμός κόμβων στην τοπολογία δικτύου.

3.1.2 Δημιουργία συνόλων δικτύου

Αναλύοντας την συνέχεια του κώδικα της [Εικόνας 7](#) διαβάζουμε τα επίπεδα ενέργειας $E_{tx}(l)$ και $R_{max}(l)$ που αναγράφονται στον [Πίνακα 1](#) του Κεφαλαίου 2, από τα συγκεκριμένα αρχεία και τοποθετούμε τα δεδομένα στους αντίστοιχους πίνακες E_{tx} και R_{max} . Με βάση αυτά τα επίπεδα θα οριοθετήσουμε τις αποδεκτές αποστάσεις επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων αισθητήρων και τα κατάλληλα επίπεδα απορρόφησης ενέργειας για τις συγκεκριμένες αποστάσεις. Έπειτα δημιουργούμε το αρχείο *Nodes*, το οποίο περιέχει το σύνολο των κόμβων συμπεριλαμβανομένου του σταθμού βάσης V και το σύνολο των κόμβων αισθητήρων εκτός του σταθμού βάσης W για να το χρησιμοποιήσουμε στην επίλυση του μοντέλου μας στην πλατφόρμα GAMS. Αυτά τα σύνολα θα αποτελέσουν την αρχική βάση για να επιλύσουμε, τα μοντέλα ελαχιστοποίησης αλμάτων και μεγιστοποίησης διάρκειας λειτουργίας, που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2.

```

fileID = fopen('C:\Users\Nikos\Desktop\PAPER\Rmax.txt','r');
    Rmax = textscan(fileID,'%f','Delimiter',' ');
    Rmax = Rmax{1};
fclose(fileID);
fileID = fopen('C:\Users\Nikos\Desktop\PAPER\Etx.txt','r');
    Etx = textscan(fileID,'%f','Delimiter',' ');
    Etx = Etx{1};
fclose(fileID);
fileID=fopen('C:\Users\Nikos\Desktop\PAPER\Nodes.txt','w');
    fprintf(fileID,' V          allnodes          / ');
    for i=1:n
        fprintf(fileID,'node-%d, ',i);
    end
    fprintf(fileID,'node-0');
    fprintf(fileID,'/>\n');
    fprintf(fileID,' W(V)          exceptBase          / ');
    for i=1:n-1
        fprintf(fileID,'node-%d, ',i);
    end
    fprintf(fileID,'node-%d',n);
    fprintf(fileID,'/>\n');
fclose(fileID);

```

Εικόνα 7. Εισαγωγή δεδομένων $E_{tx}(l)$ και $R_{max}(l)$ και δημιουργία αρχείου Nodes.

3.1.3 Αποθήκευση επίπεδων απορρόφησης ενέργειας των μονοπατιών επικοινωνίας

Παρατηρώντας τον κώδικα της [Εικόνας 8](#) το επόμενο βήμα στη δημιουργία της τοπολογίας του δικτύου ασύρματων αισθητήρων είναι να καθορίσουμε τα επίπεδα απορρόφησης ενέργειας με τις ανάλογες αποστάσεις. Δημιουργώντας το αρχείο *Out of Range Distances* αποθηκεύουμε τα μονοπάτια μεταξύ δύο κόμβων που δεν μπορούν να επικοινωνήσουν με τον σταθμό βάσης λόγω απόστασης ($d_{i0} > 82.92$ m). Για κάθε κόμβο αισθητήρα ελέγχουμε με μια συνθήκη If , αν η τιμή που παράχθηκε με ομοιόμορφη τυχαία κατανομή στα όρια $[0, 2\pi]$ είναι μεγαλύτερη από το ανώτερο επίπεδο (l^{26}) στον [Πίνακα 1](#), του $R_{max}(l)$. Εάν η συνθήκη αληθεύει, τοποθετούμε την τιμή μηδέν στο μονοπάτι από τον κόμβο- i προς τον σταθμό βάσης node-0 σύμφωνα με την εξίσωση (1) που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2.

Στη συνέχεια, αρχικοποιούμε τον πίνακα *optimal Energy*, για να τοποθετήσουμε το κατάλληλο επίπεδο απορρόφησης ενέργειας για κάθε κόμβο αισθητήρα που έχει την δυνατότητα να επικοινωνήσει με τους γειτονικούς του. Η δημιουργία του αρχείου *Etx Opt Table* εξυπηρετεί την αποθήκευση αυτών των επιπέδων σε ένα ξεχωριστό αρχείο για να χρησιμοποιηθεί στην αριθμητική ανάλυση του δικτύου. Χρησιμοποιώντας δύο επαναλήψεις for υπολογίζουμε για κάθε κόμβο- i έως N ξεχωριστά το κατάλληλο επίπεδο απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με την απόσταση που έχει από κάθε κόμβο- j έως N του υπόλοιπου δικτύου. Καθώς έχουμε καθορίσει το μονοπάτι για το οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε (κόμβο- i προς κόμβο- j), τοποθετούμε την τιμή απορρόφησης ενέργειας η οποία έχει επιστραφεί από την εκτέλεση της συνάρτησης *find Optimal Energy Level*.

Επίσης, χρειάζεται να καθοριστεί το επίπεδο απορρόφησης ενέργειας για τους κόμβους που μπορούν να επικοινωνήσουν με τον σταθμό βάσης απευθείας χωρίς να χρησιμοποιηθεί άλλος κόμβος για αναμετάδοση. Καλούμε την συνάρτηση *find Optimal Energy Level* δίνοντας ως δεδομένο την τιμή στην δεύτερη στήλη του πίνακα nodes που αντιπροσωπεύει την απόσταση του κάθε κόμβου στο δίκτυο από τον σταθμό βάσης και τους πίνακες Etx και Rmax. Εφόσον υπολογιστεί η τιμή από την συνάρτηση την τοποθετούμε στο συγκεκριμένο μονοπάτι (κόμβο- i προς κόμβο-0).

```

fileID=fopen('C:\Users\Nikos\Desktop\PAPER\OutOfRangeDistances.txt','w');
for i=1:n
    if (nodes(i,2)>Rmax(length(Rmax)))
        fprintf(fileID,'f.fx(\"node-%d\", \"node-0\",k) = 0;\n',i);
    end
    for j=1:n
        if (distance(i,j) > Rmax(length(Rmax)))
            fprintf(fileID,'f.fx(\"node-%d\", \"node-%d\",k) = 0;\n',i,j);
        end
    end
end
fclose(fileID);
optimalEnergy=zeros(n);
fileID=fopen('C:\Users\Nikos\Desktop\PAPER\EtxOptTable.txt','w');
for i=1:n
    for j=i:n
        [optimalEnergy(i,j),err]=findOptimalEnergyLevel(Etx,Rmax,distance(i,j));
        if err==0
            fprintf(fileID,'EtxOpt(\"node-%d\", \"node-%d\") = %f;\n',i,j,...
                optimalEnergy(i,j));
        end
    end
    [eLevel, err]=findOptimalEnergyLevel(Etx,Rmax,nodes(i,2));
    if err==0
        fprintf(fileID,'EtxOpt(\"node-%d\", \"node-0\") = %f;\n',i,eLevel);
    end
end
fclose(fileID);

```

Εικόνα 8. Δημιουργία αρχείου Out of Range Distances και υπολογισμός επιπέδου απορρόφησης ενέργειας Etx Opt Table.

3.1.4 Υπολογισμός επιπέδων απορρόφησης ενέργειας στα μονοπάτια επικοινωνίας

Η συνάρτηση *find Optimal Energy Level*, όπως απεικονίζεται στην [Εικόνα 9](#), εξυπηρετεί τον υπολογισμό των επιπέδων απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων αισθητήρων. Ως ορίσματα λαμβάνει τους πίνακες Etx και Rmax που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2 και την απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων. Με την χρήση της επανάληψης for ελέγχουμε αν η απόσταση μεταξύ των κόμβων είναι μικρότερη από κάθε επίπεδο του πίνακα Rmax, ο οποίος περιέχει τα 26 επίπεδα αποστάσεων (l^{26}). Μόλις βρεθεί η κατάλληλη απόσταση, μεταθέτουμε στην μεταβλητή *EtxOpt* το συγκεκριμένο επίπεδο απορρόφησης ενέργειας, που απαιτείται για την μετάδοση του πακέτου πληροφορίας σε αυτήν την απόσταση. Η μεταβλητή

error σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνει την τιμή μηδέν υποδεικνύοντας ότι δεν υπάρχει πρόβλημα επικοινωνίας μεταξύ αυτού του μονοπατιού (κόμβο-*i* προς κόμβο-*j*). Οι δύο μεταβλητές αυτές θα επιστραφούν ως δεδομένα στον κύριο κώδικα, για να τοποθετηθεί το κατάλληλο επίπεδο ενέργειας σε κάθε ένα μονοπάτι μεταξύ των δύο κόμβων.

Στην περίπτωση που η απόσταση είναι μεγαλύτερη από το ανώτερο επίπεδο του πίνακα Rmax (82,92 m) η μεταβλητή *Etx Opt* λαμβάνει την τιμή -1 και η μεταβλητή error την τιμή 1. Με αυτόν τον τρόπο, αποτρέπουμε την επικοινωνία αυτών των κόμβων λόγω της εξίσωσης (6) που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, διότι δεν επιτρέπεται η ύπαρξη αρνητικών ροών στο δίκτυο. Η μετάθεση της τιμής 1 στην μεταβλητή error αποτρέπει την ανάθεση επιπέδου απορρόφησης ενέργειας στο αρχείο *Etx Opt Table*, εφόσον μόνο τα μονοπάτια τα οποία δεν έχουν πρόβλημα επικοινωνίας μπορούν να μεταδώσουν ένα πακέτο πληροφορίας.

```
function[EtxOpt,error]=findOptimalEnergyLevel(Etx, Rmax, R)
    lmax=length(Rmax);
    for l=1:lmax
        if R < Rmax(l)
            EtxOpt=Etx(l);
            error=0;
            return;
        end
    end
    error=1;
    EtxOpt=-1;
end
```

Εικόνα 9. Συνάρτηση find Optimal Energy Level.

3.1.5 Δημιουργία γραφήματος της τοπολογίας δικτύου και εκτέλεση της αριθμητικής ανάλυσης

Η αναπαράσταση του δικτύου μας γίνεται με τη βοήθεια γραφήματος έτσι ώστε να έχουμε μια ρεαλιστική εικόνα της τοπολογίας του δικτύου ασύρματων αισθητήρων. Σύμφωνα με την [Εικόνα 10](#), αρχικοποιούμε τον πίνακα *f* για να τοποθετήσουμε στην συνέχεια τις τιμές που θα λάβουμε ως δεδομένα για την κατασκευή του γραφήματος. Με την χρήση δύο επαναλήψεων for ελέγχουμε αν η απόσταση κάθε μονοπατιού μεταξύ δύο κόμβων είναι μικρότερη από 82,92 m έτσι ώστε να γίνει η αναπαράσταση επικοινωνίας. Επίσης, στην συνθήκη ένας ακόμα περιορισμός είναι να υπάρχει απόσταση μεταξύ των κόμβων διάφορη του μηδενός για να αποφύγουμε την αναπαράσταση επικοινωνίας ενός κόμβου αισθητήρα με τον εαυτό του.

Εφόσον ικανοποιηθεί η συνθήκη, αναθέτουμε την τιμή 1 στον πίνακα f για τα μονοπάτια τα οποία επιτρέπεται η επικοινωνία για την μεταφορά δεδομένων και την τιμή 0 σε αυτά τα οποία η απόσταση δεν καθιστά δυνατή την επικοινωνία. Με την χρήση της συνάρτησης `graph` αναπαριστούμε το γράφημα της τοπολογίας του δικτύου που δημιουργήθηκε.

Ολοκληρώνοντας τον κώδικα μέσω της πλατφόρμας MATLAB με την χρήση ενός αρχείου *batch*, καλούμε την εκτέλεση του κώδικα που έχει αναπτυχθεί στο Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης (GAMS) για την αριθμητική επίλυση του δικτύου που έχει δημιουργηθεί.

```
f=zeros(n);
for i = 1:n
    for j = 1:n

        if (distance(i,j)<82.92 && distance(i,j)~=0 )
            f(i,j) = 1;
        else
            f(i,j) = 0;
        end
    end
end

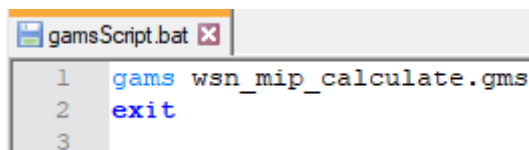
G = graph(f);
h = plot(G, 'LineWidth',0.01);
highlight(h, (1:n))
highlight(h, (1:n), 'nodecolor','r')

cd 'C:\Users\Nikos\Desktop\ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ\PAPER WSN LATENCY LIFETIME';
cmd = 'gamsScript';
system(cmd);
pause(1);
```

Εικόνα 10. Δημιουργία γραφήματος της τοπολογίας, εκτέλεση batch file.

3.1.6 Αρχείο εκτέλεσης προσκηνίου

Εφόσον ολοκληρωθεί η εκτέλεση του κώδικα στη MATLAB, καλείται να εκτελεστεί ένα αρχείο *batch* στο προσκήνιο. Δίνοντας την εντολή `cmd` και το όνομα του αρχείου καταφέρνουμε να εκτελέσουμε την αριθμητική ανάλυση των μοντέλων μας στο GAMS. Με την ολοκλήρωση της αριθμητικής ανάλυσης η εντολή `exit` τερματίζει την διαδικασία στο προσκήνιο για να εκτελεστεί η επόμενη επίλυση με τον υπολογισμό την νέας τοπολογίας του δικτύου μας.



```
gamsScript.bat
1 gams wsn_mip_calculate.gms
2 exit
3
```

Εικόνα 11. Αρχείο εκτέλεσης batch .

3.2 Αριθμητική επίλυση στη πλατφόρμα GAMS



Εικόνα 12. GAMS logo.

Το Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης [16] (General Algebraic Modeling System (GAMS)) είναι ένα υψηλού επιπέδου σύστημα μοντελοποίησης για τον μαθηματικό προγραμματισμό και την βελτιστοποίηση μοντέλων. Αποτελείται από έναν μεταγλωττιστή γλώσσας προγραμματισμού και από ένα σύνολο αλγορίθμων επίλυσης υψηλής απόδοσης. Το GAMS είναι κατάλληλο για την επίλυση πολύπλοκων εφαρμογών μοντελοποίησης μεγάλης κλίμακας και επιτρέπει να δημιουργούμε μεγάλα μαθηματικά μοντέλα τα οποία μπορούν να ανταποκριθούν εύκολα σε αλλαγές όσον αφορά τα μοντέλα που δημιουργούμε προς επίλυση.

Το GAMS εξυπηρετεί την μοντελοποίηση προβλημάτων γραμμικής, μη γραμμικής και μεικτής ακέραιης βελτιστοποίησης (linear, nonlinear and mixed integer). Πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για την επίλυση του WSN δικτύου μας είναι η δυνατότητα να διαμορφώνουν μαθηματικά μοντέλα με τρόπο παρόμοιο ως αναφορά την μαθηματική τους περιγραφή.

3.2.1 Ορισμός συνόλων δικτύου ασύρματων αισθητήρων

Καθώς μεταφερόμαστε από την πλατφόρμα MATLAB όπου δημιουργήθηκε η τοπολογία του δικτύου ασύρματων αισθητήρων στην πλατφόρμα GAMS με την εκτέλεση ενός batch αρχείου στο προσκήνιο, αρχικοποιούμε τα σύνολα των κόμβων. Εφόσον έχουμε δημιουργήσει το αρχείο Nodes προηγουμένως εισάγουμε τα σύνολα V και W . Αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι το σύνολο V περιλαμβάνει τον αριθμό των κόμβων N συμπεριλαμβανομένου και του σταθμού βάσης ($N+1$), ενώ στο σύνολο W δεν λαμβάνουμε υπόψιν αυτήν την παράμετρο

ορίζοντας το σύνολο των κόμβων ίση με N . Προκειμένου να μπορέσουμε να διαχειριστούμε τους περιορισμούς και τα σύνολα που αναγράφονται στις εξισώσεις των μοντέλων μας εκμεταλλευόμαστε τα σύνολα V, W για να δημιουργήσουμε καινούρια υποσύνολα τους (sets).

Αναθέτουμε το σύνολο V στα υποσύνολα i και $j2$. Έπειτα, τα υποσύνολα i και $j2$ αναθέτονται στα υποσύνολα τους $i2$ και j αντίστοιχα ορίζοντας να λάβουν τιμές που αντιστοιχούν στο σύνολο W . Στο υποσύνολο k αναθέτονται οι τιμές του συνόλου W και θα λειτουργήσει στις εξισώσεις μας ως δείκτης, για τον κόμβο γέννησης του πακέτου πληροφορίας που μεταδίδεται μέσω των κόμβων στο δίκτυο μας.

Ορίζουμε ως παράμετρο τον πίνακα $EtxOpt$ στον οποίο αναθέτονται τα υποσύνολα i και $j2$. Σε αυτόν τον πίνακα, αποθηκεύουμε τις τιμές των κατάλληλων επίπεδων απορρόφησης ενέργειας για κάθε μονοπάτι μεταξύ δυο κόμβων από το αρχείο $Etx Opt Table$ που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Αναθέτοντας τα υποσύνολα i και $j2$ στον πίνακα ως πεδίο τιμών αποτρέπεται η ύπαρξη κίνησης πακέτων πληροφορίας από τον σταθμό βάσης σε άλλον κόμβο αισθητήρα.

Στην συνέχεια, ορίζονται οι σταθερές τιμές του μοντέλου Lp , $Init Energy$ και Erx . Η σταθερά Lp αντικατοπτρίζει το μέγεθος ενός πακέτου δεδομένων σε bits και έχει τιμή ίση με 1024. Σταθερή είναι η ισχύ που έχουν αποθηκευμένη οι αισθητήρες που αποτελούν το δίκτυο και είναι ίση με 25 KJ. Με αυτήν την ισχύ θα παράγουν το δικό τους πακέτο πληροφορίας και θα αναμεταδώσουν πακέτα από άλλους κόμβους στη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου. Η ενέργεια που χρειάζεται για να γίνει η λήψη ενός πακέτου πληροφορίας από έναν αισθητήρα δεν επηρεάζεται από την απόσταση των δύο κόμβων και είναι η σταθερά Erx η οποία ορίζεται στα 922 nano Joules.

```
Sets
$include C:\Users\Nikos\Desktop\PAPER\Nodes.txt
    i (V)      bigI      / #V /
    i2 (i)     smallI    / #W /

    j2 (V)     bigJ      / #V /
    j (j2)     smallJ    / #W /

    k (W)      smallK    / #W /;

Parameter EtxOpt(i,j2) 'Optimal energy values for node-i to node-j';
$include C:\Users\Nikos\Desktop\PAPER\EtxOptTable.txt

Scalar Lp      data packet size in bits /1024/;
Scalar InitEnergy initial energy /25000/;
Scalar Erx     Energy dissipation for reception of data;
Erx=922;
```

Εικόνα 13. Ορισμός συνόλων και σταθερών.

3.2.2 Ορισμός μεταβλητών και εξισώσεων του μοντέλου WSN

Στο μοντέλο αυτό ορίζουμε ως μεταβλητές $bmin2$ και $t2$ τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων και τη διάρκεια ζωής του δικτύου αντίστοιχα. Αυτές αποτελούν τις δύο κύριες τιμές που θα υπολογιστούν σε κάθε μοντέλο για την ανάλυση και την βελτιστοποίηση του δικτύου ασύρματων αισθητήρων (WSN). Λαμβάνοντας υπόψιν την εξίσωση (6) που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 ορίζουμε ως θετική μεταβλητή f το μέγεθος της πληροφορίας, που παράχθηκε στον κόμβο- k και μεταφέρεται από τον κόμβο- i στον κόμβο- j . Ως ορίσματα της μεταβλητής f θέτουμε τρία σύνολα V, V και W αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η μεταβλητή από τις εξισώσεις, όπως αυτές έχουν σχεδιαστεί για την αριθμητική επίλυση που απαιτεί το μοντέλο. Ορίζουμε την μεταβλητή e ως την διαθέσιμη ισχύ που έχει κάθε κόμβος αισθητήρας σύμφωνα με την εξίσωση (10) και της αναθέτουμε το σύνολο $i2$ το οποίο περιλαμβάνει το πεδίο τιμών του συνόλου W .

