

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ 6LOWPAN ΔΙΚΤΥΑ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

Νίκος Τσεκούρας

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2012

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Διαχείριση Κινητικότητας σε 6LoWPAN Δίκτυα Αισθητήρων

Νίκος Τσεκούρας

Επιβλέπων Καθηγητής
Βάσος Βασιλείου

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των
απαιτήσεων απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του
Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2012

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βάσο Βασιλείου, για την υποστήριξη και καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την διάρκεια έρευνας και υλοποίησης της παρούσας εργασίας, καθώς και για την επίτευξη μιας άψογης συνεργασίας. Επίσης, να τον ευχαριστήσω για την κατανόηση και την βοήθεια στα όποια προβλήματα προέκυψαν στη πορεία.

Επίσης, ξεχωριστές ευχαριστίες πρέπει να δοθούν στον διδακτορικό φοιτητή του τμήματος, Ζήνωνα Ζήνωνος, ο οποίος βρισκόταν εκεί καθ' όλη της διάρκεια της χρονιάς για να με συμβουλευεί μέσα από εποικοδομητικές συζητήσεις για τα όποια αμφιλεγόμενα ή όχι σημεία της πτυχιακής μου εργασίας, αλλά και της καθοδήγησής μου για την εξέλιξή της.

Αξίζει να δοθούν ευχαριστίες και στους ερευνητές (Contiki developers) που συνεργαστήκαμε μέσω ηλεκτρονικών μηνυμάτων για επίλυση πολλών προβλημάτων που εμφανίστηκαν.

Εν τέλη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους μου και τη φίλη μου Μαρία, για τη στήριξη που μου έδιναν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Περίληψη

Τα δίκτυα αισθητήρων έχουν γίνει πλέον μέρος της καθημερινότητάς μας και αποτελούν αντικείμενο εντατικής έρευνας τα τελευταία χρόνια. Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν ένα από τους πιο σημαντικούς τομείς των δικτύων. Η τελευταία εξέλιξη των δικτύων αυτών, αποτελεί το 6LoWPAN δίκτυο αισθητήρων. Το 6LoWPAN ερμηνεύεται ως “IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network” και καθορίζει τον τρόπο μεταφοράς των IPv6 πακέτων πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις.

Στόχος της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και κατανόηση βασικών πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών για IPv6, Neighbor Discovery, 6LoWPAN και κινητικότητα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN). Επίσης, με την κατανόηση του λειτουργικού συστήματος Contiki και του συστήματος προσομοίωσης COOJA, έγινε υλοποίηση σεναρίων για αξιολόγηση του Neighbor Discovery πρωτοκόλλου και εφαρμογή του ήδη υπάρχον RPL πρωτοκόλλου για την δρομολόγηση των πακέτων. Επίσης, προσαρμόστηκε η εφαρμογή Mobility για τη δημιουργία κινητών κόμβων.

Τέλος, πάρθηκε η πρωτοβουλία προσπάθειας υλοποίησης μιας ελαφριάς έκδοσης του 6LoWPAN Neighbor Discovery πρωτοκόλλου, αλλά απέτυχε για λόγους που αναλύονται στη παρούσα εργασία. Συνεπώς, προτείνεται από την παρούσα εργασία ως μερική λύση.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή.....	1
	1.1 Γενικά	1
	1.2 Σκοπός	3
	1.3 Δομή	4
Κεφάλαιο 2	Προηγούμενη Σχετική Εργασία.....	5
	3.1 Προηγούμενες Ερευνητικές Εργασίες	5
	3.2 Υπάρχουσα Υλοποίηση στο Contiki OS	6
Κεφάλαιο 3	Αρχιτεκτονική και Πρωτόκολλα Δικτύου.....	7
	3.1 Internet Protocol Suite	7
	3.2 Internet Protocol	8
	3.2.1 Internet Protocol version 4	9
	3.2.2 Internet Protocol version 6	11
	3.2.2.1 IPv6 Neighbor Discovery	12
	3.2.3 ICMPv6	16
Κεφάλαιο 4	Αρχιτεκτονική και Πρωτόκολλα Ασύρματου Δικτύου.....	18
	4.1 IEEE 802.11	18
	4.2 IEEE 802.15.4	19
	4.3 Τεχνολογία ZigBee	22
	4.4 Αρχιτεκτονική Ασύρματου Αισθητήρα	24
	4.5 Ασύρματα Δίκτυα Ad hoc	25
	4.6 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	28
	4.6.1 6LoWPAN Δίκτυα	30
	4.6.1.1 6LoWPAN Neighbor Discovery	33
	4.6.1.2 Πρωτόκολλο Δρομολόγησης RPL	34

Κεφάλαιο 5	Προσαρμογή και Υλοποίηση.....	36
5.1	Λειτουργικό Σύστημα Contiki	36
5.2	Προσαρμογή Πρωτοκόλλων	37
5.2.1	Προσαρμογή IPv6 Neighbor Discovery	38
5.2.1	Προσαρμογή RPL πρωτοκόλλου	39
5.2.1	Προσαρμογή CollectView λειτουργίας	40
5.3	Προβλήματα	41
5.3.1	Προσαρμογή CollectView	41
Κεφάλαιο 6	Σενάρια και Αποτελέσματα.....	42
6.1	Γενική Λειτουργία	42
6.2	Πρώτο Σενάριο	43
6.2.1	Ανάλυση	43
6.3	Δεύτερο Σενάριο	45
6.3.1	Ανάλυση	46
6.3.2	Μετρήσεις και Αποτελέσματα	48
6.4	Τρίτο Σενάριο	52
6.4.1	Ανάλυση	53
6.4.2	Μετρήσεις και Αποτελέσματα	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	Γενικά Συμπεράσματα	59
7.1	Γενικά Συμπεράσματα	59
7.2	Προτεινόμενη Λύση	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	Μελλοντική Εργασία	62
8.1	Πειραματισμός Παρούσας Εργασίας σε Test bench	62
8.2	Πειραματισμός Αλλαγής Δικτύου σε Test bench	62
8.3	Ανάπτυξη Αποτελεσματικού 6LoWPAN Neighbor Discovery	63
Βιβλιογραφία		65
Παράρτημα Α.....		A-1
Παράρτημα Β.....		B-1

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά	1
1.2 Σκοπός	3
1.3 Δομή	4

1.1 Γενικά

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια δεν άφησε αδιάφορο τον τομέα των δικτύων, αφού η ανάπτυξη της τεχνολογίας των αισθητήρων οδήγησε και στην ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Ένα τέτοιο δίκτυο, αποτελείται από πλήθος υπολογιστικών κόμβων μικρού φυσικού μεγέθους και μικρής χρηματικής αξίας, που διαθέτουν δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και φέρουν αισθητήρες που τους επιτρέπουν να παρατηρούν διάφορα φυσικά μεγέθη.

Επίσης, υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον όσο αφορά τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας με αισθητήρες σε σπίτια, γραφεία, εργοστάσια, ακόμη και σε εξωτερικούς χώρους. Συνεπώς, οδηγηθήκαμε στην επιθυμία ένταξης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στο διαδίκτυο με σκοπό οι συσκευές αυτές να μπορούν να είναι προσβάσιμες από οπουδήποτε. Η ενσωμάτωση μιας TCP/IP στοίβας στους αισθητήρες αυτούς φάνηκε μια ελκυστική ιδέα, που ενισχύθηκε με τις δυνατότητες του IPv6 πρωτοκόλλου. Ωστόσο το TCP/IP πρωτόκολλο έχει πολύ ισχυρές προδιαγραφές όσον αφορά τα underlying Link Layer, ενώ μερικά χαρακτηριστικά του Network Layer είναι πολύ πολύπλοκα και απαιτούν πολλούς πόρους.