Με την λέξη κλειδί Equations δηλώνουμε τις εξισώσεις που περιλαμβάνει το μοντέλο προς επίλυση. Στην πρώτη εξίσωση ορίζουμε ως πεδίο τιμών τα υποσύνολα i και k που περιέχουν τα πεδία τιμών των συνόλων V και W αντίστοιχα σύμφωνα με την εξίσωση (3) του μοντέλου (Πίνακας 3). Με τα συγκεκριμένα υποσύνολα ορίζουμε και την εξίσωση (5) η οποία αντιστοιχεί στην εξίσωση (7) (Πίνακας 4). Η εξίσωση (2) αντικατοπτρίζει τις εξισώσεις (4) και (8) (Πίνακας 3,4) και αναθέτουμε το πεδίο τιμών του υποσυνόλου k . Ο ελάχιστος αριθμός αλμάτων θα υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης (3) σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο. Οι εξισώσεις (6) και (11) (Πίνακας 3,4) αναθέτονται στην εξίσωση (4) στην οποία ορίζονται ως πεδίο τιμών τα υποσύνολα $i2, j2$ και k στα οποία αντιστοιχούν τα πεδία τιμών των συνόλων W, V και W . Ίδιο πεδίο τιμών αναθέτονται στις εξισώσεις (6) και (7) που αντικατοπτρίζουν της εξισώσεις (9) και (10) του μοντέλου (Πίνακας 4). Η εξίσωση (8) και (9) στον κώδικα αναπαριστούν την εξίσωση (11), έχουν την ίδια μορφή, αλλά χρησιμοποιούνται η κάθε μία ξεχωριστά για τον υπολογισμό μιας συγκεκριμένης τιμής.

```

Positive Variable f(V,V,W);
#include C:\Users\Nikos\Desktop\PAPER\OutOfRangeDistances.txt
Variable e(i2);
Variable bmin2 bmin in integer form;
Variable t2 t in integer form;
Equations
    eq1(i,k)          equation number 1(3)
    eq2(k)            equation number 2(4 and 8)
    eq3               equation number 3(5)
    eq4(i2,j2,k)     equation number 4(6 and 12)
    eq5(i,k)          equation number 5(7)
    eq6(i2)           equation number 6(9)
    eq7(i2)           equation number 7(10)
    eq8               equation number 8(11-bmin)
    eq9               equation number 9(11-bmax);

```

Εικόνα 14. Ορισμός μεταβλητών και εξισώσεων.

3.2.3 Αναπαράσταση εξισώσεων μοντέλου ελαχιστοποίησης αλμάτων

Εφόσον έχουν πραγματοποιηθεί οι ορισμοί, αναπαριστούμε τις εξισώσεις του μοντέλου επίλυσης ελάχιστων αλμάτων ([Πίνακας 3](#)). Σύμφωνα με το μοντέλο, η διαφορά των συνόλων με δεδομένα την ροή από τον κόμβο- i προς τον κόμβο- $j2$ και όριο το υποσύνολο $j2$ με την ροή από τον κόμβο- $j2$ προς τον κόμβο- i και όριο το υποσύνολο j , πρέπει να είναι ίση με την τιμή που αναγράφεται σε κάθε συνθήκη. Στην περίπτωση που ο κόμβος- i είναι ο ίδιος με τον κόμβο γέννησης της πληροφορίας η διαφορά της ροής πρέπει να είναι ίση με 1. Αν ο κόμβος- i είναι ο ίδιος με τον σταθμό βάσης, τότε η διαφορά των ροών πρέπει να είναι ίση με -1. Με αυτόν τον τρόπο, αποτρέπουμε την μετάδοση πακέτων πληροφορίας από τον σταθμό βάσης προς έναν κόμβο αισθητήρα. Σε περίπτωση που καμία από τις δύο συνθήκες δεν ικανοποιηθεί η διαφορά πρέπει να είναι ίση με την τιμή μηδέν.

Η εξίσωση (2) αποτρέπει την ύπαρξη βροχών στο δίκτυο υποχρεώνοντας την ροή από τον κόμβο- j προς τον κόμβο- k να είναι μηδέν διότι ως κόμβος- k χαρακτηρίζεται ο αισθητήρας που γεννήθηκε το πακέτο πληροφορίας.

Ο ελάχιστος αριθμός αλμάτων υπολογίζεται με την εξίσωση (3) η οποία προσθέτει τα σύνολα με όρια τα $i2$, $j2$ και k για τις ροές από το κόμβο- $i2$ προς τον κόμβο- $j2$ και μεταθέτει την τιμή στην ελεύθερη μεταβλητή $bmin2$.

Με την εξίσωση (4) δηλώνουμε ότι καμία ροή από τον κόμβο- i προς τον κόμβο- j δεν πρέπει να είναι αρνητική, επομένως αποφεύγουμε την δημιουργία βροχών μεταξύ δυο κόμβων στο δίκτυο.

```

*model-1 equations
eq1(i,k).. sum(j2 $(not sameas(i,j2)),f(i,j2,k))-sum(j $(not
  sameas(i,j)),f(j,i,k))=e=0-1$(sameas(i,"node-0"))+1$(sameas(i,k));

eq2(k).. sum(j, f(j,k,k)) =e= 0 ;
eq3.. sum(i2, sum(j2, sum(k, f(i2,j2,k)))) =e= bmin2 ;
eq4(i2,j2,k).. f(i2,j2,k) =g= 0;
    
```

Εικόνα 15. Εξισώσεις για τον υπολογισμό ελάχιστων αλμάτων.

3.2.4 Αναπαράσταση εξισώσεων μοντέλου μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής του δικτύου

Με σκοπό τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής του δικτύου ασύρματων αισθητήρων αναπαριστούμε το μαθηματικό μοντέλο του [Πίνακα 4](#). Ακολουθώντας το μοντέλο αυτό μεγιστοποιούμε την μεταβλητή t η οποία αντικατοπτρίζει την διάρκεια ζωής του δικτύου σε

γύρους, δηλαδή πόσες φορές μπορεί το σύνολο του δικτύου να παράγει πακέτα δεδομένων και να τα μεταδώσει προς τον σταθμό βάσης.

Σύμφωνα με το μοντέλο η διαφορά των συνόλων με δεδομένα την ροή από τον κόμβο- i προς τον κόμβο- $j2$ και όριο το υποσύνολο $j2$ με την ροή από τον κόμβο- $j2$ προς τον κόμβο- i και όριο το υποσύνολο j , πρέπει να είναι ίση με την τιμή που αναγράφεται σε κάθε συνθήκη. Στην περίπτωση που ο κόμβος- i είναι ο ίδιος με τον κόμβο γέννησης της πληροφορίας, η διαφορά της ροής πρέπει να είναι ίση με t . Αν ο κόμβος- i είναι ο ίδιος με τον σταθμό βάσης τότε η διαφορά των ροών πρέπει να είναι ίση με $-t$. Με αυτόν τον τρόπο, αποτρέπουμε την μετάδοση πακέτων πληροφορίας από τον σταθμό βάσης προς έναν κόμβο αισθητήρα. Σε περίπτωση που καμία από τις δύο συνθήκες δεν ικανοποιηθεί η διαφορά πρέπει να είναι ίση με την τιμή μηδέν.

Στην εξίσωση (6) δηλώνουμε ότι η απορρόφηση ενέργειας για μετάδοση και λήψη πακέτων πληροφορίας πρέπει να είναι μικρότερη η ίση με την διαθέσιμη ισχύ της μπαταρίας που διαθέτει κάθε κόμβος στην αρχή της λειτουργίας του δικτύου. Για να υπολογίσουμε την τιμή της συνθήκης πολλαπλασιάζουμε το κατάλληλο επίπεδο απορρόφησης ενέργειας E_{tx}^{Opt} για το σύνολο $j2$ και την κάθε ροή του κόμβου- $i2$ προς τον κόμβο- $j2$. Έπειτα, υπολογίζουμε την τιμή για το σύνολο κάθε ροής από τον κόμβο- j προς τον κόμβο- $i2$ και τον πολλαπλασιάζουμε την σταθερά E_{rx} που είναι η ενέργεια η οποία πρέπει να καταναλωθεί για την λήψη ενός πακέτου πληροφορίας μεταξύ δύο κόμβων. Η πρόσθεση αυτών των δυο πράξεων αποτελεί την τιμή για το σύνολο με όριο το υποσύνολο k . Εφόσον υπολογιστούν όλα τα σύνολα της εξίσωσης, πολλαπλασιάζεται στην τελική τιμή το μέγεθος του κάθε πακέτου πληροφορίας το οποίο έχει οριστεί στην μεταβλητή L_p και είναι 1024 bits. Η τιμή η οποία προκύπτει είναι η απορρόφηση ενέργειας. Η σταθερά e στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης πολλαπλασιάζεται, για να την μετατρέψουμε στην μορφή των nano Joule προκειμένου να πραγματοποιηθεί ορθά η μαθηματική ανάλυση. Αποτυπώνοντας την εξίσωση (10) του μοντέλου ([Πίνακας 4](#)) η μεταβλητή e πρέπει να είναι ίση με την σταθερά Initial Energy η οποία είναι η διαθέσιμη ισχύς που έχει η μπαταρία κάθε κόμβου αισθητήρα.

Οι εξισώσεις (8) και (9) έχουν την ίδια μορφή, αλλά χρησιμοποιούνται για διαφορετική λειτουργία η κάθε μια. Η εξίσωση (8) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου λαμβάνοντας ως περιορισμό τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων ($bmin2$) που έχει υπολογισθεί προηγουμένως. Στην περίπτωση που έχουμε υπολογίσει την μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου μη λαμβάνοντας ως περιορισμό την ελαχιστοποίηση των αλμάτων, χρησιμοποιούμε την εξίσωση (9), για να υπολογίσουμε το σύνολο αλμάτων του δικτύου για την μέγιστη διάρκεια ζωής του. Ο υπολογισμός γίνεται με την πρόσθεση των συνόλων με όρια τα $i2$, $j2$ και k για τις ροές από το κόμβο- $i2$ προς τον κόμβο- $j2$ και μετατίθεται η τιμή στην ελεύθερη μεταβλητή $bmin2$ και $t2$ αντίστοιχα ανάλογα με την τιμή που αναζητούμε σε κάθε μοντέλο.

```

*model-2 equations
eq5(i,k).. sum(j2 $(not sameas(i, j2)), f(i, j2, k)) - sum(j $(not
  sameas(i, j)), f(j, i, k)) =e= 0 - t2$(sameas(i, "node-0")) + t2$(sameas(i, k));

eq6(i2).. Lp*sum(k, sum(j2, EtxOpt(i2, j2)*f(i2, j2, k)) +
  Erx *sum(j, f(j, i2, k))) = l= e(i2) * (10**9);

eq7(i2).. e(i2) =e= InitEnergy;
eq8.. sum(i2, sum(j2, sum(k, f(i2, j2, k)))) =e= bmin2.1 * t2;
eq9.. sum(i2, sum(j2, sum(k, f(i2, j2, k)))) =e= bmin2 * t2.1;
    
```

Εικόνα 16. Εξισώσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου.

3.2.5 Ορισμός μοντέλων επίλυσης

Με σκοπό την μαθηματική επίλυση και βελτιστοποίηση του δικτύου ασύρματων αισθητήρων θα χρησιμοποιηθούν τέσσερα μοντέλα τα οποία αξιοποιούν συγκεκριμένες εξισώσεις για τον υπολογισμό των δεδομένων που καλούνται να αναζητήσουν. Επιγραμματικά ονομάζουμε τα μοντέλα, *Find Minimum Hop Count*, *Minimum Hop Count Enforced*, *Maximum Lifetime Enforced* και *Hop Count With Maximum Lifetime* αναθέτοντας τις εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε ένα από αυτά ανάλογα με την λειτουργία που ζητείται να εκτελέσουν.

Στο μοντέλο *FindMinimumHopCount* ορίζουμε τις εξισώσεις (1), (2), (3), και (4) έτσι ώστε όποτε καλείται η επίλυσή του να υπολογίζει λαμβάνοντας υπόψιν όλους του περιορισμούς των εξισώσεων τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων (*bmin2*) του δικτύου.

Στη συνέχεια, πρέπει να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής του με βάση τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων που έχει υπολογιστεί και αποθηκευτεί στην μεταβλητή *bmin2*. Το μοντέλο *MinimumHopCountEnforced* είναι αυτό που υπολογίζει την μεταβλητή *t2* και ορίζουμε σε αυτό τις εξισώσεις (2), (4), (5), (6), (7) και (8). Παρατηρώντας τον ορισμό στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν χρειαζόμαστε τον υπολογισμό της εξίσωσης (3), διότι η μεταβλητή *bmin2* έχει βρεθεί από την επίλυση του *FindMinimumHopCount* μοντέλου. Λαμβάνουμε αυτό τον περιορισμό ως δεδομένο και υιοθετούμε την εξίσωση 8 δίνοντας την ελάχιστη τιμή της μεταβλητής *bmin2* ως βάση για την αναζήτηση της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου *t2* στην μαθηματική επίλυση του μοντέλου *MinimumHopCountEnforced*.

Στοχεύοντας στην βελτιστοποίηση ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων αναζητούμε την μέγιστη διάρκεια ζωής του ανεξάρτητα από τον συνολικό αριθμό αλμάτων που θα χρειαστεί για την μεταφορά όλων των πακέτων πληροφορίας. Το μοντέλο *MaximumLifetimeEnforced* καλείται να επιλύσει αυτό το πρόβλημα και δέχεται ως ορισμό τις εξισώσεις (2), (4), (5), (6) και (7). Η εξίσωση (8) δεν χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή, διότι χρειάζεται ως δεδομένο έναν περιορισμό για να υπολογίσει την μεταβλητή *t2* κάτι το οποίο θέλουμε να αποφύγουμε

προκειμένου να επιλυθεί ορθά το μοντέλο. Η μεταβλητή $t2$ θα λάβει την τιμή της από τον υπολογισμό της εξίσωσης (5) που έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο (3.2.4).

Εφόσον γνωρίζουμε την τιμή της μεταβλητής t ως την μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου χωρίς κανέναν περιορισμό από την επίλυση του μοντέλου *MaximumLifetimeEnforced*, επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των αλμάτων για την συγκεκριμένη τιμή $t2$. Ορίζουμε τις εξισώσεις (2), (4), (5), (6), (7), και (9) στο μοντέλο *HopCountWithMaximumLifetime* το οποίο καλείται να υπολογίσει την μεταβλητή $bmin2$ με περιορισμό την μέγιστη διάρκεια ζωής $t2$ του δικτύου. Ο ελάχιστος αριθμός αλμάτων σε αυτό το μοντέλο υπολογίζεται υιοθετώντας την εξίσωση (9) η οποία δέχεται ως περιορισμό την ελάχιστη τιμή της μεταβλητής $t2$. Με αυτόν τον τρόπο αποκτούμε τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων $bmin2$ του δικτύου για την βέλτιστη διάρκεια λειτουργίας του.

Ο αλγόριθμος CPLEX θα χρησιμοποιηθεί για την μαθηματική επίλυση και των τεσσάρων μοντέλων.

```
Model modelFindMinHopCount /eq1, eq2, eq3, eq4/;  
Model modelMinHopCountEnforced /eq4, eq2, eq5, eq6, eq7, eq8/ ;  
Model modelMaxLifetimeEnforced /eq4, eq2, eq5, eq6, eq7/ ;  
Model modelHopCountWithMaxLifetime /eq4, eq2, eq5, eq6, eq7, eq9/ ;  
  
option MIP = cplex;
```

Εικόνα 17. Ορισμός μοντέλων προς μαθηματική επίλυση.

3.2.6 Επίλυση μοντέλου ελάχιστων αλμάτων

Έχοντας καθορίσει τα μοντέλα στα οποία βασίζεται η επίλυση του δικτύου καλούμε το GAMS να λύσει αρχικά το μοντέλο *FindMinimumHopCount* ελαχιστοποιώντας την μεταβλητή $bmin2$ που αντικατοπτρίζει τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων χρησιμοποιώντας την δομή μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (mixed integer programming). Στη συνέχεια, μεταφέρουμε σε ξεχωριστά αρχεία την τιμή της μεταβλητής $bmin2$ και τα μονοπάτια μεταξύ των κόμβων αισθητήρων του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν με την ροή των πακέτων πληροφοριών από τους κόμβους γέννησης προς τον σταθμό βάσης. Θέτουμε ως προϋπόθεση να προχωρήσει στην μεταφορά των αποτελεσμάτων στα αρχεία μόνο, αν το GAMS υπολογίσει ορθά την επίλυση των μοντέλων αποφεύγοντας έτσι τοπολογίες δικτύων μη ρεαλιστικές.

```

Solve modelFindMinHopCount using mip minimizing bmin2;

File minHopCountResults/\Results_MinHop_Count.txt/;
minHopCountResults.ap=1;
put minHopCountResults;
if( modelFindMinHopCount.modelstat = 1 ,
put bmin2.1
);
putclose;

File minHopCountResults2/\Results_MinHop_Count2.txt/;
minHopCountResults2.ap=1;
minHopCountResults2.pc = 5;
put minHopCountResults2;
if( modelFindMinHopCount.modelstat = 1 ,
loop(k,
loop((i2,j2),
put $(f.1(i2,j2,k)<>0) i2.t1, j2.t1, k.t1, f.1(i2,j2,k)/
);
);
);
put '-----'//;
put '-----'//;
putclose;

```

Εικόνα 18. Κλήση επίλυσης μοντέλου FindMinimumHopCount και αποθήκευση δεδομένων.

3.2.7 Επίλυση μοντέλου μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής με περιορισμό την ελαχιστοποίηση των αλμάτων

Εφόσον έχουμε ως δεδομένο τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων $bmin2$ του δικτύου που έχει υπολογιστεί με την ολοκλήρωση του μοντέλου *FindMinimumHopCount*, καλούμε την επίλυση του *MinimumHopCountEnforced*. Δίνοντας στο GAMS εντολή να μεγιστοποιηθεί η τιμή της μεταβλητής $t2$ με την χρήση δομής (MIP) θα υπολογιστεί η μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου, έχοντας ως δεδομένο την ελάχιστη τιμή της μεταβλητής $bmin2$. Με αυτόν τον τρόπο, θα αποκτήσουμε την μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου για τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων. Η επίλυση αυτή αντικατοπτρίζει μια τοπολογία ενός δικτύου με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης (latency) στην μεταφορά των πακέτων δεδομένων από τους κόμβους αισθητήρες προς τον σταθμό βάσης.

Θέτοντας και εδώ τον περιορισμό που αναφέραμε για την αποφυγή της αποθήκευσης αποτελεσμάτων μη ρεαλιστικών τοπολογιών, προχωράμε στην αποθήκευση των δεδομένων σε ξεχωριστά αρχεία. Αποθηκεύουμε αρχικά πόσες φορές το κάθε μονοπάτι ξεχωριστά μεταξύ δυο

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

κόμβων μπορεί να αναμεταδώσει πακέτα δεδομένων, εφόσον με αυτόν τον τρόπο υπολογίζουμε την διάρκεια ζωής του δικτύου μας. Σε διαφορετικό αρχείο επίσης αποθηκεύουμε και την μεταβλητή $t2$ που κλήθηκε να υπολογίσει το μοντέλο αυτό.

```
Solve modelMinHopCountEnforced using mip maximizing t2;

File resultsMinHop/\LATENCY_MIN_HOP_COUNT_E2.txt/;
resultsMinHop.ap=1;
resultsMinHop.pc = 5;
put resultsMinHop;
if( modelFindMinHopCount.modelstat = 1 ,
    loop(k,
        loop((i2,j2),
            put $(f.l(i2,j2,k)<>0) i2.t1, j2.t1, k.t1, f.l(i2,j2,k)/
                );    );
);
put '-----'/;
put '-----'/;
display bmin2.1;
display t2.1
putclose;

File LifetimeResults/\LATENCY_MIN_HOP_COUNT_E.txt/;
LifetimeResults.ap=1;
put LifetimeResults;
if( modelFindMinHopCount.modelstat = 1 ,put t2.1);
putclose;
```

Εικόνα 19. Κλήση επίλυσης μοντέλου *MinimumHopCountEnforced* και αποθήκευση δεδομένων.