Αποτέλεσμα των πιο πάνω, η IETF δημιούργησε το πρωτόκολλο 6LoWPAN (IPv6 πάνω σε χαμηλής ισχύος ασύρματα δίκτυα). Το πρωτόκολλο 6LoWPAN είναι ουσιαστικά ένα στρώμα προσαρμογής που μεσολαβεί μεταξύ των Network και Link Layers και παρέχει όλες τις υπηρεσίες που χρειάζεται το Network Layer και δεν προσφέρονται από το Link Layer.

Παρόλο που το 6LoWPAN πρωτόκολλο έχει ολοκληρώσει με επιτυχία τα καθήκοντά του, ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του IPv6 πρωτοκόλλου, το Neighbor Discovery πρωτόκολλο, δεν εφαρμόζει σωστά τα χαρακτηριστικά του underlying Link Layer, ούτε πληροί την εξοικονόμηση ενέργειας που χρειάζονται οι κόμβοι που αποτελούν ένα 6LoWPAN δίκτυο. Οι λόγοι που μας οδήγησαν στα πιο πάνω είναι:

- Η εκτεταμένη χρήση του multicast στο IPv6 Neighbor Discovery πρωτόκολλο. Το traffic του multicast είναι δαπανηρό σε σχέση με την συνολική κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται από κάθε κόμβο σε ένα δίκτυο για να παραλάβει και να επεξεργαστεί ένα πακέτο, ακόμα και αν το πακέτο καταλήγει να μην είναι καν χρήσιμο για τον κόμβο αυτό και να απορρίπτεται.
- Εσφαλμένες υποθέσεις όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του συνδέσμου. Τα LoWPAN δίκτυα μπορεί να αποτελούνται από ασύρματες συνδέσεις με απροσδιόριστα χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας. Αυτό συμβαίνει, λόγω του ότι οι περισσότεροι κόμβοι που τα αποτελούν θέλουν να είναι σε κατάσταση ύπνου για μείωση της κατανάλωσης και είναι πιθανόν να αλλάζουν θέση ή ακόμη και να βγουν εκτός του περιβάλλοντός τους, με αποτέλεσμα την ύπαρξη απώλειας συνδέσεων όπου οι κόμβοι να μην είναι προσβάσιμοι. Από την άλλη το IPv6 Neighbor Discovery πρωτόκολλο υποθέτει ότι όλοι οι κόμβοι ενός δικτύου ακούνε πάντα και ως εκ τούτου είναι πάντα προσβάσιμοι.
- Το 6LoWPAN δίκτυο χρειάζεται υποστήριξη για συγκεκριμένες λειτουργίες. Αυτές οι λειτουργίες αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και την εξοικονόμηση ενέργειας. Συνεπώς, φαίνεται αναγκαία η επέκταση του IPv6 Neighbor Discovery πρωτοκόλλου, για την ικανοποίηση των πιο πάνω αναγκών.

Συμπερασματικά, το IPv6 Neighbor Discovery πρωτόκολλο δεν πληροί τις απαιτήσεις των 6LoWPAN δικτύων, αφού κάποιες από τις λειτουργίες του είναι ακατάλληλες ή αναποτελεσματικές, ενώ κάποια άλλες δεν λειτουργούν καν. Για τους λόγους αυτούς, η ερευνητική ομάδα της IETF που είναι υπεύθυνη για τα 6LoWPAN δίκτυα καθόρισε μια σειρά από αλλαγές και βελτιώσεις, προκειμένου να προσαρμοστεί το 6LoWPAN Neighbor Discovery πρωτόκολλο.

Τέλος, για μεγάλο χρονικό διάστημα κυριαρχούσε η αντίληψη ότι οι κόμβοι αισθητήρων είναι στατικοί και δεν μετακινούνται. Ωστόσο, πολλές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα περιπτώσεις διάσωσης ή περιπτώσεις αντιμετώπισης καταστροφών, έχουν επιτρέψει την κινητικότητα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η κίνηση των κόμβων, όμως, προκαλεί προβλήματα, αφού παρουσιάζονται πολλές αστοχίες σύνδεσης μεταξύ των κόμβων.

1.2 Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η αξιολόγηση αλγορίθμων διαχείρισης κινητικότητας σε 6LoWPAN δίκτυα αισθητήρων. Για την αξιολόγηση των Neighbor Discovery και RPL αλγορίθμων, χρειάστηκε μελέτη και ανάλογη προσαρμογή των ήδη υπάρχων 6LoWPAN λειτουργιών και άλλων μηχανισμών που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα Contiki OS. Πιο αναλυτικά, βασικός σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η προσαρμογή, αρχικά ενός σεναρίου με στατικούς κόμβους (σενάριο πελάτη – εξυπηρετητή) ούτως ώστε να συνδεθούν μέσω του 6LoWPAN Neighbor Discovery πρωτοκόλλου και να είναι δυνατή η ανταλλαγή πακέτων. Επίσης, για την επίτευξη κίνησης κατά την προσομοίωση χρειάζεται να προσαρμοστεί συγκεκριμένος κώδικας στις εφαρμογές του συστήματος. Στη συνέχεια, με βάση αυτό το σενάριο, θα δημιουργηθούν σενάρια με κινητούς κόμβους. Αξίζει να σημειωθεί, ότι πολλές λειτουργίες των IPv6 και 6LoWPAN πρωτοκόλλων είναι ακόμα σε ερευνητικά στάδια και για αυτό το λόγο παρουσιάστηκαν πολλές δυσκολίες κατά την διεκπεραίωση του επιθυμητού αποτελέσματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δουλειά αυτή, άρχισε να κτίζεται πάνω σε υπάρχων κώδικα του συστήματος Contiki OS, όπου ο πελάτης και ο εξυπηρετητής ανταλλάζουν μηνύματα μόνο μέσω της τοπικής

διεύθυνσής τους. Επίσης, για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από τα σενάρια που δόθηκαν για πειραματισμό, έγινε προσπάθεια προσαρμογής της εφαρμογής CollectView. Δεν έγινε επιτυχής η προσαρμογή της εφαρμογής αυτής και για αυτό το λόγο πάρθηκαν μετρήσεις μέσω εκτύπωσης μηνυμάτων.

Ως επιμέρους σκοπό της υπάρχουσας ερευνητικής εργασίας, αποτελεί η μελέτη και κατανόηση βασικών πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών όσον αφορά IPv6, Neighbor Discovery, 6LoWPAN, RPL και τη κινητικότητα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επίσης, για την προσομοίωση των σεναρίων χρειάζεται η κατανόηση του περιβάλλοντος προσομοίωσης COOJA που παρέχεται από το λειτουργικό σύστημα Contiki.

1.3 Δομή

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά σε προηγούμενες ερευνητικές εργασίες σε παρόμοια θέματα, καθώς και το τι υπάρχει ήδη υλοποιημένο στο Contiki OS.

Στο Κεφάλαιο 3 και 4 γίνεται αναφορά στα διάφορα πρωτόκολλα του δικτύου. Αναλύονται εκτενέστερα οι δυνατότητες της έκτης έκδοσης του IPv6 πρωτοκόλλου και των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, δίνοντας έμφαση στο 6LoWPAN πρωτόκολλο και τις δυνατότητές του.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στις τροποποιήσεις και υλοποιήσεις που έγιναν για την εκπόνηση της εργασίας. Αναφέρονται, επίσης, οι διάφορες δυσκολίες που παρουσιάστηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφονται τα τρία παραδείγματα προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν αναλύοντας τα εκτενέστερα, βγάζοντας κάποια γενικά συμπεράσματα.

Στο Κεφάλαιο 7 αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα, ενώ στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η μελλοντική εργασία που μπορεί να ακολουθήσει.

Κεφάλαιο 2

Προηγούμενη Σχετική Εργασία

2.1 Προηγούμενες Ερευνητικές Εργασίες	5
2.2 Υπάρχον Υλοποίηση στο Contiki OS	6

2.1 Προηγούμενες Ερευνητικές Εργασίες

Σε προηγούμενες ερευνητικές εργασίες [9] εμφανίζεται η έννοια των Neighbor Discovery διακομιστών μεσολάβησης. Αυτές οι ερευνητικές εργασίες βασίστηκαν σε δύο έγγραφα. Το ένα έγγραφο [3] περιγράφει τις απαραίτητες ενέργειες μεσολάβησης για τις περιπτώσεις διαφορετικού τύπου μέσα απαιτούν Network Layer υποστήριξη. Το άλλο έγγραφο [13] περιγράφει ένα σενάριο το οποίο αποτελείται από πολλά 6LoWPAN δίκτυα συνδεδεμένα με μια σύνδεση διέλευσης (Ethernet) μέσω ενός δρομολογητή ραχοκοκαλιάς. Ο δρομολογητής αυτός εκτελεί χρέη Neighbor Discovery διακομιστή μεσολάβησης μεταξύ των 6LoWPAN δικτύων και τη Ethernet σύνδεση διέλευσης.

Υπάρχει προσπάθεια υλοποίησης [10] του 6LoWPAN πρωτοκόλλου για το λειτουργικό σύστημα TinyOS για τη σύνδεση ασύρματων δικτύων αισθητήρων με το Διαδίκτυο. Η υλοποίηση αυτή περιλαμβάνει υποστήριξη του ICMP μηχανισμού και του UDP πρωτοκόλλου. Όλες οι 6LoWPAN προαιρετικές κεφαλίδες επεξεργάστηκαν, ενώ υλοποιήθηκαν ο κατακερματισμός και η επανασύνδεση τμημάτων. Ωστόσο, σημαντικό είναι ότι το Neighbor Discovery πρωτόκολλο δεν υλοποιήθηκε. Αντί αυτού χρησιμοποιούνται Link Layer διευθύνσεις εκπομπής. Η εφαρμογή που περιγράφηκε πιο πάνω, λειτουργεί για TelosB και MicaZ πλατφόρμες υλικού.

Ακόμη μια ερευνητική εργασία [11] που μελετήθηκε είχε σκοπό τη μεταφορά της υπάρχουσας 6LoWPAN στοίβας από την SAND πλατφόρμα στην MSP430 πλατφόρμα. Ο λόγος που έγινε αυτή η προσπάθεια είναι η ενίσχυση των δυνατοτήτων της στοίβας με παροχή στήριξης για άλλες λειτουργίες που δεν πρόσφερε η υπάρχουσα εφαρμογή. Ως επιμέρους σκοπό είχε την διερεύνηση και υλοποίηση του 6LoWPAN Neighbor Discovery πρωτοκόλλου. Εκτός αυτών, πραγματοποιήθηκε και επίδειξη ενός 6LoWPAN δικτύου με κόμβους αισθητήρων αναγνώρισης φωτισμού χρησιμοποιώντας ένα αυτοτροφοδοτούμενο διακόπτη. Το Neighbor Discovery πρωτόκολλο σε αυτή την ερευνητική εργασία υλοποιήθηκε ως μέρος των ICMPv6 μηνυμάτων. Η υλοποίηση που συμπεριλαμβάνει είναι για απλά LoWPAN δίκτυα και τα Neighbor Solicitation και Neighbor Advertisement πακέτα δεν συμπεριλαμβάνονται. Στην ουσία αυτή η υλοποίηση χρησιμοποιεί ανακάλυψη δρομολογητή και ανάθεση προθέματος δικτύου.

2.2 Υπάρχουσα Υλοποίηση στο Contiki OS

Με βάση αξιολογήσεις [8] που έγιναν πάνω σε διάφορες εφαρμογές (συμπεριλαμβανομένου του λειτουργικού συστήματος Contiki) που υλοποιήθηκε το 6LoWPAN πρωτόκολλο δείχνουν ότι το Neighbor Discovery πρωτόκολλο λειτουργεί άψογα, όταν αγνοηθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Το Neighbor Discovery πρωτόκολλο είναι ένα από τα πιο ενεργοβόρα πρωτόκολλα για τους 6LoWPAN κόμβους. Για το λόγο αυτό, υπάρχει προσχέδιο προτύπου Διαδικτύου (Internet Draft) που επιτρέπει στους 6LoWPAN δρομολογητές να τηρούν κατάλογο κόμβων και να ορίζουν τον τρόπο που στέλλουν αυτοί οι κόμβοι σε κάποιο μεμονωμένο κόμβο και ταυτόχρονα να ενημερώνεται και ο κατάλόγός τους για τον κόμβο αυτό.

Η υλοποίησης του IPv6 πρωτοκόλλου που παρέχεται από το λειτουργικό σύστημα Contiki υποστηρίζει μόνο το IPv6 Neighbor Discovery πρωτόκολλο. Πιο συγκεκριμένα, δεν περιλαμβάνει τις βελτιστοποιήσεις για την υποστήριξη των 6LoWPAN δικτύων.

Κεφάλαιο 3

Αρχιτεκτονική και Πρωτόκολλα Δικτύου

3.1 Internet Protocol Suite	7
3.2 Internet Protocol	8
3.2.1 Internet Protocol version 4	9
3.2.2 Internet Protocol version 6	11
3.2.2.1 IPv6 Neighbor Discovery	12
3.2.3 ICMPv6	16