3.2.8 Επίλυση μοντέλου μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής του δικτύου

Έχοντας ως στόχο να παρατείνουμε την διάρκεια ζωής του δικτύου ασύρματων αισθητήρων καλούμε την επίλυση του μοντέλου *MaximumLifetimeEnforced*. Με την μαθηματική επίλυση του μοντέλου αυτού θα υπολογιστεί η μέγιστη διάρκεια ζωής $t2$ του δικτύου χωρίς την ύπαρξη περιορισμών, όπως η τιμή ελάχιστων αλμάτων μεταξύ των κόμβων. Χρησιμοποιώντας και εδώ δομή (MIP) δίνουμε εντολή στο GAMS να μεγιστοποιήσει την μεταβλητή $t2$ αποκτώντας έτσι την μέγιστη ανεξάρτητη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου.

Αποφεύγοντας και εδώ την αποθήκευση δεδομένων μη ρεαλιστικών τοπολογιών δικτύου μεταφέρουμε την τιμή της μεταβλητής $t2$ σε ξεχωριστό αρχείο.

```
Solve modelMaxLifetimeEnforced using mip maximizing t2;  
  
File maxLifetimeResults /\Results_Max_Lifetime.txt/;  
maxLifetimeResults.ap=1;  
put maxLifetimeResults;  
if( modelFindMinHopCount.modelstat = 1 ,  
    put t2.1  
);  
putclose;
```

Εικόνα 20. Κλήση επίλυσης μοντέλου MaximumLifetimeEnforced και αποθήκευση δεδομένων.

3.2.9 Επίλυση μοντέλου ελαχιστοποίησης αλμάτων με περιορισμό την μέγιστη διάρκεια ζωής

Καθώς μεταφερόμαστε από την επίλυση του μοντέλου *MaximumLifetimeEnforced* καλούμε το *HopCountWithMaximumLifetime* μοντέλο προς μαθηματική επίλυση. Σε αυτήν την διαδικασία θα υπολογιστεί ο ελάχιστος αριθμός αλμάτων *bmin2* του δικτύου για την μέγιστη ανεξάρτητη διάρκεια ζωής του. Δηλώνουμε στο GAMS να ελαχιστοποιηθεί η μεταβλητή *bmin2* με την χρήση δομής (MIP) λαμβάνοντας ως δεδομένο την τιμή της μεταβλητής *t2* που υπολογίστηκε στο μοντέλο *MaximumLifetimeEnforced*. Με την μαθηματική επίλυση των δύο μοντέλων *MaximumLifetimeEnforced* και *HopCountWithMaximumLifetime* γνωρίζουμε πόσες φορές μπορεί το δίκτυο να μεταδώσει πακέτα δεδομένων και το σύνολο των αλμάτων *bmin2* για την διάρκεια ζωής του *t2*.

Εφόσον ολοκληρωθεί η επίλυση του μοντέλου, μεταφέρουμε τα δεδομένα σε ξεχωριστά αρχεία αποφεύγοντας και εδώ την αποθήκευση αποτελεσμάτων μη ρεαλιστικών τοπολογιών δικτύου. Στο πρώτο αρχείο μεταφέρουμε για κάθε μονοπάτι μεταξύ δυο κόμβων πόσες φορές μπορεί να αναμεταδώσει πακέτα πληροφοριών και στο δεύτερο τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων *bmin2* για την μέγιστη ανεξάρτητη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου *t2*.

```
Solve modelHopCountWithMaxLifetime using mip minimizing bmin2;

File resultsHopWithMaxLifetime/\Results_HopCount_With_Max_Lifetime2.txt/;
resultsHopWithMaxLifetime.ap=1;
resultsHopWithMaxLifetime.pc = 5;
put resultsHopWithMaxLifetime;
if( modelFindMinHopCount.modelstat = 1 ,
    loop(k,
        loop((i2,j2),
            put $(f.1(i2,j2,k)<>0.00) i2.t1, j2.t1, k.t1, f.1(i2,j2,k)/
        );
    );
);
put '-----'//;
put '-----'//;
putclose;

File hopCountMaxLifetimeResults/\Results_HopCount_With_Max_Lifetime.txt/;
hopCountMaxLifetimeResults.ap=1;
put hopCountMaxLifetimeResults;
if( modelFindMinHopCount.modelstat = 1 ,
    put bmin2.1
);
putclose;
```

Εικόνα 21. Κλήση επίλυσης μοντέλου HopCountWithMaximumLifetime και αποθήκευση δεδομένων.

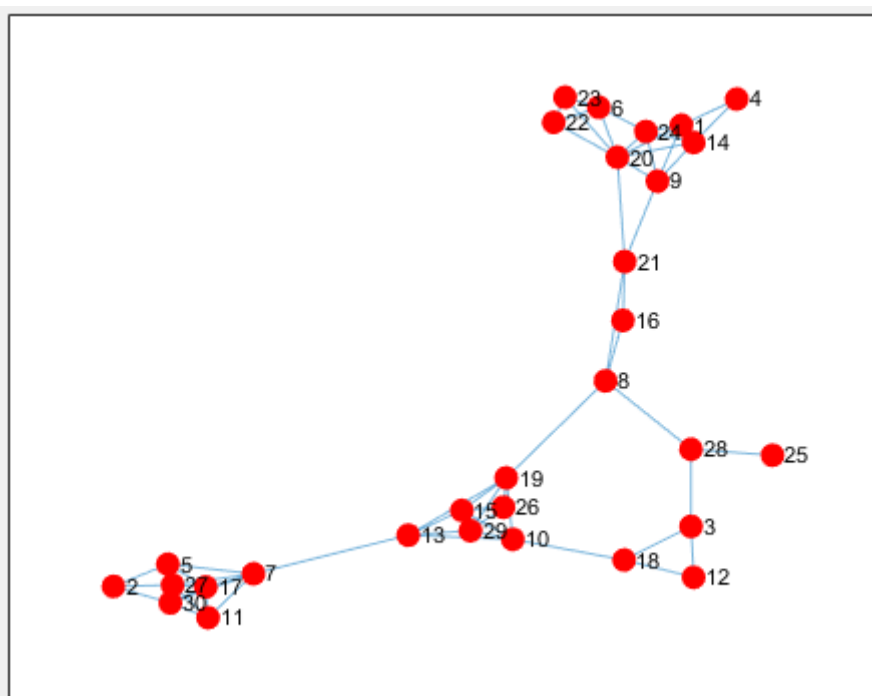
3.2.10 Αποφυγή μη ρεαλιστικών τοπολογιών δικτύου

Κατά την διάρκεια της δημιουργίας του δικτύου μέσω του κώδικα που αναπτύχθηκε στην MATLAB παρατηρούμε τοπολογίες μη ρεαλιστικές. Αυτό προκύπτει λόγω της τυχαιότητας που εφαρμόζουμε κατά την τοποθέτηση των κόμβων στην τοπολογία του δικτύου ασύρματων αισθητήρων. Διακρίνονται περιπτώσεις στις οποίες ορισμένοι κόμβοι δεν μπορούν να επικοινωνήσουν με τους υπολοίπους ([Εικόνα 24](#), [Εικόνα 25](#)) με αποτέλεσμα να είναι αποκομμένοι από το δίκτυο. Άλλες περιπτώσεις που δεν πρέπει να γίνουν αποδέκτες προς μαθηματική επίλυση είναι η δημιουργία τοπολογιών που παρατηρείται μη ενιαίο δίκτυο. Κόμβοι που αποτελούν ένα μικρότερο δίκτυο αποκομμένο από το σύνολο όπως στην [Εικόνα 26](#), [Εικόνα 27](#) δεν λαμβάνονται υπόψιν κατά τη διάρκεια συλλογής αποτελεσμάτων. Προκειμένου να φιλτράρουμε τα αποτελέσματα αυτών των τοπολογιών θέτουμε μια συνθήκη στην αποθήκευση κάθε αποτελέσματος στα ξεχωριστά αρχεία που δημιουργούμαι ([Εικόνα 22](#)).

```
if( name_of_the_model.modelstat = 1 ,  
    put timh_apotelesmatos  
);
```

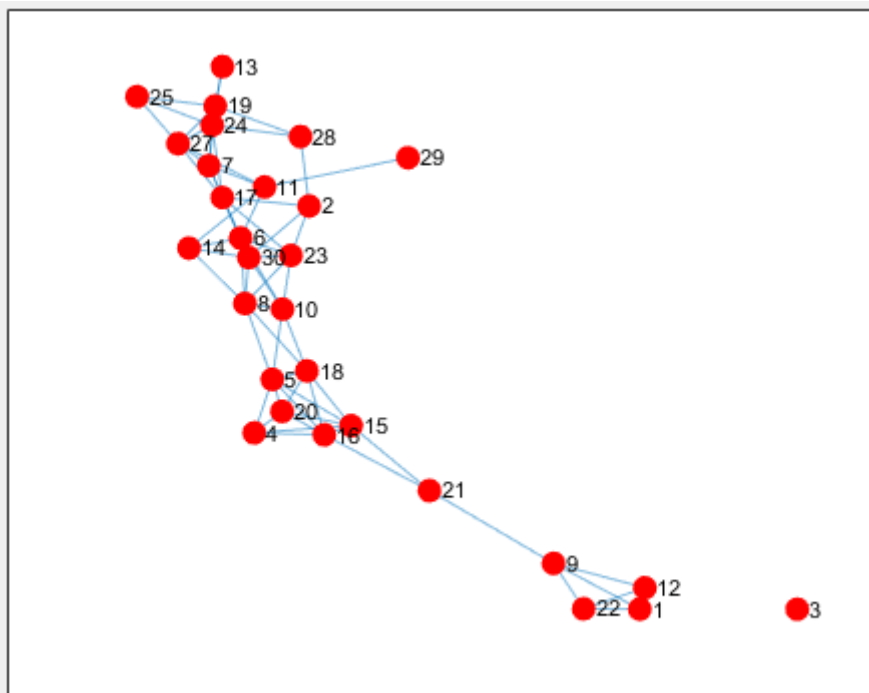
Εικόνα 22. Συνθήκη φιλτραρίσματος αποτελεσμάτων.

Στην προσπάθεια του GAMS να επιλύσει αυτές τις τοπολογίες και να υπολογίσει τα ζητούμενα του κάθε μοντέλου δημιουργείται μια αδύνατη λύση. Στην προκειμένη περίπτωση, η κατάσταση του μοντέλου (status) λαμβάνει τιμή διαφορετική του 1, διότι το δίκτυο δεν είναι ρεαλιστικό, καθώς δεν έχει δημιουργηθεί μια ενιαία τοπολογία. Αν μια τέτοια περίπτωση καταφέρει να υπολογίσει την βέλτιστη λύση, αυτό σημαίνει ότι οι αποκομμένοι κόμβοι ή τα αποκομμένα μικρότερα δίκτυα μπορούν να επικοινωνήσουν με τον σταθμό βάσης και επομένως θέτονται ως αποδεκτά. Κάθε αποδεκτή μαθηματική επίλυση των μοντέλων ακολουθείται από την εύρεση της βέλτιστης λύσης (optimal solution status = 1) και μόνο για αυτές θα αποθηκεύσουμε δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο, καταφέρνουμε να φιλτράρουμε μη αποδέκτες τοπολογίες και μαθηματικές λύσεις κατά την διάρκεια επαναληπτικής εκτέλεσης του κώδικα προκειμένου να λάβουμε μια αντιπροσωπευτική εικόνα αποτελεσμάτων.

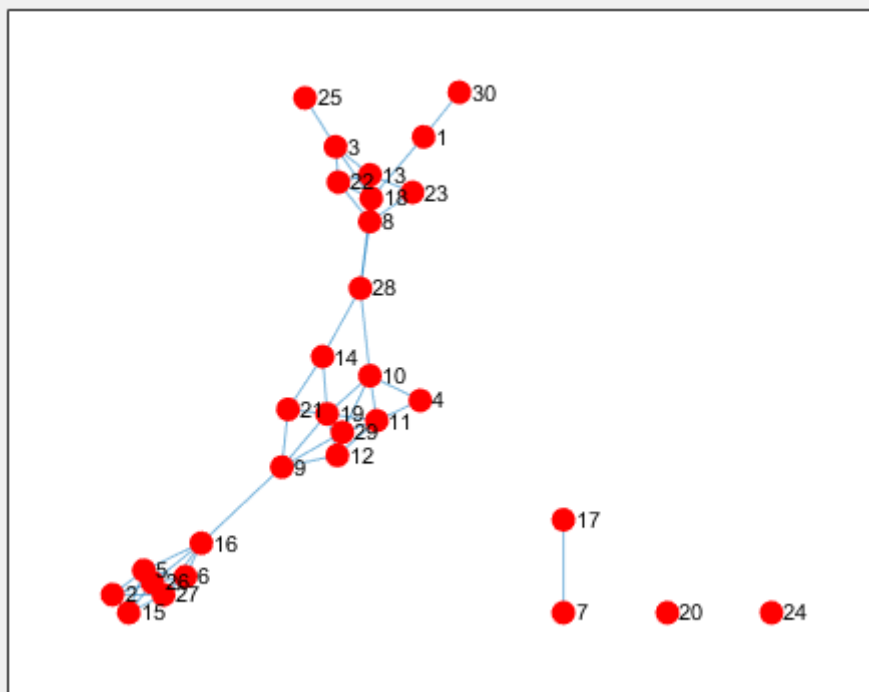


Εικόνα 23. Αποδεκτή τοπολογία δικτύου προς επίλυση.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

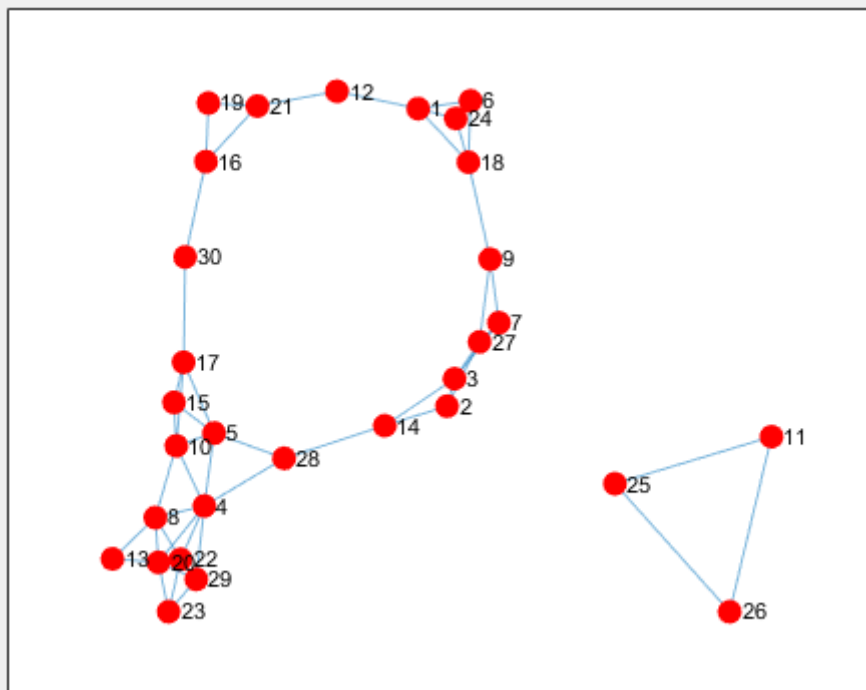


Εικόνα 24. Μη ρεαλιστική τοπολογία δικτύου (αποκομμένοι κόμβοι).

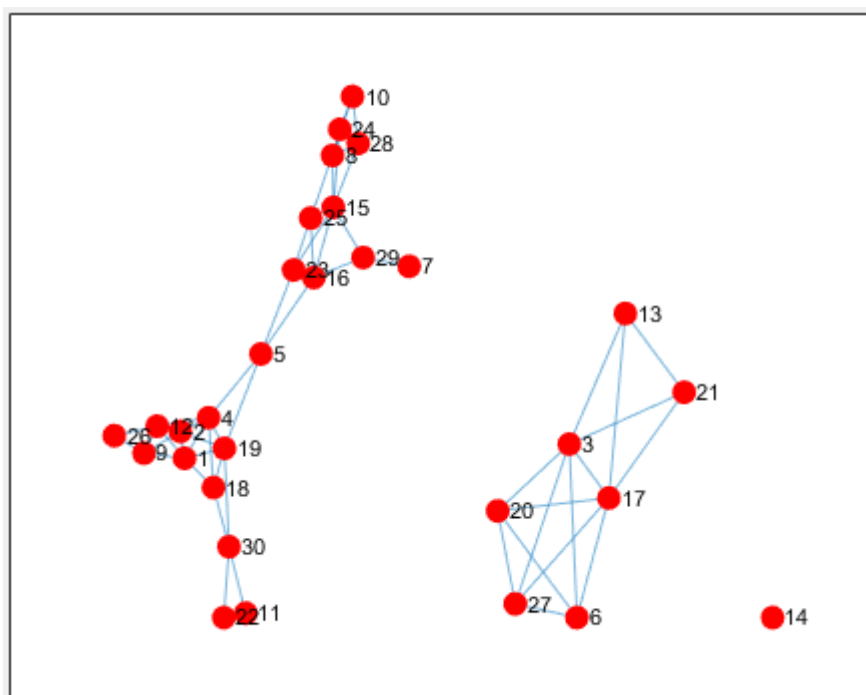


Εικόνα 25. Μη ρεαλιστική τοπολογία δικτύου (αποκομμένοι κόμβοι).

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς



Εικόνα 26. Μη ρεαλιστική τοπολογία δικτύου (εμφάνιση αποκομμένου δικτύου).



Εικόνα 27. Μη ρεαλιστική τοπολογία δικτύου (εμφάνιση αποκομμένου δικτύου).

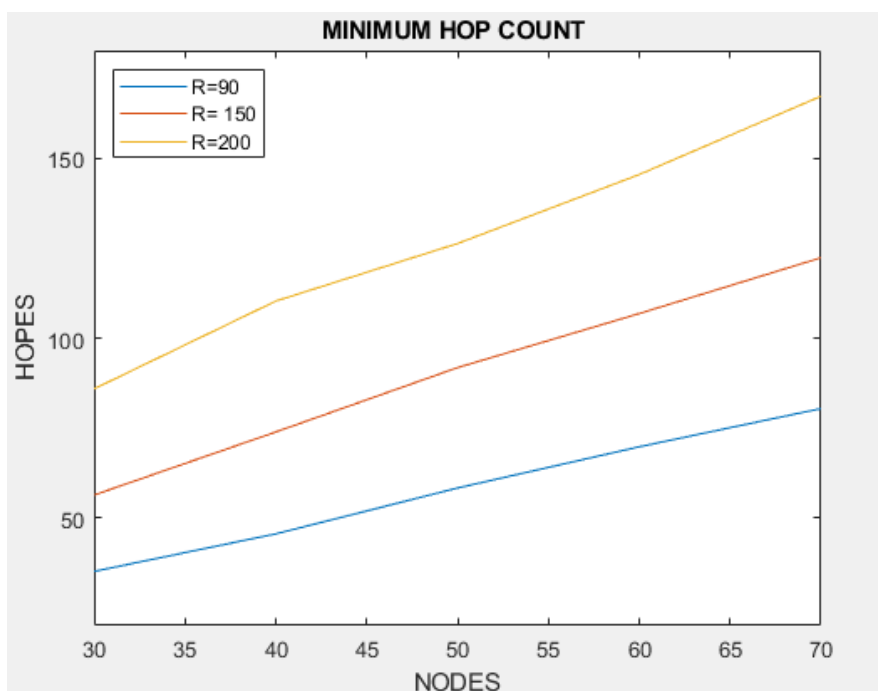
4. Αποτελέσματα προσομοίωσης

4.1 Χαρακτηριστικά τοπολογίας δικτύων προς ανάλυση

Σύμφωνα με την διαδικασία που έχει αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και μελετώνται τα αποτελέσματα της μεθόδου βελτιστοποίησης του δικτύου ασύρματων αισθητήρων. Προκειμένου να αποκτήσουμε μια αντιπροσωπευτική εικόνα για το δίκτυο μας και για την βελτιστοποίηση του, προσομοιώθηκαν 40 ανεξάρτητες τοπολογίες για τα διαφορετικά χαρακτηριστικά του σε κάθε περίπτωση και στη συνέχεια υπολογίσαμε τον μέσο όρο κάθε αποτελέσματος. Αναζητήσαμε αποτελέσματα για τοπολογίες που έχουν N κόμβους 30, 40, 50, 60, 70 και R_{net} ακτίνα διασποράς 90, 150, 200 αντίστοιχα για κάθε αριθμό κόμβων. Συνολικά αναλυθήκαν 15 τοπολογίες δικτύων ασύρματων αισθητήρων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

4.2 Αποτελέσματα μοντέλου ελαχιστοποίησης αλμάτων

Στο πρώτο μοντέλο επίλυσης της τοπολογίας του δικτύου μας αναζητήσαμε τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων για το σύνολο του με ακτίνες R_{net} 90, 150, 200 και αριθμό κόμβων N από 30 έως 70. Παίρνοντας ως δεδομένο ότι ο ελάχιστος αριθμός αλμάτων αντικατοπτρίζει όλα τα μονοπάτια που ακολουθούν τα πακέτα πληροφορίας από τον κόμβο γέννησής τους προς τον σταθμό βάσης, προσθέτοντας νέους κόμβους στο δίκτυο αυξάνουμε και τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων του. Επίσης, αυξάνοντας και την ακτίνα διασποράς R_{net} παρατηρείται αύξηση και στον ελάχιστο αριθμό αλμάτων, διότι η απόσταση που πρέπει να διανύσει ένα πακέτο πληροφορίας προς τον σταθμό βάσης απαιτεί περισσότερα άλματα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της [Εικόνας 28](#), στην περίπτωση που έχουμε μια τοπολογία με 30 κόμβους αισθητήρες και ακτίνα διασποράς 90 ο ελάχιστος αριθμός αλμάτων είναι κατά μέσο όρο 35. Για ακτίνα 150 και 200 στους 30 κόμβους ο ελάχιστος αριθμός αλμάτων είναι 56 και 85 αντίστοιχα. Αυξάνοντας τους κόμβους στους 70 στο δίκτυο μας ο ελάχιστος αριθμός αλμάτων μπορεί να φτάσει έως 167 κατά μέσο όρο με ακτίνα διασποράς 200.