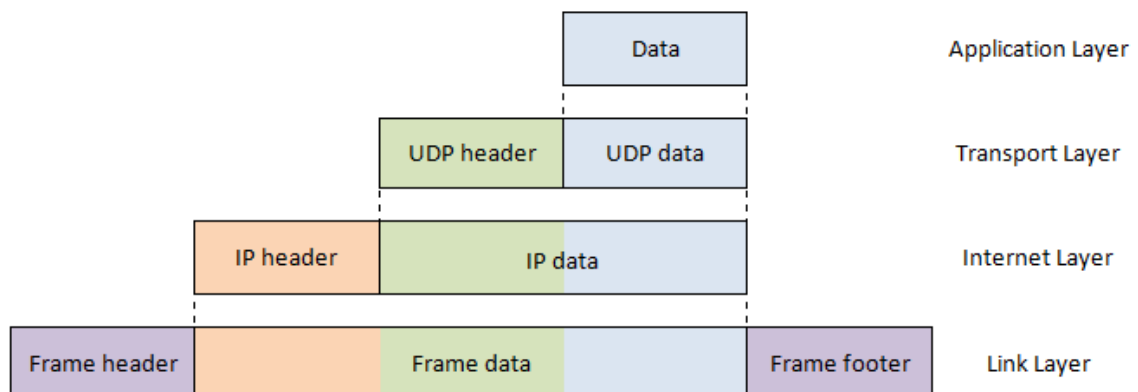
3.1 Internet Protocol Suite

Το Internet Protocol Suite [16] είναι το σύνολο των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για το Διαδίκτυο και παρόμοια δίκτυα. Είναι ευρέως γνωστό ως πρωτόκολλο TCP/IP στοίβας, για το λόγο ότι δύο από τα σημαντικότερα πρωτόκολλα που το αποτελούν είναι το Transmission Control Protocol και το Internet Protocol, τα οποία ήταν και τα πρώτα πρωτόκολλα δικτύωσης που ορίστηκαν. Σε αυτή τη στοίβα, υπάρχει ροή πληροφοριών και προς τις δύο κατευθύνσεις, αλλά με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε κάθε στρώμα να έχει δυνατότητα επικοινωνίας μόνο με το στρώμα ακριβώς από πάνω ή από κάτω του. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, γίνεται ενθυλάκωση δεδομένων όταν οι πληροφορίες κινούνται προς το πιο κάτω στρώμα και γίνεται από-ενθυλάκωση όταν κινούνται προς τα πάνω.

Το Internet Protocol Suite αποτελείται από τέσσερα στρώματα, όπου το κάθε στρώμα έχει το δικό του πρωτόκολλο. Ωστόσο, συχνά όταν γίνεται αναφορά στη TCP/IP στοίβα

περιλαμβάνεται και το Physical Layer ως το στρώμα υλικού του Link Layer. Τα στρώματα είναι ως εξής:

- *Link Layer*: Κοινώς γνωστό ως Ethernet. Περιλαμβάνει τις τεχνολογίες επικοινωνιών για ένα τοπικό δίκτυο.
- *Internet Layer*: Γνωστό ως Network Layer. Ενώνει τα τοπικά δίκτυα, δημιουργώντας έτσι το Διαδίκτυο.
- *Transport Layer*: Παρέχει χρήσιμες υπηρεσίες, όπως connection-oriented data-stream υποστήριξη, αξιόπιστη end-to-end επικοινωνία, έλεγχο ροής, έλεγχο συμφόρησης και host-level πολυπλεξία.
- *Application Layer*: Παρέχει όλα τα πρωτόκολλα (όπως για παράδειγμα HTTP, FTP) για συγκεκριμένες υπηρεσίες επικοινωνιών δεδομένων στο process-to-process επίπεδο. Όπως για παράδειγμα, τον τρόπο που ένας πλοηγητής επικοινωνεί με ένα εξυπηρετητή για να ζητήσει μια ιστοσελίδα.



Σχήμα 3.1: Η ενθυλάκωση από το Application Layer μέχρι το Link Layer.

3.2 Internet Protocol

Το Internet Protocol είναι το κυρίως πρωτόκολλο του Internet Layer. Πρόκειται για ένα best-effort, connectionless, αναξιόπιστο πρωτόκολλο διαδίκτυωσης που παρέχει τις απαραίτητες λειτουργίες για μεταφορά πακέτου από κάποιο αποστολέα σε ένα προορισμό μέσα σε ένα σύστημα αυθαίρετου αριθμού δικτύων. Εάν χρειάζεται, παρέχει μηχανισμούς κατακερματισμού και επανασυναρμολόγησης πακέτων. Είναι υπεύθυνο

για τη δρομολόγηση πακέτων ακόμη και εκτός ορίων ενός τοπικού δικτύου, για αυτό και θεωρείται το κύριο πρωτόκολλο που καθορίζει το Διαδίκτυο.

Το Internet Protocol ορίστηκε πρώτη φορά από τους Vint Cerf και Robert Kahn το 1974. Αργότερα, το πρωτόκολλο αυτό αναθεωρήθηκε και ενημερώθηκε έως και την τέταρτη έκδοσή του, που έγινε το πρώτο ευρέως διαδεδομένο Internet Protocol (IPv4). Ο διάδοχός του είναι η έκτη έκδοση του Internet Protocol (IPv6), που πλέον αυξάνεται πάρα πολύ η χρήση του.

3.2.1 Internet Protocol version 4

Η τέταρτη έκδοση του Internet Protocol χρησιμοποιεί 32-bit διευθύνσεις, χαρακτηριστικό το οποίο μας περιορίζει στο συνολικό αριθμό των 2^{32} διαφορετικών IPv4 διευθύνσεων. Το IPv4 είναι ακόμη μακράν το πιο ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο του Internet Layer.

Το IPv4 είναι ένα connectionless πρωτόκολλο για χρήση σε packet-switched Link Layer δίκτυα. Αναπτύσσει το καλύτερο δυνατό μοντέλο μεταφοράς ενός πακέτου, χωρίς να εγγυάται την παράδοσή του, ούτε να διασφαλίζει την σωστή αλληλουχία του ή την αποφυγή της επαναποστολής του. Η IPv4 κεφαλίδα έχει μεταβλητό μήκος λόγω του πεδίου “Options”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 και περιγράφεται πιο κάτω.

Το μέγεθος διευθύνσεων που χρησιμοποιεί το IPv4, το μεταβλητό μήκος της κεφαλίδας του, σε συνδυασμό με την ανάγκη για την δυνατότητα επισήμανσης ροών (flow labeling) αποτελούν τις κυριότερες αδυναμίες του πρωτοκόλλου, οι οποίες οδήγησαν στον ορισμό του IPv6.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Version				IHL				Type of Service				ECN				Total Length															
Identification																Flags				Fragment Offset											
Time to Live								Protocol								Header Checksum															
Source Address																															
Destination Address																															
Options																								Padding							

Σχήμα 3.2: Η IPv4 κεφαλίδα. Τα πεδία Options και Padding είναι προαιρετικά.

Τα πεδία της IPv4 κεφαλίδας πιο αναλυτικά:

- *Version*: Η έκδοση του πρωτοκόλλου. Έχει την τιμή τέσσερα, αφού είναι IPv4.
- *IHL (Internet Header Length)*: Το μέγεθος της κεφαλίδας σε πολλαπλάσια των τεσσάρων bytes. Είναι χρήσιμο από τη στιγμή που η κεφαλίδα παρέχει μεταβλητό αριθμό επιλογών.
- *Type of Service*: Παρέχει μια ένδειξη των παραμέτρων της επιθυμητής ποιότητας των υπηρεσιών που παρέχονται.
- *ECN (Explicit Congestion Notification)*: Παλαιότερα συμπεριλαμβανόταν στο πεδίο ToS.
- *Total Length*: Το συνολικό μήκος του πακέτου, συμπεριλαμβανομένης της κεφαλίδας. Αυτό το πεδίο απαιτείται για τον υπολογισμό του μήκους του ωφέλιμου φορτίου και επιβάλλει μέγιστο συνολικό μήκος πακέτου ίσο με $2^{16} - 1 = 65,535$ bytes.
- *Identification*: Αριθμητική ταυτότητα που χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει μοναδικά ένα σύνολο από τμήματα τα οποία ανήκουν στο ίδιο πακέτο.
- *Flags*: Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του κατακερματισμού, δείχνοντας αν ένα τμήμα είναι ή όχι το τελευταίο κομμάτι του πακέτου, ή εάν ο κατακερματισμός επιτρέπεται ή όχι σε αυτό το πακέτο.
- *Fragment Offset*: Καθορίζει το offset του τμήματος σε σχέση με την αρχή του αρχικού πακέτου. Αυτό το πεδίο είναι υποχρεωτικό για την επανασυναρμολόγηση των πακέτων.
- *Time to Live*: Ορίζει τη μέγιστη διάρκεια ζωής ενός πακέτου, για την αποφυγή της συνεχής ύπαρξης των πακέτων μέσα σε ένα δίκτυο λόγω, για παράδειγμα, βρόχους δρομολόγησης.
- *Protocol*: Καθορίζει το πρωτόκολλο του πακέτου που ενθυλακώνεται από την IP κεφαλίδα.
- *Header Checksum*: 16-bit πεδίο, το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο σφαλμάτων στη κεφαλίδα.
- *Source Address*: 32-bit IP διεύθυνση του αποστολέα του πακέτου.
- *Destination Address*: 32-bit IP διεύθυνση του προορισμού του πακέτου.

- *Options*: Μπορεί να περιέχει μια λίστα διαφορετικών επιλογών, αλλά πρέπει πάντα να τελειώνει με την επιλογή “End of Options”. Αυτό το πεδίο είναι προαιρετικό.
- *Padding*: Ο αριθμός των επιλογών, καθώς και το μέγεθος της κάθε επιλογής, είναι μεταβλητά. Δεδομένου ότι το πεδίο που υποδηλώνει το μήκος της κεφαλίδας είναι εκφρασμένο σε πολλαπλάσια του 32-bit, αυτό το πεδίο χρησιμεύει στην εξασφάλιση ότι η κεφαλίδα περιέχει αναπόσπαστο αριθμό από 32-bit λέξεις.

3.2.2 Internet Protocol version 6

Η έκτη έκδοση του Internet Protocol ορίστηκε το 1988 με σκοπό να ξεπεραστούν μια σειρά από ελλείψεις της τέταρτης έκδοσης. Οι κύριες αλλαγές μεταξύ των δύο πρωτοκόλλων είναι η αύξηση του χώρου διεύθυνσης από 32 bits σε 128 bits (επιτρέποντας μέχρι και 2^{128} διαφορετικές IPv6 διευθύνσεις), η πολύ πιο απλοποιημένης μορφής κεφαλίδα σταθερού μήκους, η βελτιωμένη υποστήριξη για extension κεφαλίδες και επιλογές (επιτρέπει μια περισσότερο αποτελεσματική προώθηση του πακέτου και μεγαλύτερη ευελιξία για την εισαγωγή νέων επιλογών), η δυνατότητα της επισήμανσης ροών (με την οποία ο αποστολέας έχει το δικαίωμα να ζητήσει ειδικό χειρισμό από τους δρομολογητές), η δυνατότητα πιστοποίησης και η δυνατότητα προστασίας ιδιωτικών δεδομένων. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η μορφοποίηση της IPv6 κεφαλίδας.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31																								
Version				Traffic Class								Flow Label																																											
Payload Length																Next Header								Hop Limit																															
Source Address																																																							
Destination Address																																																							

Σχήμα 3.3: Η IPv6 κεφαλίδα.

Τα πεδία της IPv6 κεφαλίδας πιο αναλυτικά:

- *Version*: Η έκδοση του πρωτοκόλλου. Έχει την τιμή έξι, αφού είναι IPv6.
- *Traffic Class*: Προσδιορίζει διάφορες προτεραιότητες.

- *Flow Label*: Χρησιμοποιείται από τον αποστολέα για να επισημάνει ακολουθίες από πακέτα που απαιτεί να έχουν ειδική μεταχείριση από τους δρομολογητές, όπως για μια πραγματικού χρόνου υπηρεσία. Το πεδίο αυτό αντικαθιστά το “Type of Service” της IPv4 κεφαλίδας.
- *Payload Length*: Το μήκος του ωφέλιμου φορτίου του IPv6 πακέτου, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το μήκος της κεφαλίδας (σταθερό μήκος των 40-bytes). Σημειώνεται ότι, αν υπάρχουν extension κεφαλίδες, θεωρούνται μέρος του ωφέλιμου φορτίου.
- *Next Header*: Προσδιορίζει τον τύπο της κεφαλίδας που ακολουθεί μετά την IPv6 κεφαλίδα. Η επόμενη κεφαλίδα μπορεί να είναι, είτε κάποιου πρωτοκόλλου ανώτερου στρώματος, είτε μια IPv6 extension κεφαλίδα.
- *Hop Limit*: Προσδιορίζει την ζωή των πακέτων. Χρησιμοποιείται για να αποτρέπει την επ’ αόριστον ύπαρξη των πακέτων σε ένα δίκτυο. Ορίζεται ως ο αριθμός των κόμβων που μπορεί να διαβιβαστεί ένα πακέτο.
- *Source Address*: 128-bit IP διεύθυνση του αποστολέα του πακέτου.
- *Destination Address*: 128-bit IP διεύθυνση του προορισμού του πακέτου.