Εικόνα 28. Ελάχιστος αριθμός αλμάτων κατά μέσο όρο για κάθε τοπολογία δικτύου.

4.3 Αποτελέσματα μοντέλου μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής

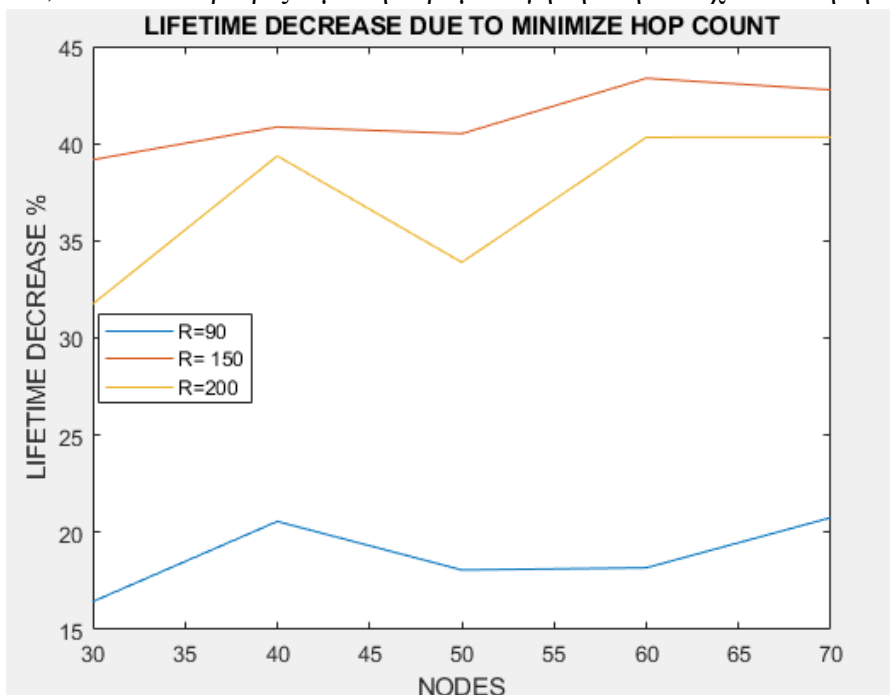
Καθώς έχουμε υπολογίσει τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων για κάθε μια από τις τοπολογίες που επιλυθήκαν μέσω της GAMS, είναι σημαντικό να μελετηθεί τι αντίκτυπο έχει αυτή η δρομολόγηση στην διάρκεια ζωής του δικτύου μας. Για κάθε τοπολογία εφόσον υπολογίσουμε τα ελάχιστα άλματα (Hops) αποκτούμε και την διάρκεια λειτουργίας (Lifetime) της για την συγκεκριμένη δρομολόγηση. Στη συνέχεια, αφού υπολογιστεί και η μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου για απεριόριστα άλματα, μπορούμε να υπολογίσουμε τις επιπτώσεις στο δίκτυο μας.

Είναι προφανές ότι η δρομολόγηση ελάχιστων αλμάτων θα έχει αρνητικό αντίκτυπο στο δίκτυο μας, διότι δεν λαμβάνει υπόψιν την απορρόφηση ενέργειας για την αναμετάδοση πακέτων πληροφοριών από κόμβο σε κόμβο. Παρατηρώντας το γράφημα της [Εικόνας 29](#) βλέπουμε ότι για τις τοπολογίες δικτύων 30 κόμβων η μείωση στην διάρκεια ζωής τους σε σχέση με την μέγιστη διάρκεια λειτουργίας τους είναι κατά μέσο όρο 16% με ακτίνα διασποράς 90. Καθώς η ακτίνα διασποράς μεγαλώνει στα 150 και 200, η μείωση αυτή γίνεται περισσότερη αισθητή με τιμές στο 40% και 31% αντίστοιχα κατά μέσο όρο. Καθώς η πυκνότητα των κόμβων αυξάνεται, οι κόμβοι έχουν στη διάθεση τους πιο αποδοτικές διαδρομές προς τον σταθμό βάσης, ωστόσο με περιορισμό την ελαχιστοποίηση των αλμάτων οι κατάλληλες διαδρομές που προσφέρουν καλύτερες επιλογές εξισορρόπησης ενέργειας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

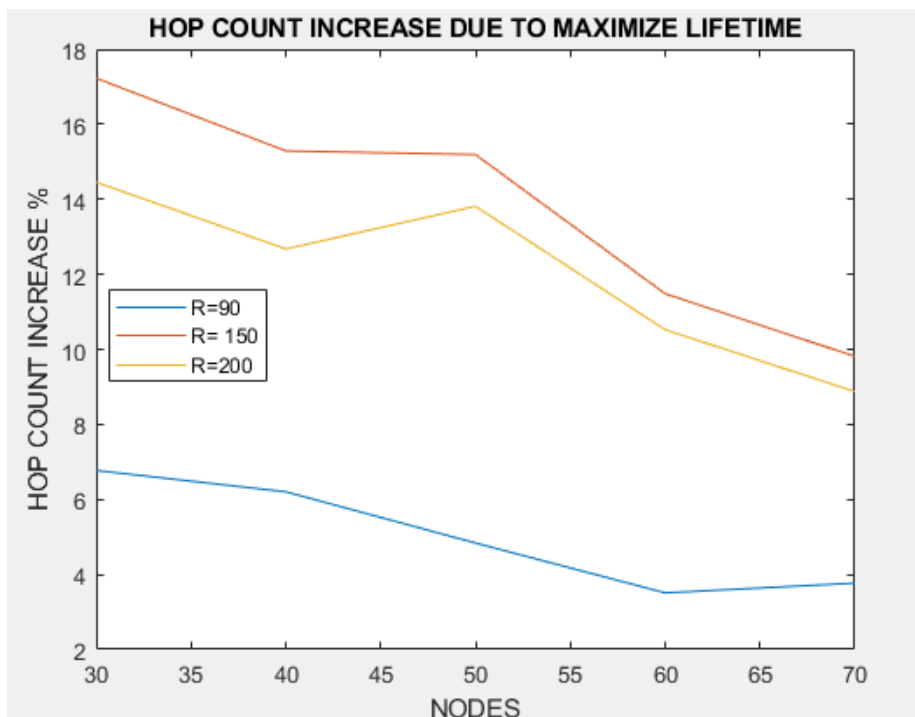
Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

Αξιοσημείωτο είναι ότι η μείωση της διάρκειας ζωής για τα δίκτυα με ακτίνα διασποράς 90 και 200 είναι μικρότερη από τα δίκτυα με ακτίνα 150. Αυτό συμβαίνει, διότι σε πιο αραιά δίκτυα, όπως αυτά με ακτίνα διασποράς 200 η μείωση στη διάρκεια λειτουργίας είναι μικρότερη ακόμα και με απεριόριστα άλματα ως δεδομένο, με αποτέλεσμα οι επιλογές εξισορρόπησης ενέργειας να είναι περιορισμένες. Σε πυκνότερες τοπολογίες, όπως αυτή με διασπορά 90 η μείωση αυτή λόγω του περιορισμού ελάχιστων αλμάτων δεν είναι τόσο αισθητή, διότι οι κόμβοι μπορούν να αναζητήσουν μονοπάτια αναμετάδοσης με καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα χωρίς να αυξηθεί ο αριθμός των αλμάτων σημαντικά.

Καθώς γνωρίζουμε τι αντίκτυπο έχει η δρομολόγηση των ελάχιστων αλμάτων στην διάρκεια ζωής του δικτύου μας προχωράμε στην δρομολόγηση μεγιστοποίησης της λειτουργίας του και στην διακύμανση των αλμάτων για την δρομολόγηση αυτή. Οι τοπολογίες με ακτίνα διασποράς 90 και 200 σύμφωνα με το γράφημα της [Εικόνας 30](#) έχουν μικρότερη αύξηση, όσον αφορά τον αριθμό των αλμάτων σε σχέση με τις τοπολογίες με ακτίνα 150 σύμφωνα με την επεξήγηση που δόθηκε για τα αραιά και πυκνά δίκτυα προηγουμένως. Παρατηρώντας τα ποσοστά και των δυο εικόνων είναι φανερό ότι το μέγεθος των τιμών στην αύξηση των αλμάτων είναι μικρότερο σε σχέση με την μείωση στην διάρκεια ζωής. Αιτία αυτής της ανισορροπίας είναι ότι μια μικρή σχετικά αύξηση στα άλματα στο δίκτυο μας οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση στη μέγιστη διάρκεια λειτουργίας του, ιδιαίτερα σε δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας. Αυτό δείχνει ποσό σημαντικός παράγοντας είναι ο αριθμός των αλμάτων στην βελτιστοποίηση του δικτύου μας και το μέγεθος της επίδρασης που έχει στην διάρκεια λειτουργίας του, όταν δεν περιορίζουμε την δρομολόγηση στην ελαχιστοποίηση τους.



Εικόνα 29. Ποσοστιαία μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου κατά την ελαχιστοποίηση των αλμάτων.



Εικόνα 30. Ποσοστιαία αύξηση των ελάχιστων αλμάτων του δικτύου λόγω της μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής του δικτύου.

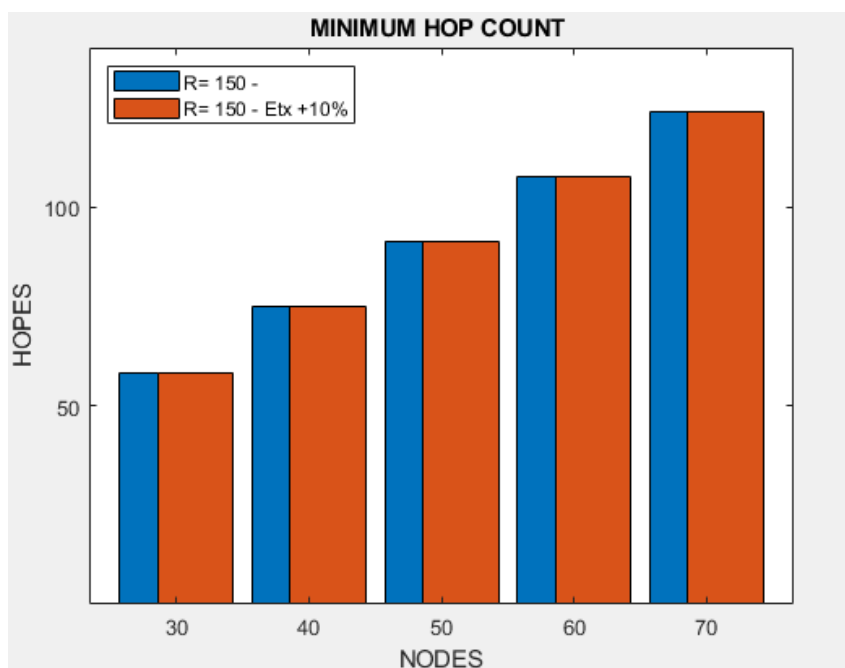
4.4 Αποτελέσματα μοντέλου με αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας

4.4.1 Αύξηση απορρόφησης της ενέργειας μετάδοσης κατά 10%

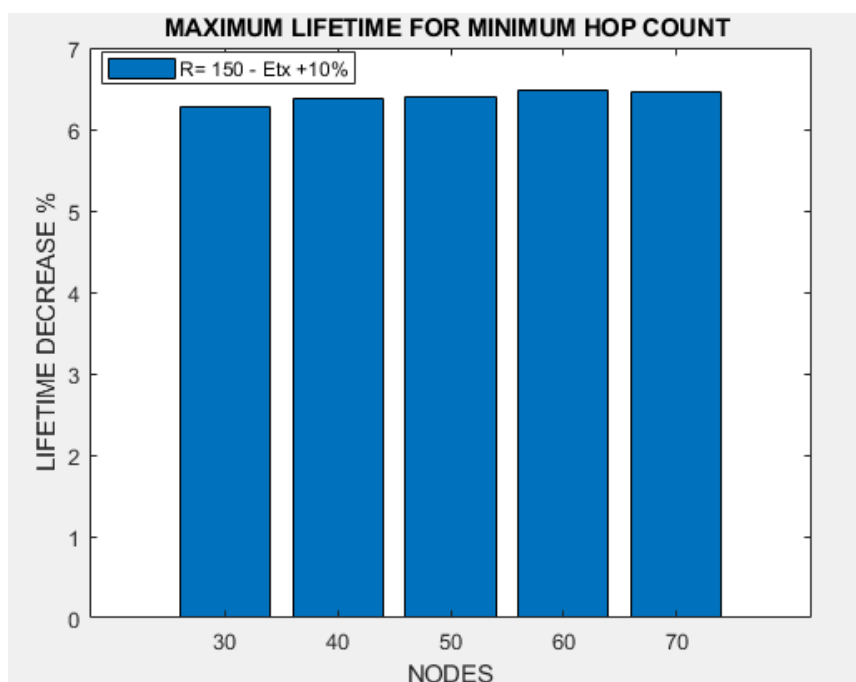
Προχωρώντας σε περαιτέρω ανάλυση του δικτύου ασύρματων αισθητήρων που έχουμε δημιουργήσει θέτουμε μερικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά του για να μελετήσουμε την συμπεριφορά του. Κρατώντας σταθερά στην ακτίνα διασποράς στα 150 για την τοπολογία του δικτύου αυξάνουμε για 10% την απορρόφηση της ενέργειας E_{tx} (Πίνακας 1) που απαιτείται, για να μεταδοθεί ένα πακέτο πληροφορίας και στα 26 επίπεδα που διαθέτουμε. Επίσης κρατάμε σταθερή την απόσταση για αυτά τα επίπεδα επομένως ο πίνακας R_{max} (Πίνακας 1) δεν θα δεχθεί καμία αλλαγή. Με αυτόν τον τρόπο, θα παρατηρήσουμε ποιες θα είναι οι αλλαγές στο δίκτυο, όταν για κάθε μετάδοση πακέτου πρέπει να καταναλωθεί περισσότερη ενέργεια. Η αύξηση αυτή δεν επιφέρει καμία αλλαγή στα ελάχιστα άλματα του δικτύου κάτι το οποίο αναμέναμε. Αντίθετα όμως προκύπτει μια μικρή αύξηση στα άλματα για την μέγιστη διάρκεια λειτουργίας του. Στην διάρκεια λειτουργίας του δικτύου παρατηρούμε μια μείωση κατά 6,1% στην μέγιστη

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

διάρκεια ζωής για τα ελάχιστα άλματα του δικτύου αλλά και στην μέγιστη διάρκεια λειτουργίας του για απεριόριστα άλματα κατά 5-6% για τοπολογίες με κόμβους N από 30 μέχρι 70.

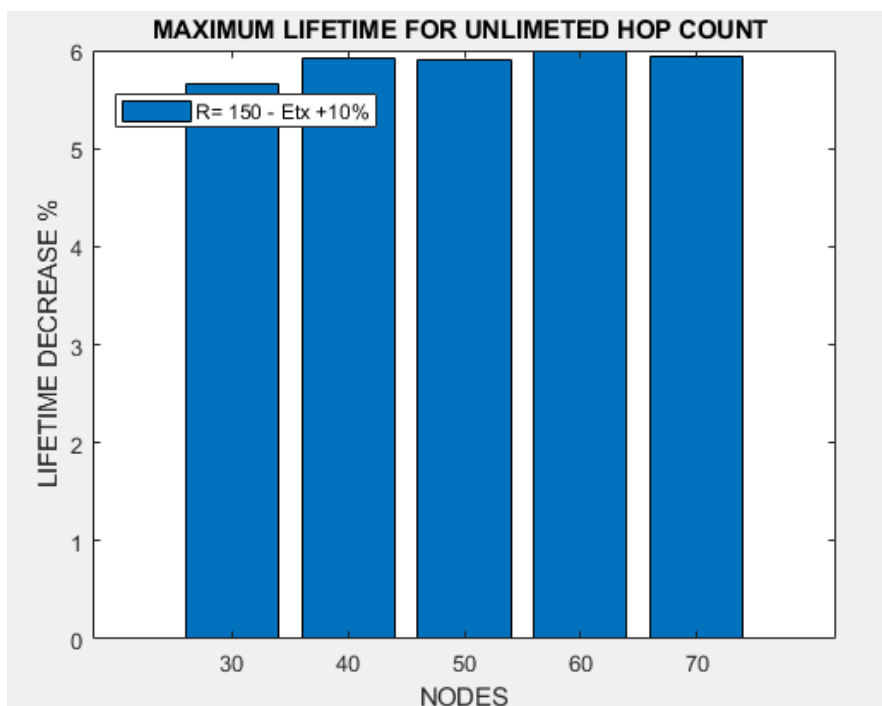


Εικόνα 31. Ελάχιστα άλματα του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση 10% στην απορρόφησης ενέργειας Etx.