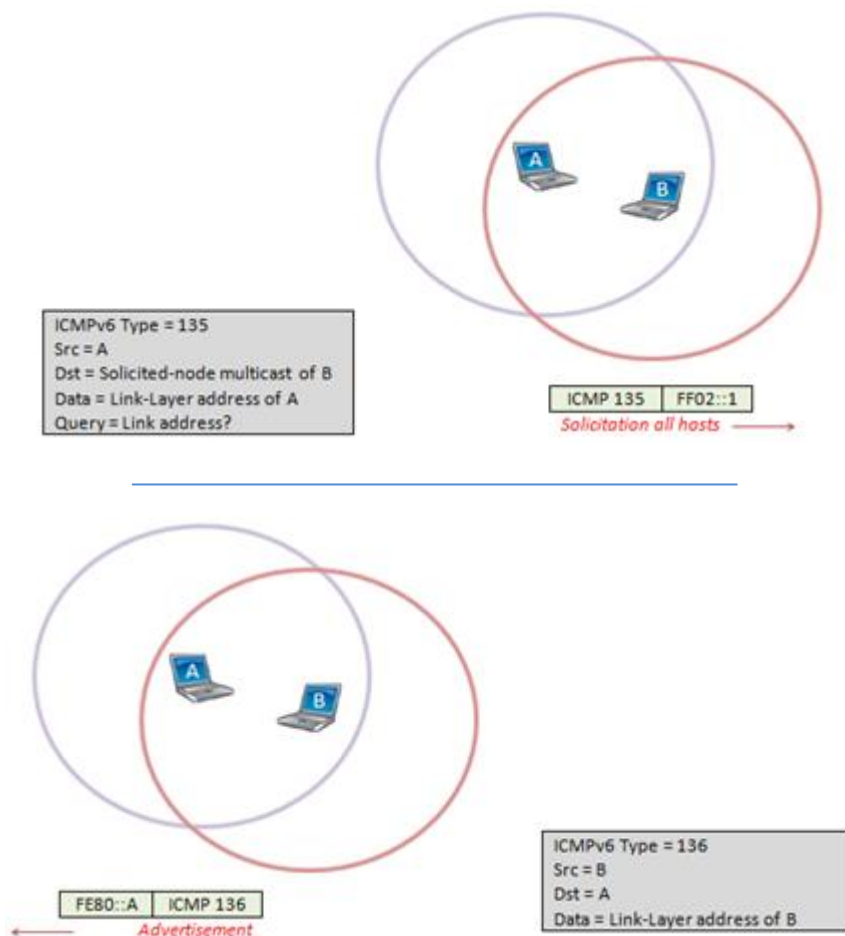
3.2.2.1 IPv6 Neighbor Discovery

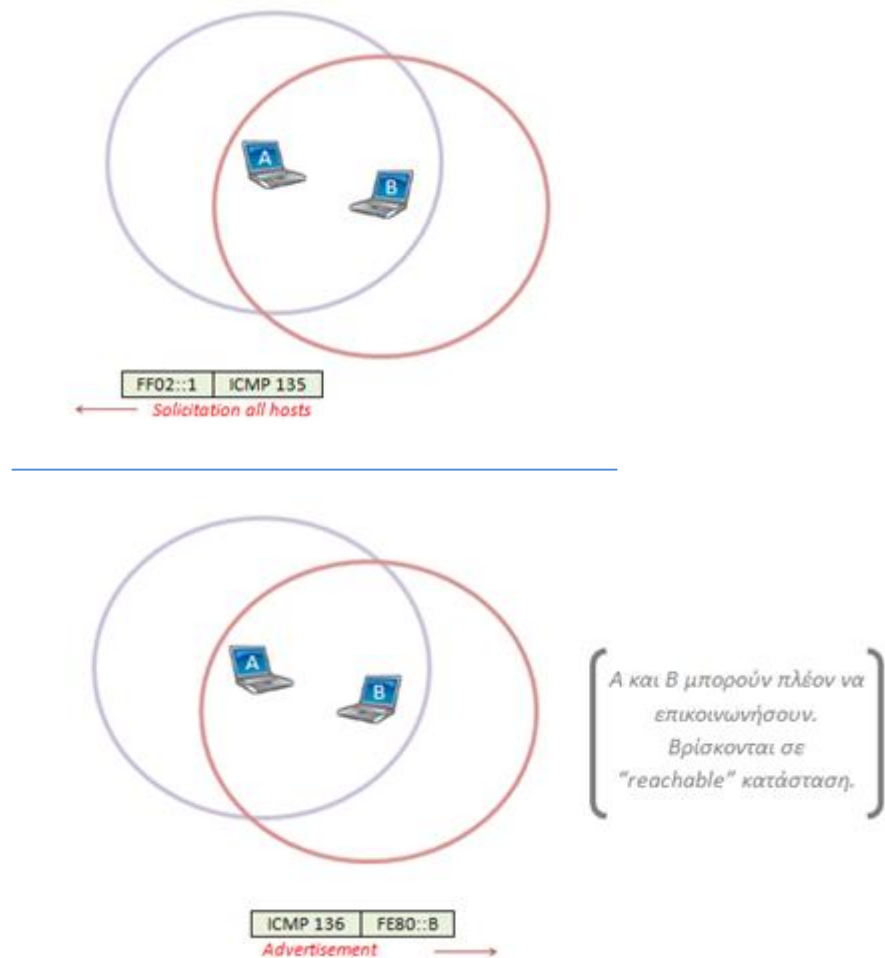
Μια νέα προσθήκη στην ενημέρωση του IP πρωτοκόλλου αποτελεί το Neighbor Discovery [12] πρωτόκολλο. Το πρωτόκολλο αυτό, αποτελεί τον πυρήνα λειτουργίας του IPv6 πρωτοκόλλου και χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση διευθύνσεων, αυτόματη ρύθμιση παραμέτρων διεύθυνσης, ανακάλυψη δρομολογητών και γειτονικής προσβασιμότητας. Αυτές οι δυνατότητες, προσέλκυσαν περισσότερο τους ερευνητές στην εφαρμογή του IPv6 πρωτοκόλλου στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Πιο κάτω περιγράφονται οι δύο βασικοί αλγόριθμοι λειτουργίας του πρωτοκόλλου αυτού, καθώς και τη σημασιολογία των πακέτων που αναφέρονται στη περιγραφή.

Ο πρώτος και βασικότερος αλγόριθμος που προσφέρει το πρωτόκολλο αυτό είναι η ανακάλυψη νέων κόμβων στο δίκτυο και η διασύνδεση τους με το δίκτυο αυτό. Κάθε δρομολογητής του δικτύου στέλλει περιοδικά multicast Router Advertisement μηνύματα για να διαφημίσει την ύπαρξή του, και κατ’ επέκταση την ύπαρξη του

δικτύου. Κάθε κόμβος που λαμβάνει αυτά τα μηνύματα, δημιουργεί ή ενημερώνει τη λίστα με τους προεπιλεγμένους δρομολογητές του δικτύου και δημιουργεί (αν δεν έχει ήδη) τη δική του παγκόσμια διεύθυνση.

Ένας κόμβος, για την ανακάλυψη τυχόν νέων γειτονικών κόμβων, στέλλει multicast Neighbor Solicitation μήνυμα και ζητά από όσους παραλάβουν το μήνυμα να του απαντήσουν διαφημίζοντας τη τοπική διεύθυνσή τους. Οι κόμβοι που θα παραλάβουν το μήνυμα του νεοεισερχόμενου κόμβου, απαντούν με Neighbor Advertisement μήνυμα. Ο ίδιος κόμβος, απαντά στα ανάλογα μηνύματα των γειτονικών κόμβων, ενημερώνοντάς τους για την τοπική διεύθυνσή του. Ενημερώνοντας τη λίστα γειτονικών κόμβων με τις διευθύνσεις των νέων γειτονικών κόμβων, είναι πλέον εφικτή η επικοινωνία μεταξύ τους. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται σχηματικά ένα παράδειγμα ανακάλυψης γειτονικού κόμβου. Σημειώνεται ότι, τα ICMP μηνύματα που αναφέρονται στο παράδειγμα αναλύονται στο Υποκεφάλαιο 3.2.3 και οι κωδικοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7.





Σχήμα 3.4: Η ανταλλαγή Neighbor Discovery μηνυμάτων για ανίχνευση γειτονικού κόμβου.

Ένας νεοεισερχόμενος στο δίκτυο κόμβος, στέλλει Router Solicitation μήνυμα και λαμβάνει το πρόθεμα του δικτύου, μέσω του Router Advertisement μηνύματος από γειτονικό δρομολογητή. Προσπαθώντας να δημιουργήσει τη δική του διεύθυνση, (Σχήμα 3.5) στέλλει Neighbor Solicitation μήνυμα με την επιθυμητή διεύθυνση. Αν παραλάβει κάποιο Neighbor Advertisement μήνυμα, τότε η συγκεκριμένη διεύθυνση δεν είναι διαθέσιμη. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται και από τους δρομολογητές για την αποφυγή εμφάνισης δύο κόμβων εντός του δικτύου με την ίδια διεύθυνση (Duplicate Address Detection).



Σχήμα 3.5: Έλεγχος ύπαρξης επιθυμητής διεύθυνσης.

Τα πέντε βασικότερα μηνύματα που χρησιμοποιούνται από το Neighbor Discovery πρωτόκολλο είναι:

- *Router Solicitation*: Οι κόμβοι όταν ενεργοποιηθούν, ή όταν εισέλθουν σε ένα νέο δίκτυο, στέλνουν αυτά τα μηνύματα για να ζητήσουν Router Advertisement μήνυμα από κάποιο τοπικό δρομολογητή και να μην περιμένουν μέχρι την επόμενη κανονική ενημέρωση.
- *Router Advertisement*: Οι δρομολογητές στέλνουν είτε περιοδικά, είτε σαν απάντηση σε Router Solicitation μήνυμα, αυτά τα μηνύματα για να ενημερώνουν ότι υπάρχουν και παρέχουν το πρόθεμα του δικτύου μαζί με άλλες σχετικές παραμέτρους.
- *Neighbor Solicitation*: Οι κόμβοι στέλνουν αυτά τα μηνύματα, για να ανακαλύψουν άλλους κόμβους ή να επαληθεύσουν την ύπαρξη άλλων κόμβων (μέσω της τοπικής τους διεύθυνσης) ζητώντας να μεταδώσουν Neighbor Advertisement μήνυμα. Επίσης, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο διπλά εμφανιζόμενης διεύθυνσης.
- *Neighbor Advertisement*: Οι κόμβοι στέλνουν αυτά τα μηνύματα είτε σαν απάντηση σε Neighbor Solicitation μήνυμα, δηλώνοντας την ύπαρξή τους και παρέχοντας δικές τους πληροφορίες, είτε όταν θέλουν να ανακοινώσουν αλλαγή στη τοπική διεύθυνσή τους.

- *Redirect*: Οι δρομολογητές στέλνουν αυτά τα μηνύματα, για να ενημερώσουν ένα κόμβο ότι υπάρχει μια καλύτερη μέθοδος (first hop) για τη δρομολόγηση των πακέτων σε ένα συγκεκριμένο προορισμό.

3.2.3 ICMPv6

Το ICMPv6 (Internet Control Message Protocol) πρωτόκολλο αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της IPv6 αρχιτεκτονικής. Τα ICMPv6 μηνύματα μεταφέρονται μέσω IPv6 πακέτων που μπορούν να περιλάβουν και extended κεφαλίδες. Το ICMPv6 πρωτόκολλο προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση, προσφέροντας όλες τις διαφορετικές λειτουργίες των ICMP, ARP (Address Resolution Protocol) και IGMP (Internet Group Membership Protocol) πρωτοκόλλων, απλοποιώντας, μάλιστα, την διαδικασία επικοινωνίας μέσω της εξάλειψης παλιών μηνυμάτων.

Το ICMPv6 πρωτόκολλο χρησιμοποιείται για πολλαπλές λειτουργίες, όπως για αναφορά σφαλμάτων σε επεξεργασία πακέτων, για αναφορά IPv6 multicast membership και, το σημαντικότερο για αυτή τη πτυχιακή μελέτη, για τις Neighbor Discovery λειτουργίες. Τα ICMPv6 μηνύματα χρησιμοποιούνται, επίσης, από το PING (Packet Internet Gopher) πρωτόκολλο για τον έλεγχο επικοινωνίας. Για τις πιο πάνω λειτουργίες, τα ICMPv6 μηνύματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Μηνύματα Λάθους: Τα ICMPv6 μηνύματα λάθους χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: αδυναμία πρόσβασης σε κάποιο προορισμό (Destination Unreachable), χρονικό όριο (Time Exceeded), πακέτο μεγάλου μεγέθους (Packet Too Big) και πρόβλημα παραμέτρων (Parameter Problem).
2. Μηνύματα Πληροφοριών: Τα ICMPv6 μηνύματα πληροφοριών χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: μηνύματα διάγνωσης, Neighbor Discovery μηνύματα και μηνύματα διαχείρισης των multicast ομάδων.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Type								Code								Checksum															
Data																															

Σχήμα 3.6: Το ICMPv6 πακέτο.

Τα πεδία του ICMPv6 πακέτου πιο αναλυτικά:

- *Type*: Δηλώνει το είδος του μηνύματος. Τιμές από 0-127 υποδεικνύει μήνυμα λάθους, ενώ από 128-255 υποδεικνύει μήνυμα ενημέρωσης.
- *Code*: Εξαρτάται από τον τύπο του μηνύματος.
- *Checksum*: Βοηθά στην ανίχνευση σφαλμάτων στο ICMP μήνυμα.

Όταν ένα ICMPv6 μήνυμα συμπεριλαμβάνεται σε ένα IPv6 πακέτο, δεικνύετε με την τιμή 58 στο πεδίο Next Header της IPv6 κεφαλίδας. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η λίστα με τους κωδικούς για κάθε τύπο ICMPv6 μηνυμάτων.

Type	Meaning
001	Destination Unreachable
002	Packet Too Big
003	Time Exceeded
004	Parameter Problem
128	Echo Request
129	Echo Reply
130	Group Membership Query
131	Group Membership Report
132	Group Membership Reduction
133	<u>Router Solicitation</u>
134	<u>Router Advertisement</u>
135	<u>Neighbor Solicitation</u>
136	<u>Neighbor Advertisement</u>
137	<u>Redirect</u>

Σχήμα 3.7: Οι κωδικοί για τα ICMPv6 μηνύματα.

Κεφάλαιο 4

Αρχιτεκτονική και Πρωτόκολλα Ασύρματου Δικτύου

4.1 IEEE 802.11	18
4.2 IEEE 802.15.4	19
4.3 Τεχνολογία ZigBee	22
4.4 Αρχιτεκτονική Ασύρματου Αισθητήρα	24
4.5 Ασύρματα Δίκτυα Ad hoc	25
4.6 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	28
4.6.1 6LoWPAN Δίκτυα	30
4.6.1.1 6LoWPAN Neighbor Discovery	33
4.6.1.2 Πρωτόκολλο Δρομολόγησης RPL	34

4.1 IEEE 802.11

Τα ασύρματα δίκτυα που βασίζονται στο IEEE 802.11 πρωτόκολλο ολοένα και αναπτύσσονται για να δεχθούν ένα μεγάλο όγκο της κίνησης του Διαδικτύου. Τα IEEE 802.11 ασύρματα δίκτυα παρέχουν συνδεσιμότητα σε σπίτια και γραφεία, σε αγροτικές και αστικές περιοχές, μέσω αυτορυθμιζόμενων ασύρματων συνδέσεων τύπου ad hoc δικτύου. Η χωρητικότητα των IEEE 802.11 δικτύων είναι σοβαρά υποβαθμισμένη, λόγω της αύξησης του αριθμού των ροών και της πυκνότητας των κόμβων. Μια αποτελεσματική λύση στο πιο πάνω πρόβλημα είναι η χρήση πολλαπλών καναλιών. Επιτρέποντας την πολλαπλή ταυτόχρονη μετάδοση, η ικανότητα των δικτύων αυτών βελτιώνεται αισθητά.