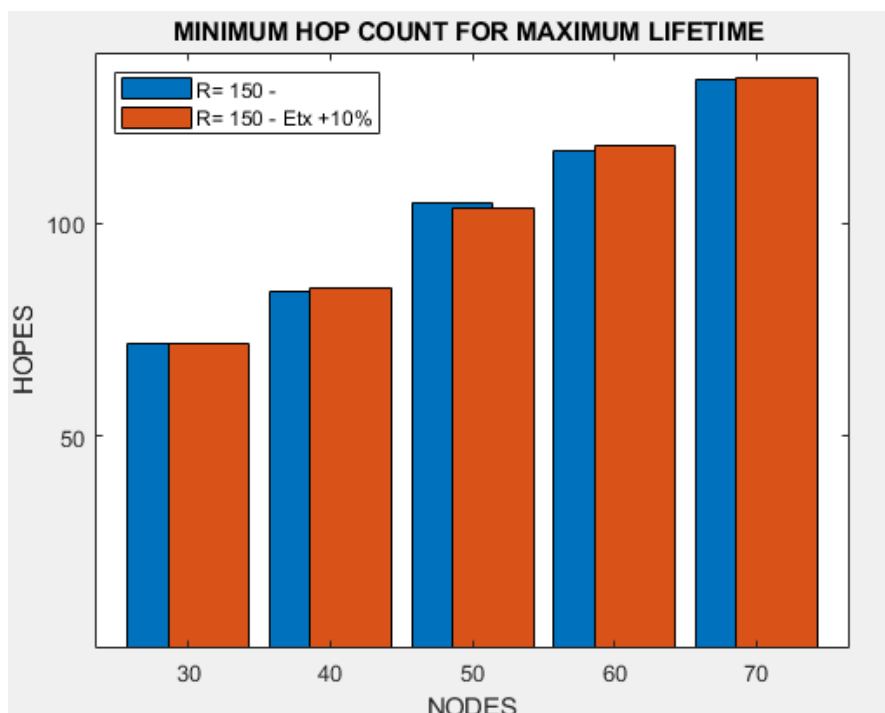


Εικόνα 32. Ποσοστιαία μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων σε σύγκριση με την αύξηση 10% στην απορρόφησης ενέργειας Etx.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς



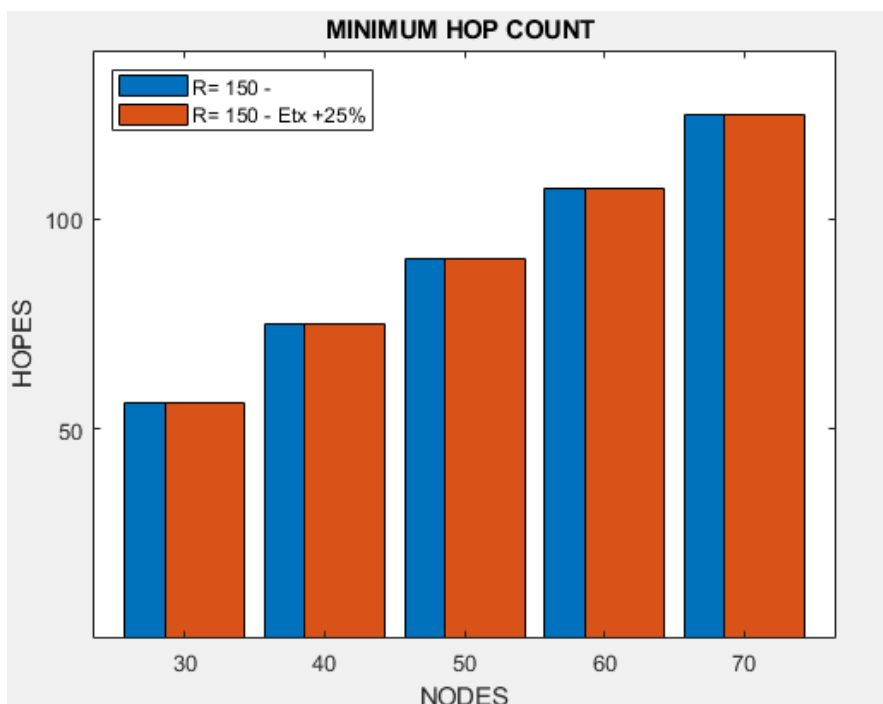
Εικόνα 33. Ποσοστιαία μείωση της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου για την σε σύγκριση με την αύξηση 10% στην απορρόφησή ενέργειας Etx.



Εικόνα 34. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση 10% στην απορρόφησή ενέργειας Etx.

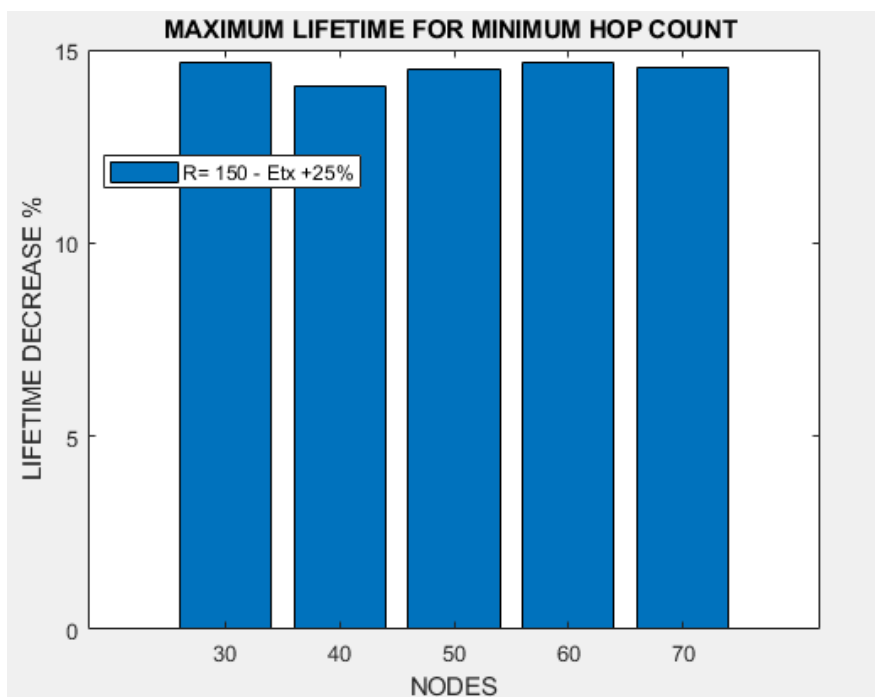
4.4.2 Αύξηση απορρόφησης της ενέργειας μετάδοσης κατά 25%

Αυξάνοντας περισσότερο την απορρόφηση της ενέργειας στους αισθητήρες για την μετάδοση πακέτων πληροφορίας οι διάφορες παίρνουν μεγαλύτερο μέγεθος. Κρατώντας σταθερή και εδώ την ακτίνα διασποράς του δικτύου στα 150 συγκρίνουμε τις διαφορές στο αρχικό μας δίκτυο με την αύξηση της απορρόφησης της ενέργειας E_{tx} (Πίνακας 1) κατά 25%. Ο πίνακας R_{max} (Πίνακας 1) και σε αυτή την περίπτωση δεν θα δεχθεί καμία αλλαγή προκειμένου να παρατηρήσουμε τι μέγεθος θα έχει η αλλαγή στην συμπεριφορά του δικτύου η αύξηση στην απορρόφηση της ενέργειας. Παρατηρούμε ότι τα ελάχιστα άλματα του δικτύου παραμένουν ανεπηρέαστα κάτι το οποίο αναμέναμε, διότι δεν επηρεάζονται από την κατανάλωση της ενέργειας αυτά τα μοντέλα, όπως έχουμε αναλύσει στο Κεφάλαιο 2. Στην διάρκεια λειτουργίας του δικτύου η μείωση είναι μεγαλύτερη αυτή τη φορά. Η μέγιστη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου για τα ελάχιστα άλματα έχει μειωθεί κατά 15% για όλο το σύνολο των τοπολογιών που αναλύουμε. Η μέγιστη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου για απεριόριστα άλματα έχει μια μείωση κατά 14% για όλο το σύνολο των τοπολογιών κάτι το οποίο επηρεάζει το σύνολο των αλμάτων για αυτό το μοντέλο. Τα άλματα του δικτύου για την μέγιστη διάρκεια λειτουργίας έχουν μια μικρή αύξηση και εδώ κάτι το οποίο αναμέναμε, διότι το μοντέλο επίλυσης τους λαμβάνει ως δεδομένο την μέγιστη διάρκεια ζωής του.

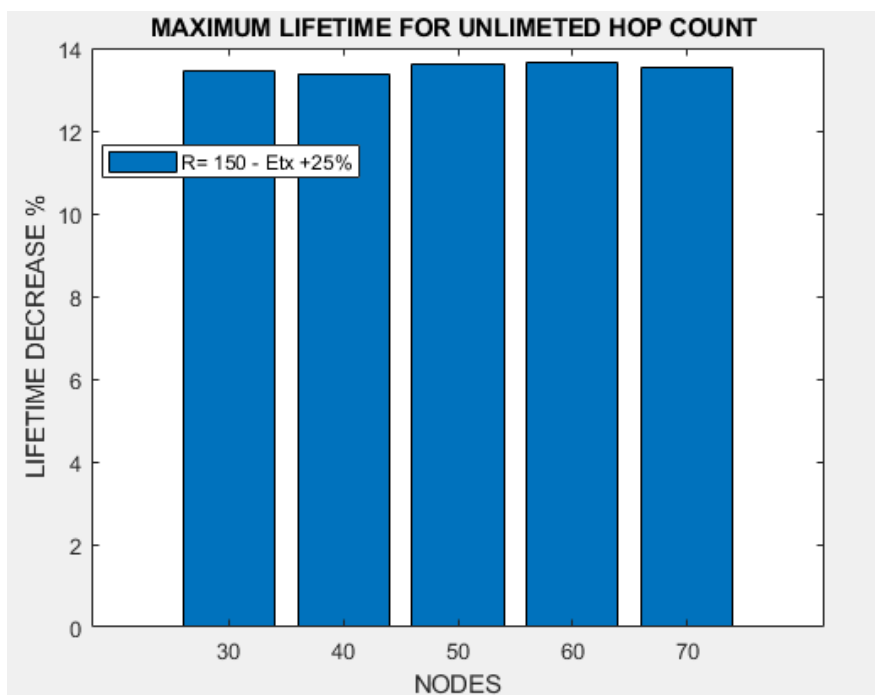


Εικόνα 35. Ελάχιστα άλματα του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση 10% στην απορρόφησης ενέργειας E_{tx} .

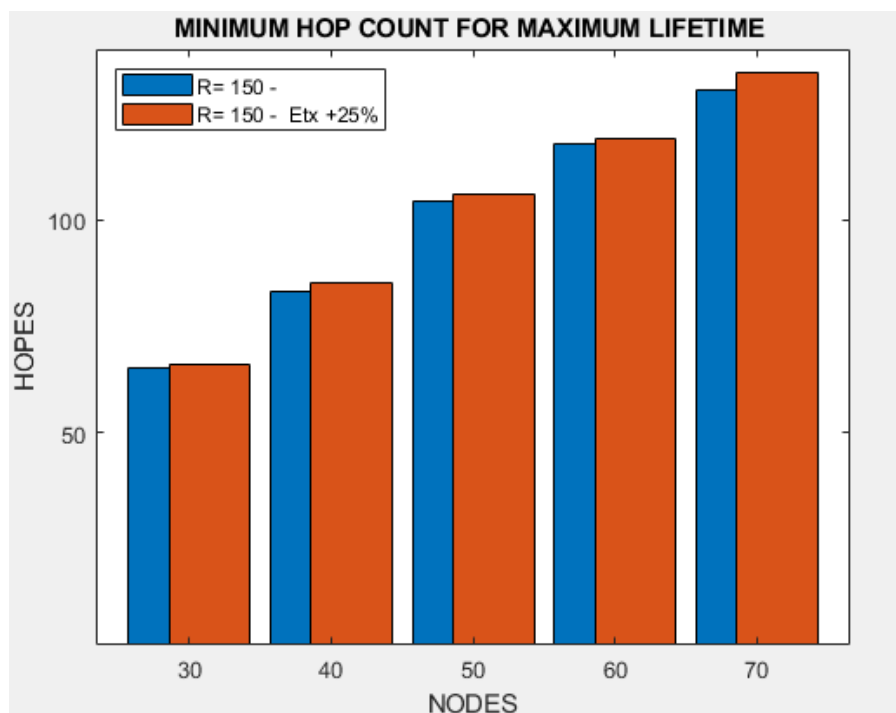
Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς



Εικόνα 36. Ποσοστιαία μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων σε σύγκριση με την αύξηση 10% στην απορρόφησή ενέργειας E_{tx} .



Εικόνα 37. Ποσοστιαία μείωση της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου για την σε σύγκριση με την αύξηση 10% στην απορρόφησή ενέργειας E_{tx} .



Εικόνα 38. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση 10% στην απορρόφησή ενέργειας Etx.

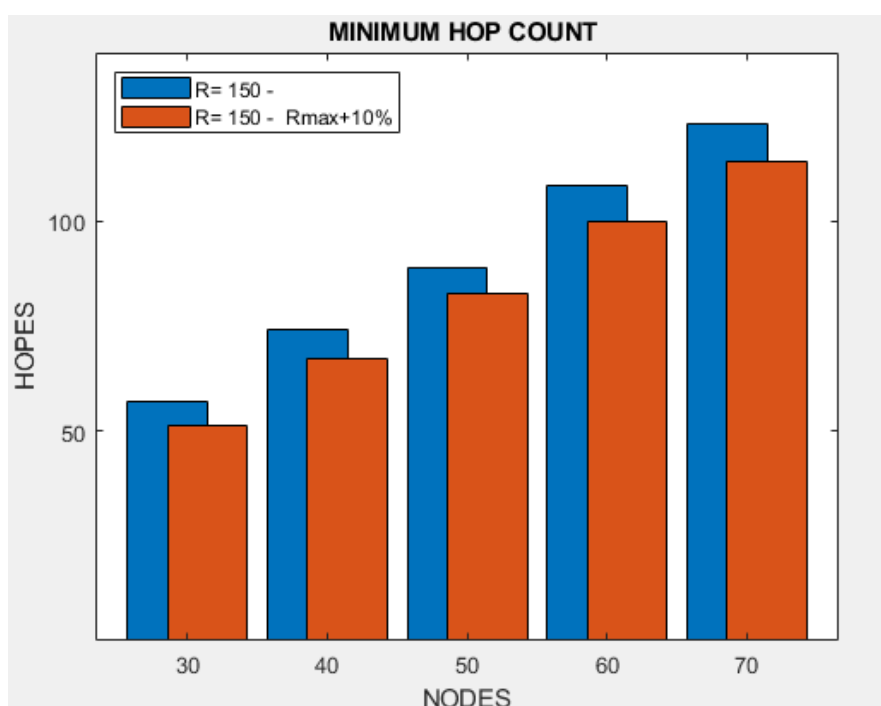
4.5 Αποτελέσματα μοντέλου με αύξηση στην απόσταση μετάδοσης

4.5.1 Αύξηση απόστασης μετάδοσης κατά 10%

Εφόσον μελετήσαμε τις αλλαγές στην συμπεριφορά του δικτύου με βάση την αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας θα προχωρήσουμε και εδώ στην αύξηση της απόστασης μετάδοσης αυτή τη φορά των κόμβων αισθητήρων του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι οι αισθητήρες μπορούν να μεταδώσουν σε μεγαλύτερη απόσταση τα πακέτα πληροφοριών τους. Αρχικά αυξάνουμε κατά 10% και τα 26 επίπεδα στον πίνακα Rmax ([Πίνακας 1](#)) κρατώντας την απορρόφηση ενέργειας Etx ([Πίνακας 1](#)) σταθερή στις αρχικές τις τιμές για όλα τα επίπεδα. Με αυτή την αύξηση προκύπτει μια μείωση των ελάχιστων αλμάτων σε όλο το σύνολο των τοπολογιών του δικτύου. Αυτή η μείωση είναι αναμενόμενη διότι αυξάνοντας την απόσταση που μπορούν να μεταδώσουν οι κόμβοι αισθητήρες χρειάζονται λιγότερα άλματα για να μεταδοθούν τα πακέτα πληροφοριών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου για τα

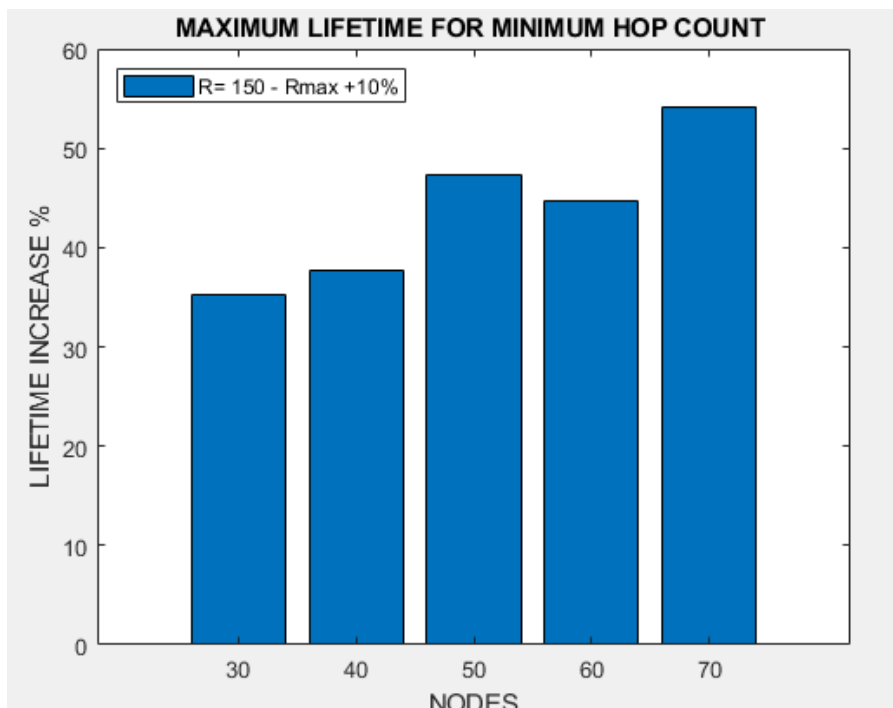
Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

ελάχιστα άλματα με τιμή από 35% μέχρι 55% για τις τοπολογίες με αριθμό κόμβων N από 30 έως 70. Η μέγιστη διάρκεια ζωής για απεριόριστα άλματα έχει επίσης αυξηθεί με τιμές από 25% έως 35%. Αναμενομένη μείωση παρατηρούμε και στα άλματα για την μέγιστη διάρκεια λειτουργία του δικτύου. Οι αλλαγές στην συμπεριφορά του δικτύου με την αύξηση στην απόσταση μετάδοσης είναι παράγοντας σε όλα τα μοντέλα της μαθηματικής επίλυσης και επηρεάζει τόσο την διάρκεια λειτουργίας του όσο και τα ελάχιστα άλματα του. Επομένως, το δίκτυο βελτιστοποιείται σημαντικά λόγω της αύξησης της απόστασης μετάδοσης και με αυτό μειώνεται και η καθυστέρηση μετάδοσης (Latency) των πακέτων πληροφορίας και αυξάνουμε την διάρκεια αυτονομίας του.

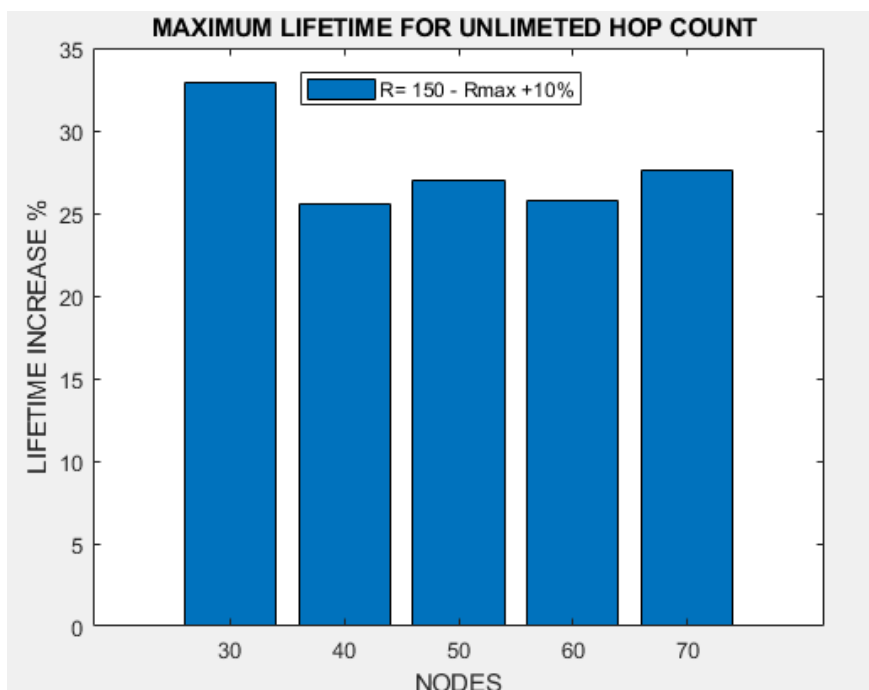


Εικόνα 39. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση 10% στην απόσταση μετάδοσης R_{max} .

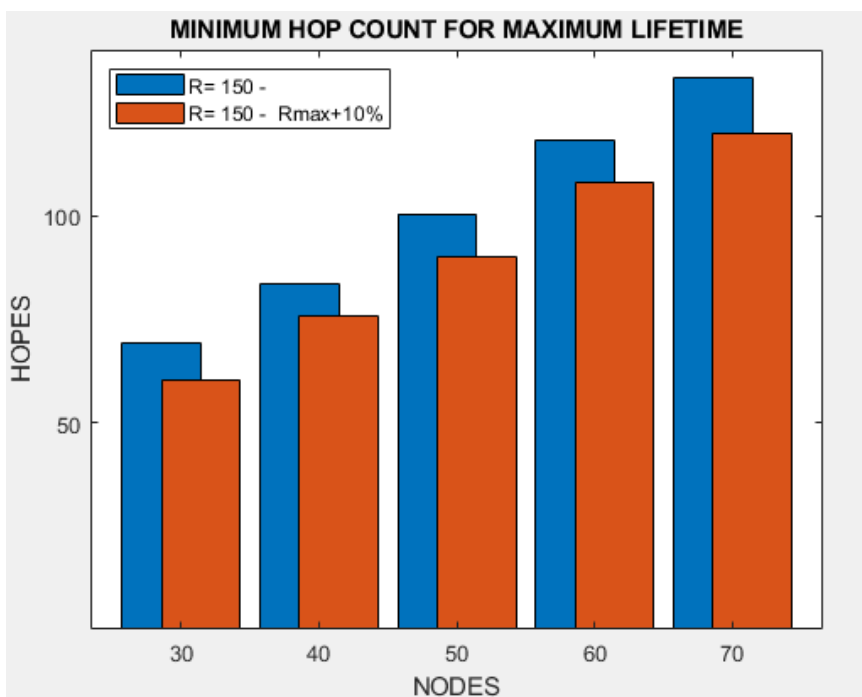
Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς



Εικόνα 40. Ποσοστιαία αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων σε σύγκριση με την αύξηση 10% στην απόσταση μετάδοσης Rmax.



Εικόνα 41. Ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου για την σε σύγκριση με την αύξηση 10% στην απόσταση μετάδοσης Rmax.

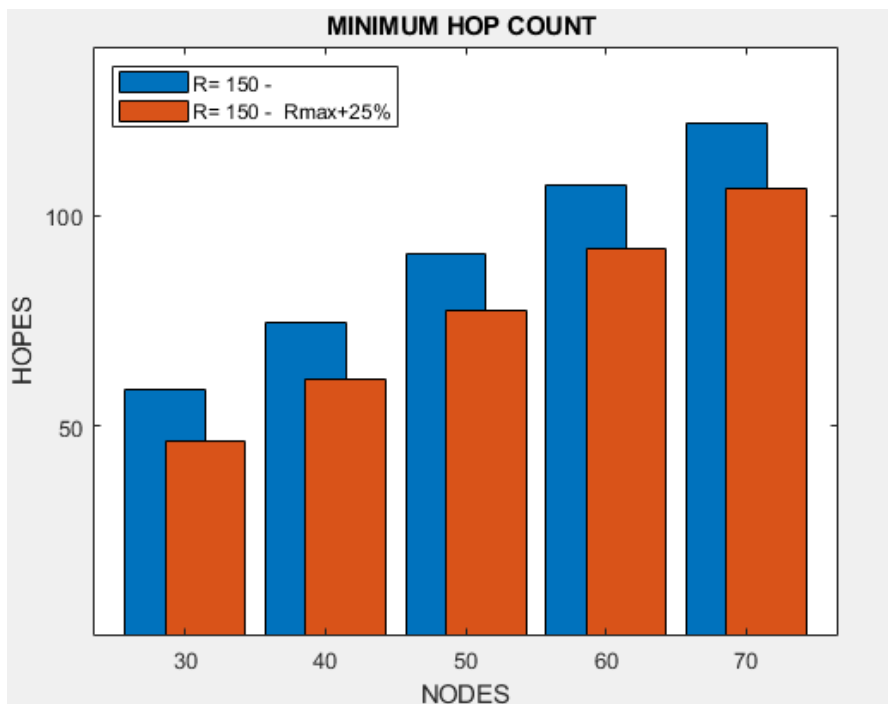


Εικόνα 42. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση 10% στην απορρόφηση ενέργειας Rmax.

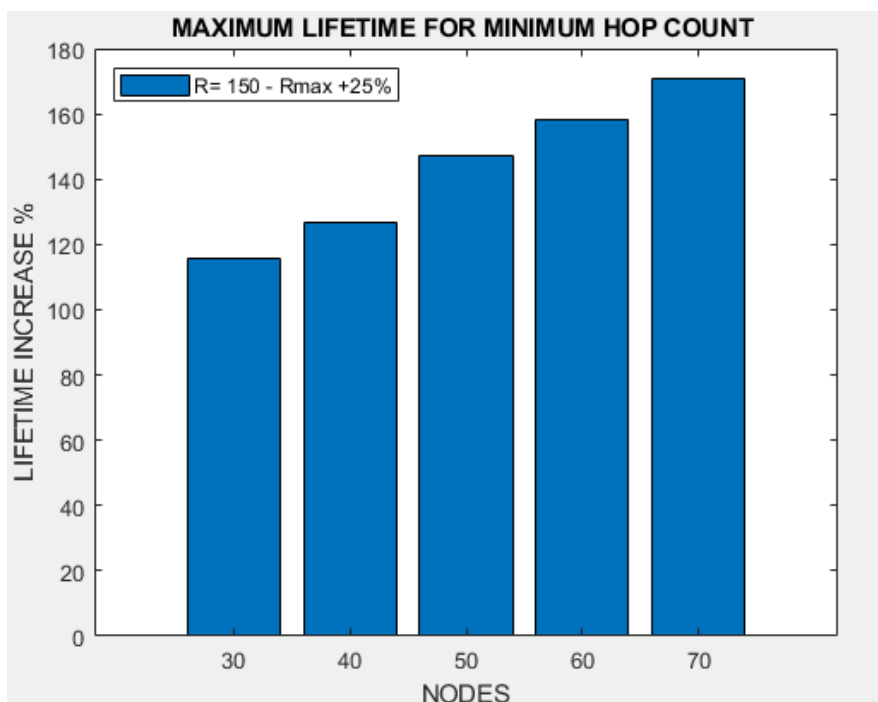
4.5.2 Αύξηση απόστασης μετάδοσης κατά 25%

Καθώς αυξάνουμε παραπάνω την απόσταση μετάδοσης παρατηρούμε τις αλλαγές στο δίκτυο μας να παίρνουν μεγαλύτερο μέγεθος. Η αύξηση κατά 25% επιφέρει μεγαλύτερη μείωση στα ελάχιστα άλματα του δικτύου σε σχέση με την προηγούμενη αύξηση που μελετήσαμε. Αυτή η αναμενόμενη μείωση στα άλματα έχει αντίκτυπο και στην μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου για τα ελάχιστα άλματα και η αύξηση της έχει τιμές από 120% έως 170%. Η μέγιστη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου για απεριόριστα άλματα έχει και αυτή σημαντική αύξηση από 60% έως 80% σε όλο το σύνολο των τοπολογιών του δικτύου. Λόγω της αύξησής της ανεξάρτητα μέγιστης ζωής του δικτύου τα συνολικά άλματα πρέπει να μειωθούν κάτι το οποίο παρατηρείται και εδώ με σημαντική μείωση από 15 έως και 30 άλματα σε τοπολογίες με 30 έως 70 κόμβους. Αυτό μας δείχνει πόσο σημαντικό ρόλο έχει η απόσταση που μπορούν να μεταδώσουν την πληροφορία οι κόμβοι αισθητήρες για την βελτιστοποίηση του δικτύου ως αναφορά την καθυστέρηση (Latency) και την αυτονομία.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

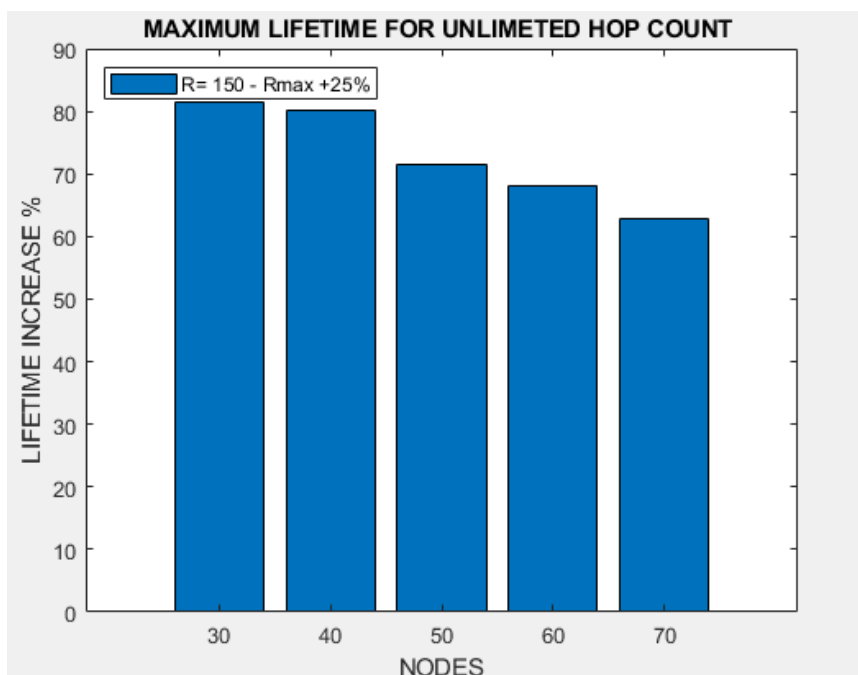


Εικόνα 43. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την αύξηση 25% στην απόσταση μετάδοσης Rmax.

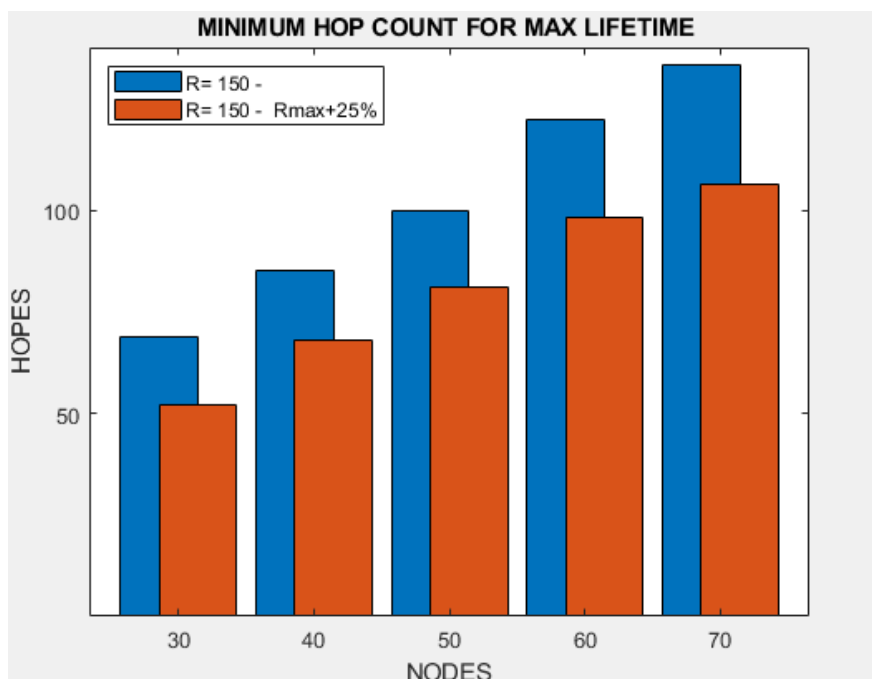


Εικόνα 44. Ποσοστιαία αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων σε σύγκριση με την αύξηση 25% στην απόσταση μετάδοσης Rmax.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς



Εικόνα 45. Ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου για την σε σύγκριση με την αύξηση 25% στην απόσταση μετάδοσης Rmax.



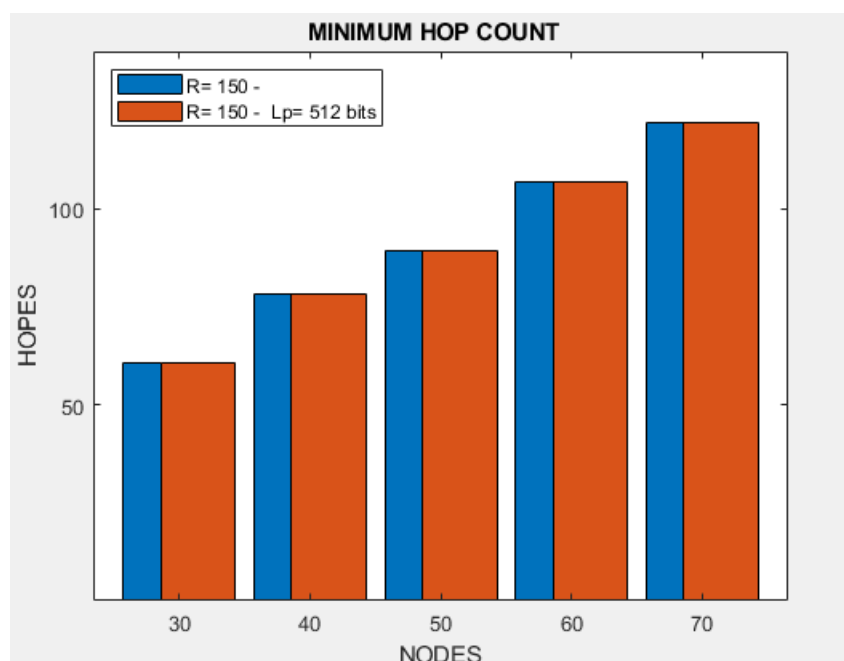
Εικόνα 46. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση 25% στην απορρόφηση ενέργειας Rmax.

4.6 Αποτελέσματα μοντέλου με διαφορετικό μέγεθος πακέτου πληροφορίας

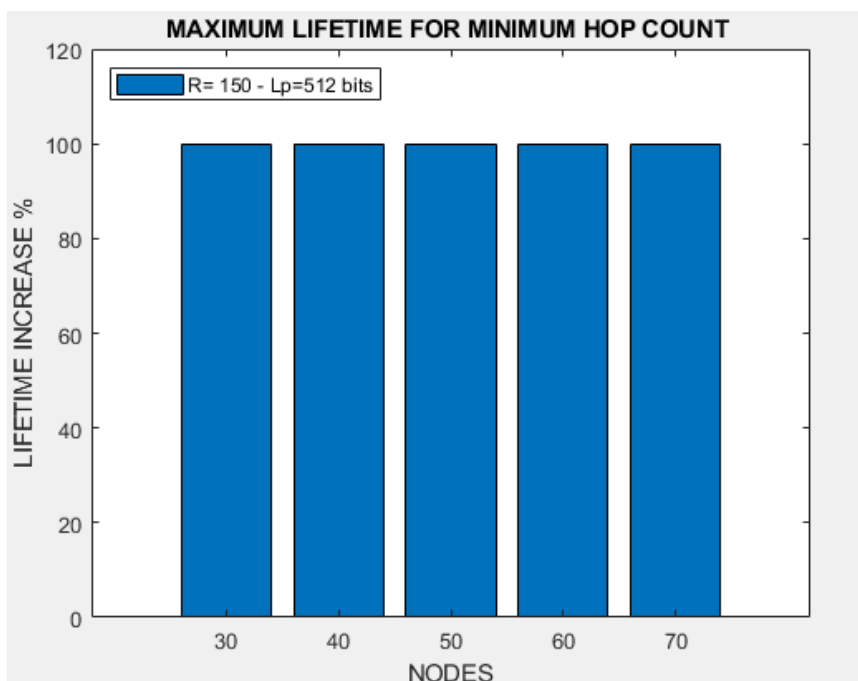
4.6.1 Μείωση του πακέτου πληροφορίας στα 512 bits

Μελετώντας την συμπεριφορά του δικτύου μας όσον αφορά το μέγεθος του πακέτου πληροφορίας (L_p) που μεταδίδουν οι κόμβοι αισθητήρες προχωράμε στην μείωσή του από τα 1024 που ήταν η αρχική του τιμή στα 512 bits. Αυτό σημαίνει ότι οι αισθητήρες παράγουν ένα πακέτο μικρότερο σε μέγεθος κάτι το οποίο έχει άμεση σχέση με την διάρκεια λειτουργίας του δικτύου. Τα ελάχιστα άλματα του δικτύου παραμένουν ανεπηρέαστα πριν και μετά την μείωση στο μέγεθος του πακέτου, όπως ήταν αναμενόμενο. Η διάρκεια λειτουργίας του δικτύου μας, όμως, αυξήθηκε κατά 100% σταθερά για όλες τις τοπολογίες του. Αυτό συμβαίνει, διότι το μέγεθος του πακέτου είναι ένας από του παράγοντες στον υπολογισμό της απορρόφησης της ενέργειας, όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2 στην εξίσωση (9). Ίδια σταθερή αύξηση 100% έχει και η μέγιστη διάρκεια λειτουργίας για απεριόριστα άλματα. Λόγω αυτής της αύξησης στην μέγιστη διάρκεια ζωής επηρεάζονται τα άλματα στο σύνολο των τοπολογιών του δικτύου.

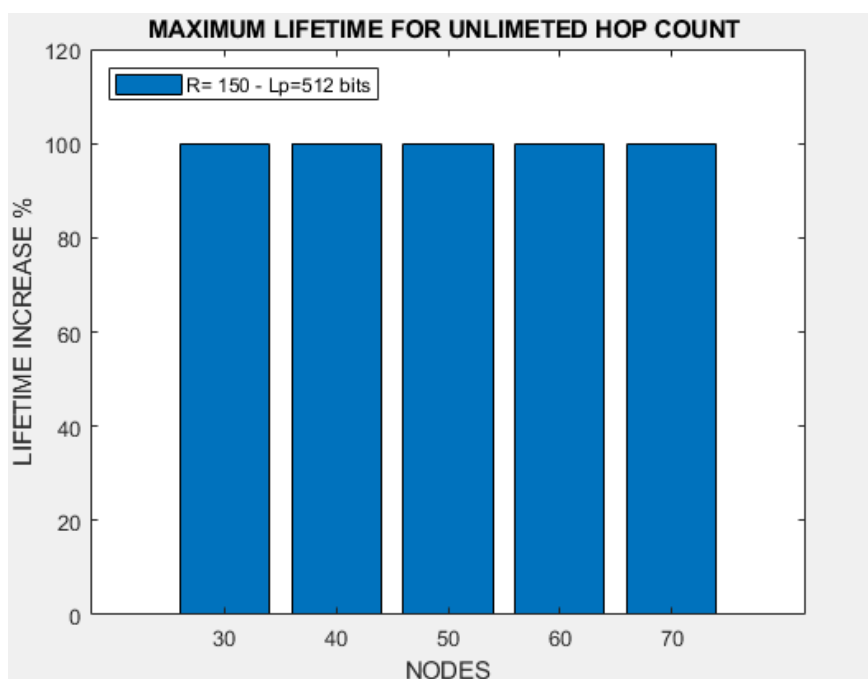
Παρατηρούμε, λοιπόν, μια αύξηση στα άλματα για την επίτευξη της μέγιστης διάρκειας ζωής του με τιμή από 3 έως 10.



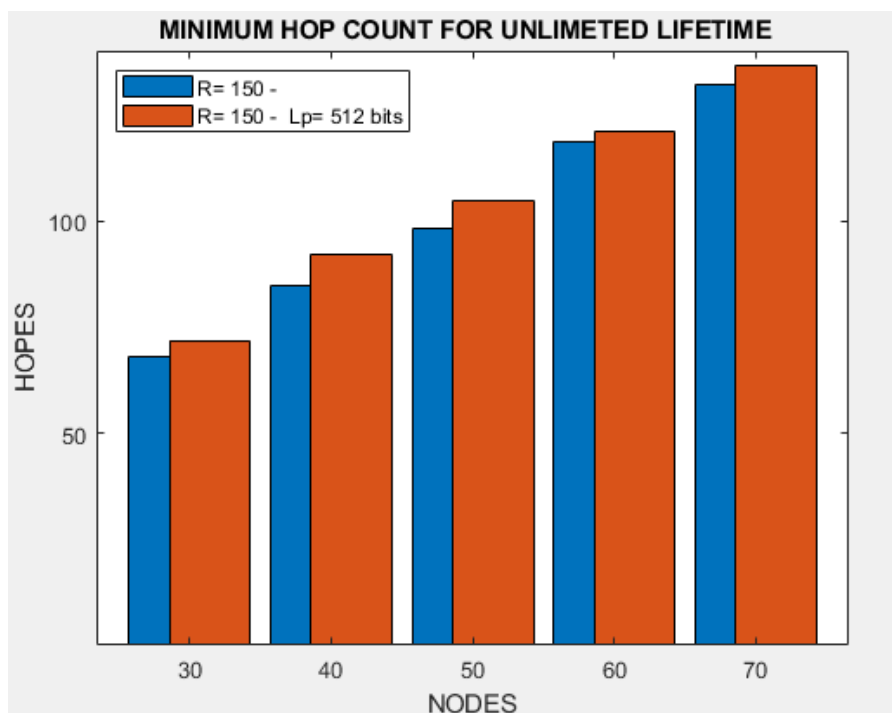
Εικόνα 47. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την μείωση στα 512 bits στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας L_p .



Εικόνα 48. Ποσοστιαία αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων σε σύγκριση με την μείωση στα 512 bits στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας L_p .



Εικόνα 49. Ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου για την σε σύγκριση με την μείωση στα 512 bits στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας L_p .



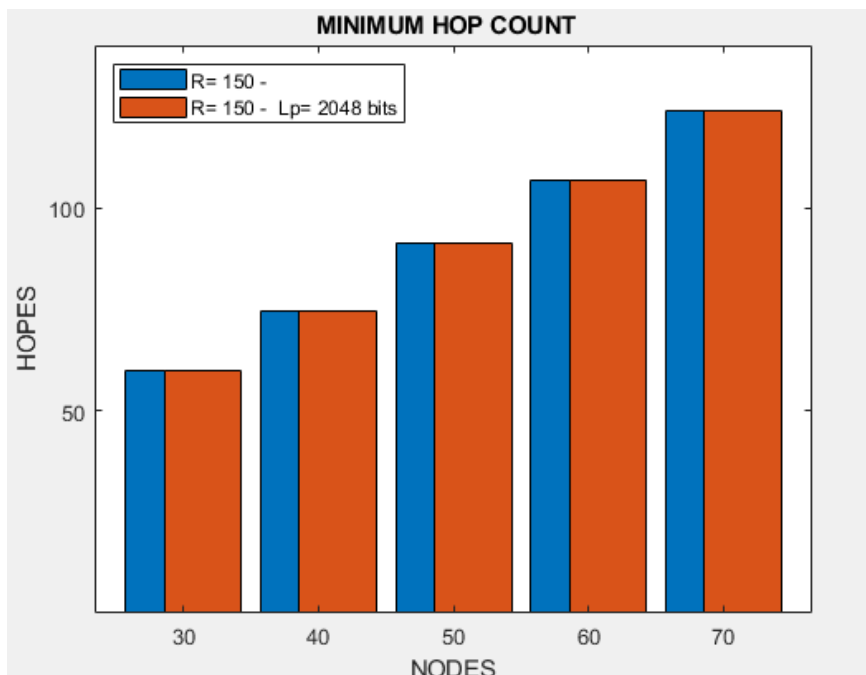
Εικόνα 50. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την μείωση στα 512 bits στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας L_p .

4.6.2 Αύξηση του πακέτου πληροφορίας στα 2048 bits

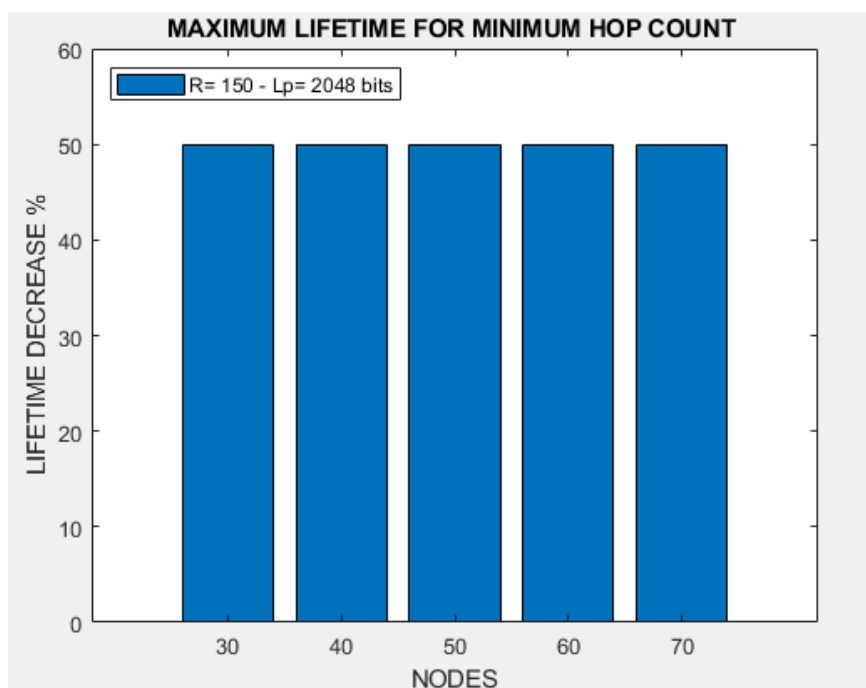
Αντίθετα από την μείωση στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας μελετούμε και την συμπεριφορά του δικτύου μας στην περίπτωση αύξησης του πακέτου. Στην περίπτωση αυτή, το αρχικό μέγεθος του πακέτου μας ήταν 1024 bits και το αυξάνουμε στα 2048 κρατώντας σταθερά όλους του υπολοίπους παράγοντες του μοντέλου στις αρχικές τους τιμές. Όπως αναλύθηκε προηγούμενος, το μέγεθος του πακέτου είναι σημαντικός παράγοντας στην απορρόφηση της ενέργειας κατά την μετάδοση πληροφοριών αναμεσα στους κόμβους αισθητήρες ([Εξίσωση 9](#)).

Τα ελάχιστα άλματα του δικτύου παραμένουν ανεπηρέαστα και εδώ, όπως περιμέναμε. Η διάρκεια λειτουργίας μειώνεται κατά 50% σταθερά για όλο το σύνολο των τοπολογιών με N κόμβους από 30 έως 70. Την ίδια μείωση 50% παρατηρούμε και στην μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου για απεριόριστα άλματα. Αυτό επιφέρει μείωση και στο σύνολο των αλμάτων για την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του. Η μείωση στα άλματα κυμαίνεται από 1 έως 5 συνολικά για τις τοπολογίες με 30 έως 70 κόμβους αισθητήρες.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

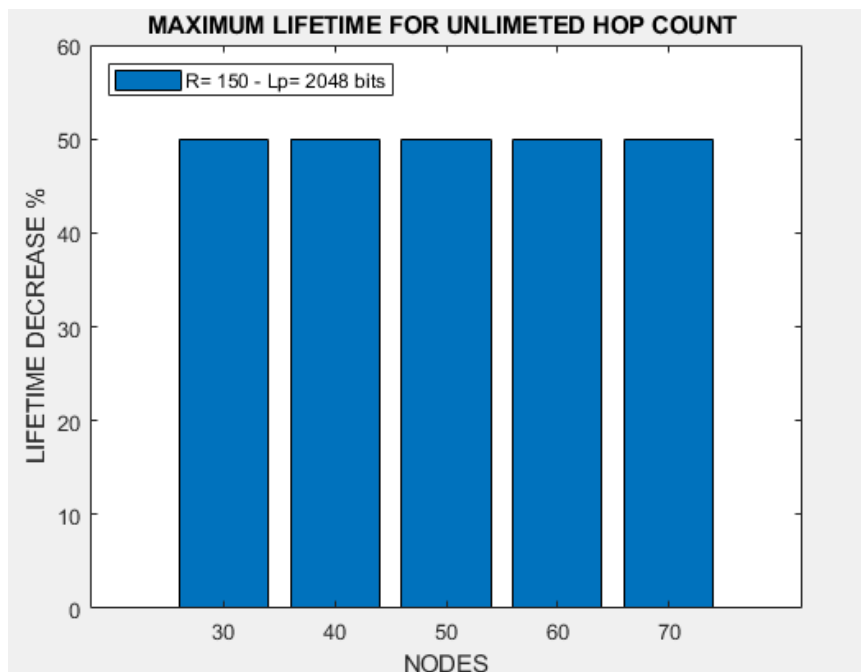


Εικόνα 51. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την αύξηση στα 2048 bits στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας Lp.

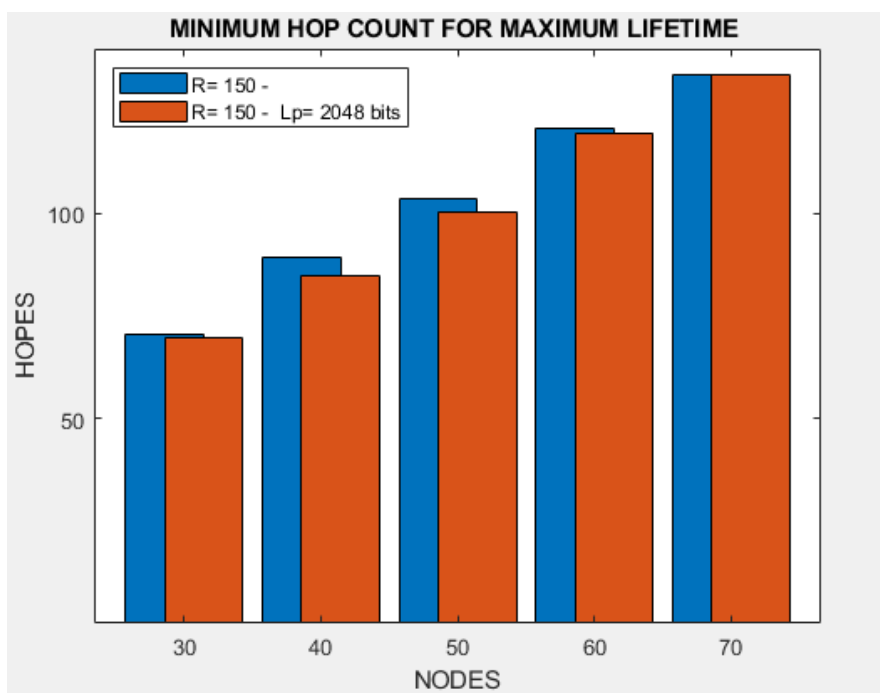


Εικόνα 52. Ποσοστιαία μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων σε σύγκριση με την αύξηση στα 2048 bits στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας Lp.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς



Εικόνα 53. Ποσοστιαία μείωση της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου για την σε σύγκριση με την αύξηση στα 2048 bits στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας Lp.

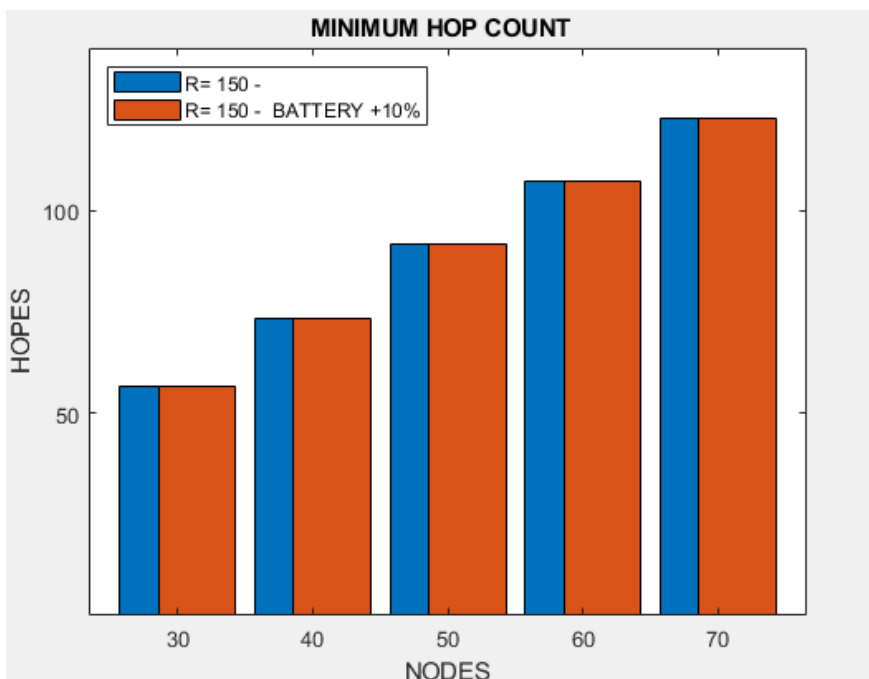


Εικόνα 54. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση στα 2048 bits στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας Lp.

4.7 Αποτελέσματα μοντέλου με αύξηση στην ισχύ της μπαταρίας των αισθητήρων

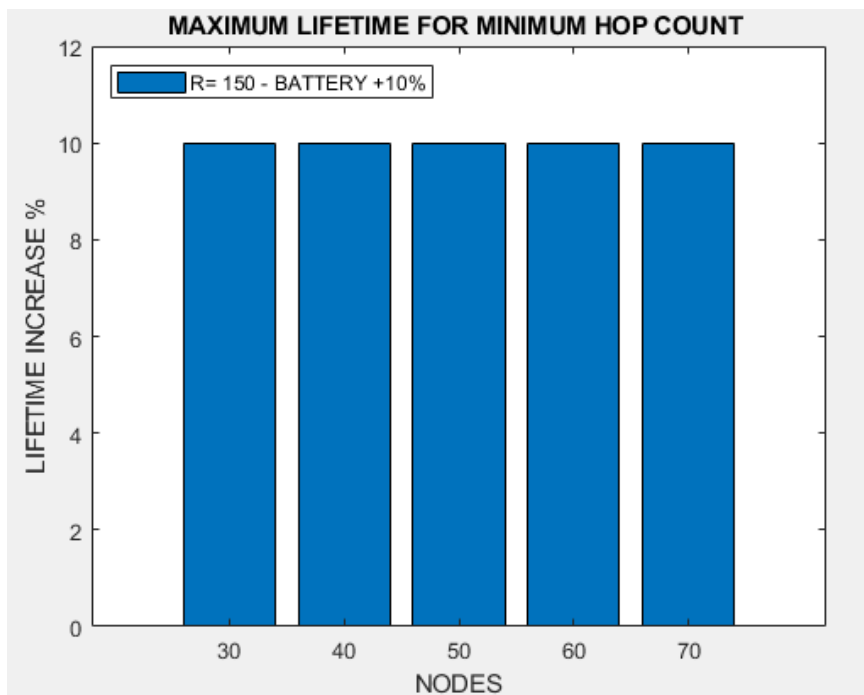
4.7.1 Αύξηση της μπαταρίας των αισθητήρων κατά 10%

Λόγω της ύπαρξης μπαταρίας στους αισθητήρες το δίκτυο μας διαθέτει μια αυτονομία η οποία φυσικά είναι περατή. Καθώς θα αυξήσουμε την χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων η οποία είναι 25 KJ είναι αναμενόμενη η αύξηση στην διάρκεια λειτουργίας του, διότι αποτελεί παράγοντα στην εξίσωση (9) που αναλύσαμε στο Κεφάλαιο 2, ο οποίος περιορίζει και τον αριθμό των πακέτων που μπορεί να μεταδώσει ένας αισθητήρας. Είναι σημαντικό, όμως, να μελετήσουμε τι αντίκτυπο έχει αυτή η αύξηση στο δίκτυο μας. Αυξάνοντας, λοιπόν, την χωρητικότητα της μπαταρίας κατά 10% η μέγιστη διάρκεια λειτουργίας αυξάνεται σταθερά κατά 10% σε όλες τις τοπολογίες του δικτύου για N κόμβους από 30 έως 70. Τα ελάχιστα άλματα του δικτύου δεν επηρεάζονται από αυτήν την αλλαγή, διότι δεν αποτελεί παράγοντα στο μοντέλο επίλυσής του η χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων. Η μέγιστη διάρκεια ζωής για απεριόριστα άλματα έχει και αυτή αυξηθεί κατά 10% σταθερά σε όλες τις τοπολογίες κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο. Η αύξηση αυτή, όμως, επηρεάζει τα άλματα για την μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας του λόγω της εξίσωσης 10 που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, τα οποία αυξάνονται από 1 έως 5 άλματα κατά μέσο όρο σε όλο το σύνολο των τοπολογιών.

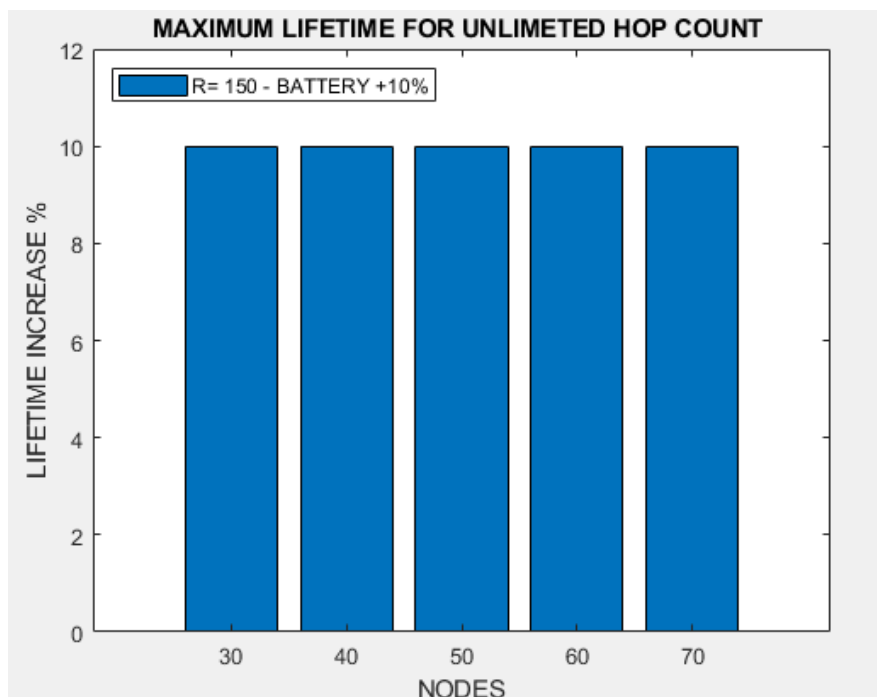


Εικόνα 55. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την αύξηση 10% στην χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων.

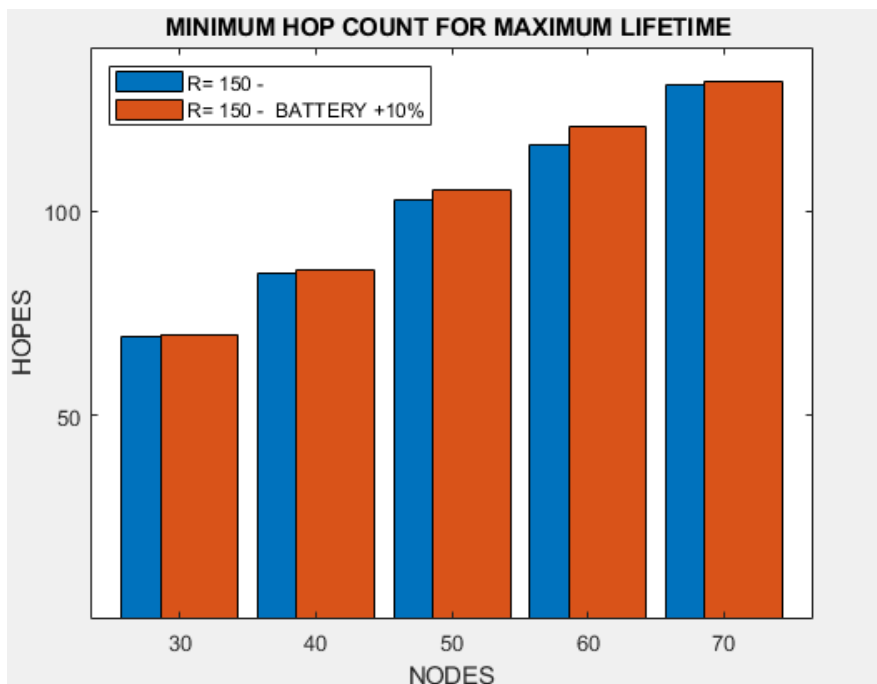
Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς



Εικόνα 56. Ποσοστιαία αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων σε σύγκριση με την αύξηση 10% στην χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων.



Εικόνα 57. Ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου για την σε σύγκριση με την αύξηση 10% στην χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων.

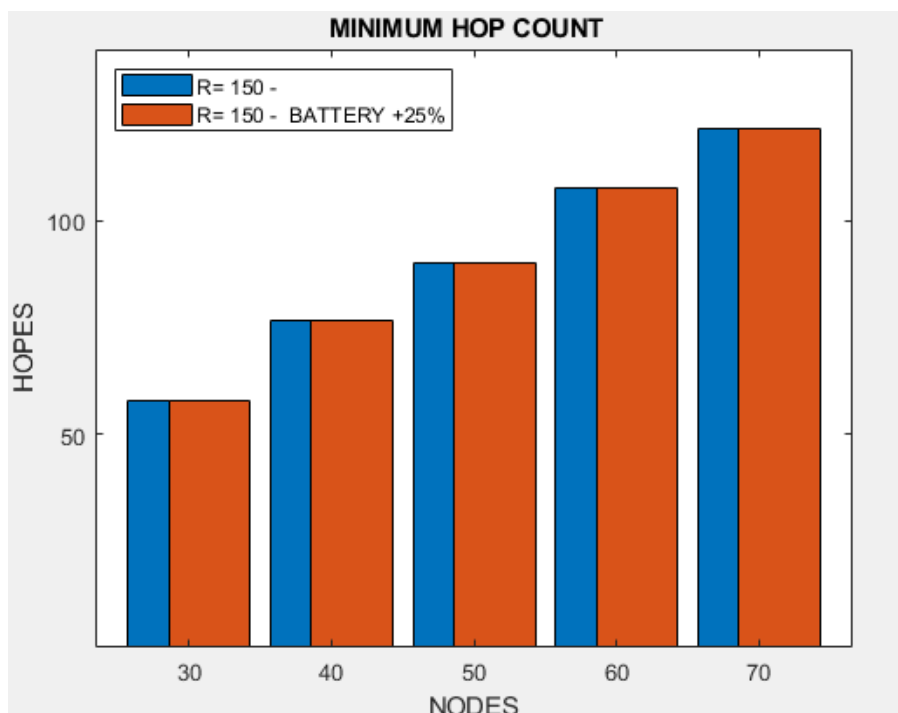


Εικόνα 58. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση 10% στην χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων.

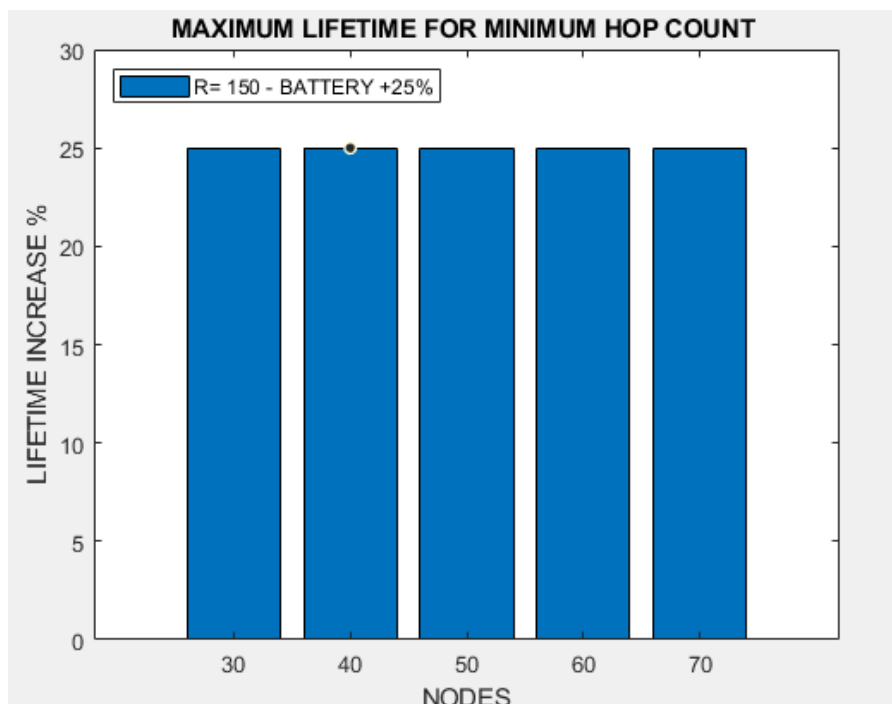
4.7.2 Αύξηση της μπαταρίας των αισθητήρων κατά 25%

Προχωρώντας σε περαιτέρω αύξηση στην χωρητικότητα της μπαταρίας που διαθέτουν οι κόμβοι αισθητήρες του δικτύου μας θα μελετήσουμε το μέγεθος των αλλαγών στην συμπεριφορά τους. Αυξάνουμε την μπαταρία τους από 10% στην προηγούμενη ανάλυση στα 25% και συγκρίνουμε τις αλλαγές στο δίκτυο μας σε σχέση με την αρχική χωρητικότητα της μπαταρίας που ήταν 25 KJ. Τα ελάχιστα άλματα του δικτύου παραμένουν ανεπηρέαστα και εδώ, καθώς δεν επηρεάζεται το μοντέλο επίλυσής του από την αύξηση της μπαταρίας στους αισθητήρες. Η μέγιστη διάρκεια ζωής του, όμως, αυξάνεται κατά 25% για τα ελάχιστα άλματα σε όλο το σύνολο των τοπολογιών με κόμβους από 30 έως 70. Την ίδια αύξηση 25% παρατηρούμε και στην μέγιστη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου για απεριόριστα άλματα. Η αύξηση στην διάρκεια ζωής επηρεάζει τα άλματα του δικτύου για την επίτευξη της μεγιστοποίησής της, όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2 ([Εξίσωση 10](#)). Τα άλματα αυξάνονται από 2-4 κατά μέσο όρο σε όλο το σύνολο των τοπολογιών από 30 έως 70 κόμβους. Επομένως, αυξάνοντας την χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων αυξάνεται και η συνολική αυτονομία του δικτύου.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς

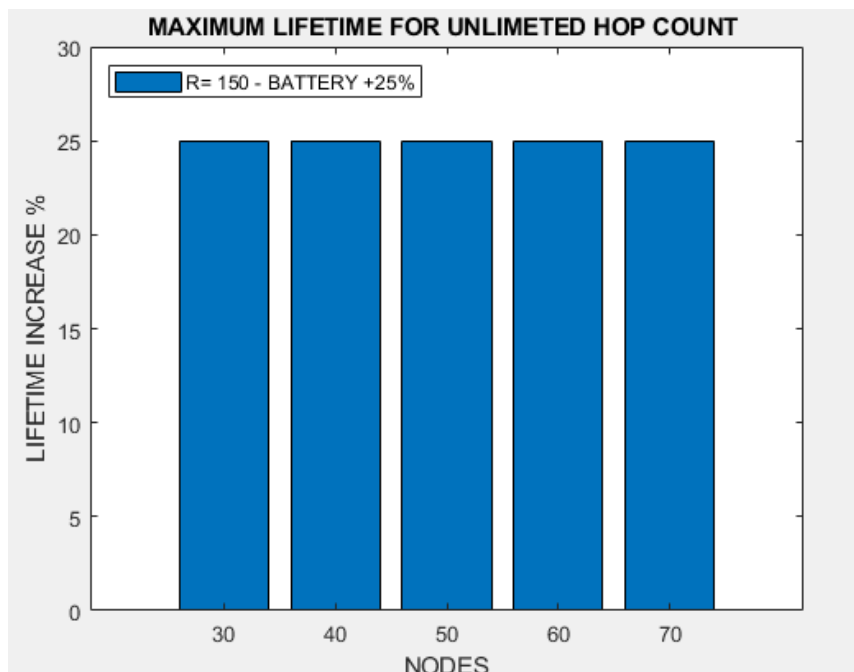


Εικόνα 59. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την αύξηση 25% στην χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων.

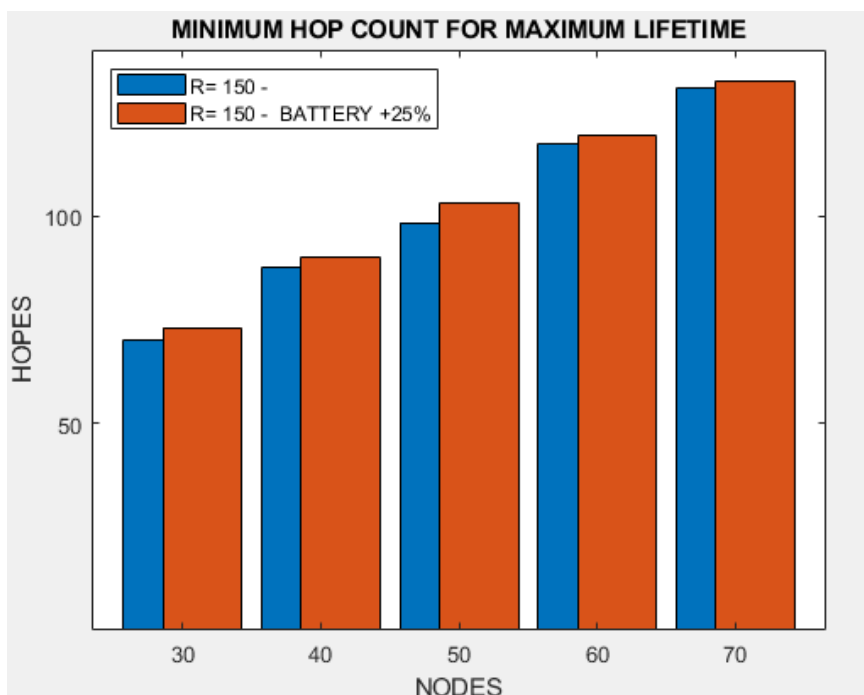


Εικόνα 60. Ποσοστιαία αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου για την ελαχιστοποίηση των αλμάτων σε σύγκριση με την αύξηση 25% στην χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων.

Αποτίμηση της απόδοσης συγκλίνοντων οπτικών και ασύρματων δικτύων 5ης γενιάς



Εικόνα 61. Ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης διάρκειας ζωής του δικτύου για την σε σύγκριση με την αύξηση 25% στην χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων.



Εικόνα 62. Ελάχιστα άλματα για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου σε σύγκριση με την με την αύξηση 25% στην χωρητικότητα της μπαταρίας των αισθητήρων.

5. Σύνοψη

5.1 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας στην παρούσα διπλωματική εργασία, αρχικά παρουσιάστηκε η έννοια των ασύρματων δικτύων αισθητήρων προκειμένου να μπορέσει να κατανοήσει ο αναγνώστης την δομή αλλά και την λειτουργία τους στον χώρο των επικοινωνιών. Έπειτα, αναπτύχθηκε η έννοια της βελτιστοποίησης τέτοιων δικτύων. Παρουσιάστηκαν μελέτες που θέτουν διαφορετικές οπτικές για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Στη συνέχεια, αναλυθήκαν τα μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης τα οποία υιοθετήσαμε για την προσομοίωση του δικτύου. Τέτοια μοντέλα είναι η δρομολόγηση ελαχιστοποίησης των αλμάτων του δικτύου και η δρομολόγηση με στόχο την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του. Εφόσον επεξηγήθηκε ο κώδικας που αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα MATLAB για την δημιουργία της τοπολογίας με τυχαία κατανομή και στο μαθηματικό εργαλείο GAMS για την μαθηματική επίλυση του δικτύου σύμφωνα με την δρομολόγηση που επιλέγουμε κάθε φορά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Χρειάστηκε να προσομοιωθεί μεγάλος αριθμός τοπολογιών σύμφωνα με τα μοντέλα δρομολόγησης για να αποκτήσουμε μια αντιπροσωπευτική εικόνα για την συμπεριφορά του δικτύου μας.

Αναλυτικότερα, τονίστηκε η επίπτωση που έχει η δρομολόγηση ελαχιστοποίησης των αλμάτων στην διάρκεια αυτονομίας του δικτύου αλλά και η αναμενομένη θετική μείωση στην καθυστέρηση μετάδοσης των πληροφοριών προς τον προορισμό τους. Ταυτόχρονα, ερευνήθηκε σε περιπτώσεις τοπολογιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως η ακτίνα διασποράς το όφελος της δρομολόγησης για την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου αλλά και την επίπτωση που προκύπτει στον αριθμό των αλμάτων στο σύνολο του δικτύου. Επιγραμματικά, μελετήθηκαν εκτενώς τοπολογίες δικτύου με αριθμό κόμβων από 30 έως 70 για ακτίνα διασποράς 90, 150 και 200. Κατά την συλλογή των αποτελεσμάτων οι μεγαλύτερες επιπτώσεις στην διάρκεια ζωής χρησιμοποιώντας την δρομολόγηση ελαχιστοποίησης αλμάτων παρατηρήθηκαν στα πυκνότερα δίκτυα. Αυτό συμβαίνει, διότι σε αραιές τοπολογίες ασύρματων δικτύων αισθητήρων ακόμα και με την δρομολόγηση μεγιστοποίησης της ζωής τους, δεν υπάρχουν αρκετές ενεργειακά αποδοτικές διαδρομές για την μετάδοση των πακέτων πληροφοριών προς τον σταθμό βάσης[1].

Τέλος, μελετήθηκε το μέγεθος των αλλαγών στο δίκτυο μας με ακτίνα διασποράς 150 όσον αφορά τα συνολικά άλματα και την διάρκεια λειτουργίας του τροποποιώντας διάφορες παραμέτρους που οριοθετούν το δίκτυο. Οι παράμετροι που τροποποιήθηκαν είναι η αύξηση στην απόσταση μετάδοσης των κόμβων (R_{max}), η αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας κατά την μετάδοση πακέτων πληροφοριών (E_{tx}), η αύξηση αλλά και η μείωση στο μέγεθος του πακέτου πληροφορίας που δημιουργούν οι κόμβοι-αισθητήρες (512, 2048 bits) και η αύξηση της διαθέσιμης ισχύς (battery) των κόμβων κατά 10% και 25%.

5.2 Μελλοντική εξέλιξη και προσδοκίες

Έχοντας κατανοήσει το όφελος στην βελτιστοποίηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων δεν γίνεται να παραβλέψουμε τις δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν αυτές οι τεχνικές δρομολόγησης σε νέες τεχνολογίες. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [18] χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως σε έξυπνα συστήματα γεωργίας αλλά και σε εφαρμογές έξυπνων πόλεων και σπιτιών (Smart Cities), (Smart Homes) προσφέροντας ποικίλες λειτουργίες για την καλύτερη ασφάλεια, διαβίωση και την επίβλεψη συστημάτων με την χρήση επικοινωνίας μεταξύ μηχανών (M2M). Πέραν αυτών των εφαρμογών, η παρούσα μελέτη μπορεί να αποτελέσει το έναυσμα για την καθιέρωση αποδοτικών ενεργειακά ασύρματων δικτύων αισθητήρων 5^{ης} γενιάς επαναπροσδιορίζοντας τα πρωτόκολλα επικοινωνίας της. Με την βελτιστοποίηση τέτοιων δικτύων τα οποία θα αποτελέσουν πολύ σύντομα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας κατά την λειτουργία τους δεν θα επιβαρύνει σε μεγάλο βαθμό τις παγκόσμιες απαιτήσεις ενέργειας. Ολοκληρώνοντας στα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων [21] η προσοχή έχει εστιασθεί στα πρωτόκολλα δρομολόγησης που αναπτύσσονται για κάθε κατάσταση. Αντικείμενο προς μελέτη αποτελεί η εύρεση της κοινής λύσης για την βελτιστοποίηση όλων των διαφορετικών δομών και τοπολογιών στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Μια τεχνική που μπορεί να δώσει την λύση είναι η χρήση τεχνητής νοημοσύνης, η οποία μπορεί να προσαρμόζει τα πρωτόκολλα για την βελτιστοποίησή τους ανάλογα με το δίκτυο που αναπτύσσεται κάθε φορά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H. U. Yildiz, M. Temiz, and B. Tavli, “Impact of limiting hop count on the lifetime of wireless sensor networks,” *Communications Letters, IEEE*, vol. 19, no. 4, pp. 569–572, 2015.
- [2] Behnam Ojaghi Kahjogh and Greg Bernstein, “Energy and Latency Optimization in Software Defined Wireless Networks,” pp. 978-1-5090-4749-9, 2017 IEEE
- [3] S.-S. Chiang, C.-H. Huang, and K.-C. Chang, “A minimum hop routing protocol for home security systems using wireless sensor networks,” *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 4, pp. 1483–1489, 2007.
- [4] B. Nazir, H. Hasbullah, and S. A. Madani, “Sleep/wake scheduling scheme for minimizing end-to-end delay in multi-hop wireless sensor networks,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2011, no. 1, pp. 1–14, 2011.
- [5] M. Gupta and S. Singh, “Greening of the internet,” in *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, ser. SIGCOMM ’03. New York, NY, USA: ACM, 2003, pp. 19–26. [Online].
- [6] L. Chiaraviglio, M. Mellia, and F. Neri, “Reducing power consumption in backbone networks,” in *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Communications*, ser. ICC’09. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2009, pp. 2298–2303. [Online].
- [7] R. Wang, Z. Jiang, S. Gao, W. Yang, Y. Xia, and M. Zhu, “Energyaware routing algorithms in software-defined networks,” in *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2014 IEEE 15th International Symposium on a. IEEE*, 2014, pp. 1–6.
- [8] D. Zeng, P. Li, S. Guo, T. Miyazaki, J. Hu, and Y. Xiang, “Energy minimization in multi-task software-defined sensor networks,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 64, no. 11, pp. 3128–3139, 2015.
- [9] L. Galluccio, S. Milardo, G. Morabito, and S. Palazzo, “Sdn-wise: Design, prototyping and experimentation of a stateful sdn solution for wireless sensor networks,” in *Computer Communications (INFOCOM), 2015 IEEE Conference on. IEEE*, 2015, pp. 513–521.
- [10] G. Oliva, R. Setola, S. Panzieri, and F. Pascucci, “Localization of networks with presence and distance constraints based on 1-hop and 2-hop mass-spring optimization,” *{ICT} Express*, vol. 2, no. 1, pp. 19 – 22, 2016, special Issue on Positioning Techniques and Applications. [Online].

- [11] S.-S. Chiang, C.-H. Huang, and K.-C. Chang, “A minimum hop routing protocol for home security systems using wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1483–1489, Nov. 2007.
- [12] B. Nazir, H. Hasbullah, and S. A. Madani, “Sleep/wake scheduling scheme for minimizing end-to-end delay in multi-hop wireless sensor networks,” *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2011, pp. 92:1–92:14, 2011.
- [13] K. N. Kannan and B. Paramasivan, “Development of energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks using optimal gradient routing with on demand neighborhood information,” *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 2014, 2014, Art. ID. 208023.
- [14] A. Capone, M. Cesana, D. DeDonno, and I. Filippini, “Deploying multiple interconnected gateways in heterogeneous wireless sensor networks: An optimization approach,” *Comput. Commun.*, vol. 33, no. 10, pp. 1151–1161, Jun. 2010.
- [15] J.Kim,X.Lin,N.Shroff,andP.Sinha,“Minimizingdelayandmaximizing lifetime for wireless sensor networks with anycast,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 18, no. 2, pp. 515–528, Apr. 2010.
- [16] <https://www.gams.com/products/introduction/>
- [17] <http://trl.iba.edu.pk/News/mica2.pdf>
- [18] <https://www.boldbusiness.com/digital/wireless-sensor-networks-hyperconnected-future/>
- [19] Ing. Sergio Huertas Martínez ; Ing. PhD. Octavio J. Salcedo ; Ing. Brayan Steven Reyes Daza “IoT application of WSN on 5G infrastructure”
- [20] S. GANESH “Efficient and secure routing protocol for wireless sensor network” ,2014
- [21] Akila, Uma Maheswari. A Survey on Recent Techniques for Energy Efficient Routing in WSN. *International Journal of Sensors and Sensor Networks*. Vol. 6, No. 1, 2018, pp. 8-15. doi: 10.11648/j.ijssn.20180601.12

[22] <https://www.elprocus.com/introduction-to-wireless-sensor-networks-types-and-applications/>