Σε ένα πολυκάναλο IEEE 802.11 δίκτυο, οι κόμβοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν πολλαπλές διεπαφές του πρωτοκόλλου. Το IEEE 802.11 πρωτόκολλο παρέχει ένα περιορισμένο αριθμό μη καλυπτόμενων καναλιών. Για παράδειγμα, το IEEE 802.11a πρωτόκολλο υποστηρίζει δώδεκα μη καλυπτόμενα κανάλια, ενώ το IEEE 802.11b πρωτόκολλο τρία μη καλυπτόμενα κανάλια. Επιπλέον, οι κόμβοι που είναι εξοπλισμένοι με το πρωτόκολλο αυτό πρέπει να υπακούν στον περιορισμό της διεπαφής, που απαγορεύει ο αριθμός των καναλιών που καταλογίστηκαν σε ένα κόμβο να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των διεπαφών στον κόμβο αυτό. Με αυτό τον τρόπο, περιορίζεται ο αριθμός των ταυτόχρονων μεταδόσεων.

Εκτός από την πολυκαναλική δυνατότητα, οι IEEE 802.11 κόμβοι υποστηρίζουν πολλαπλές ταχύτητες δεδομένων, ανάλογα με την κατάσταση του καναλιού. Για παράδειγμα, το IEEE 802.11a πρωτόκολλο παρέχει 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 και 54 Mbps, ενώ το IEEE 802.11b πρωτόκολλο παρέχει 1, 2, 5.5 και 11 Mbps, οι οποίες χρησιμοποιούνται για μετάδοση πλαισίων δεδομένων. Σε ένα ασύρματο δίκτυο μπορούν να μεταδοθούν πακέτα σε ένα κανάλι με δύο διαφορετικές ταχύτητες δεδομένων. Ωστόσο, είναι ευρέως γνωστό, ότι μπορεί να υπάρξει εμφάνιση ανωμαλιών όταν γίνονται μεταδόσεις χαμηλής ταχύτητας δεδομένων και υψηλής ταχύτητας δεδομένων ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι.

4.2 IEEE 802.15.4

Το IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο καθορίζει τα physical και media access control (MAC) στρώματα για χαμηλού ρυθμού ασύρματων δικτύων προσωπικής περιοχής (LR-WPAN). Ένα LR-WPAN δίκτυο είναι ένα απλό, χαμηλού κόστους ασύρματης επικοινωνίας δίκτυο βελτιστοποιημένο για χρήση σε εφαρμογές με περιορισμένη ισχύ και περιορισμένες απαιτήσεις απόδοσης. Τα LR-WPAN δίκτυα σκοπεύουν την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το χαμηλό κόστος, διατηρώντας παράλληλα αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων, μικρής εμβέλειας σύνδεση, καθώς και απλό και ευέλικτο πρωτόκολλο.

Το IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο καθορίζει δύο διαφορετικούς τύπους συσκευών: τις συσκευές πλήρους λειτουργίας (FFD) και τις συσκευές μειωμένης λειτουργίας (RFD). Οι FFD συσκευές μπορούν να συνυπάρχουν σε ένα προσωπικής περιοχής δίκτυο (PAN), είτε ως PAN συντονιστής, είτε ως συντονιστής, είτε ως απλή συσκευή. Ακόμη και στην περίπτωση ενός PAN δικτύου που αποτελείται μόνο από RFD συσκευές, συνιστάται η ύπαρξη έστω μιας FFD συσκευής που θα λειτουργεί ως PAN συντονιστής.

Ένα LR-WPAN δίκτυο μπορεί να λειτουργεί, είτε σε peer-to-peer τοπολογία, είτε σε star τοπολογία. Στην περίπτωση της peer-to-peer τοπολογίας, η επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων είναι δυνατή εφόσον βρίσκονται εντός εμβέλειας. Αυτή η τοπολογία, προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία από τη star τοπολογία, επιτρέποντας όλων των ειδών πλέγματα, αυξάνοντας, όμως, την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων. Επίσης, αυτή η μορφή τοπολογίας, χρειάζεται PAN συντονιστή. Ωστόσο, είναι πιθανή η ζήτηση ενός κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης με πολλαπλά άλματα σε περίπτωση που δύο κόμβοι δεν είναι στη σειρά. Αυτό το πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να παρέχεται από υψηλότερο στρώμα και ως εκ τούτου, είναι πέρα του πεδίου εφαρμογής του IEEE 802.15.4 πρωτοκόλλου. Στην δεύτερη περίπτωση, της star τοπολογίας, η επικοινωνία όλων των συσκευών γίνεται μέσω του κεντρικού κόμβου, ο οποίος είναι ένας PAN συντονιστής. Έτσι, ο PAN συντονιστής είναι ο καθόλα υπεύθυνος για την έναρξη, τη δρομολόγηση και τον τερματισμό κάθε επικοινωνίας στο δίκτυο.

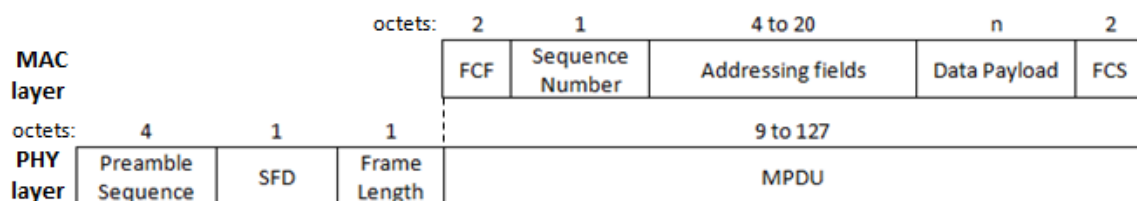
Το MAC στρώμα έχει τα παρακάτω καθήκοντα:

- Διαχείριση Beacon.
- Σύνδεση και αποσύνδεση PAN δικτύου.
- Χρήση του CSMA-CA μηχανισμού για πρόσβαση σε κάποιο κανάλι.
- Διαχείριση και διατήρηση του Guaranteed Time Slot (GTS) μηχανισμού.
- Επικύρωση πλαισίου.
- Αναγνωρισμένη παράδοση πλαισίου.
- Υποστήριξη της ασφάλειας της συσκευής.

Στις star τοπολογίες, το IEEE 802.15.4 MAC στρώμα παρέχει ένα beacon-based μηχανισμό συγχρονισμού για εκπομπή και λήψη δεδομένων μεταξύ συσκευών και τον PAN συντονιστή, ο οποίος επιτρέπει στους κόμβους μόνο να ακούνε ανά τακτά χρονικά

διαστήματα στοχεύοντας την εξοικονόμηση ενέργειας. Στη περίπτωση, όμως, της peer-to-peer τοπολογίας, το πρωτόκολλο δεν παρέχει τον πιο πάνω μηχανισμό συγχρονισμού με αποτέλεσμα, εάν απαιτείται από μια εφαρμογή, την αναγκαιότητα εφαρμογής του μηχανισμού αυτού σε ψηλότερα στρώματα.

Το MAC στρώμα [6] καθορίζει τέσσερις διαφορετικούς τύπους πλαισίων: beacon πλαίσια, πλαίσια αναγνώρισης, πλαίσια MAC εντολών και πλαίσια δεδομένων. Τα beacon πλαίσια χρησιμοποιούνται στον μηχανισμό συγχρονισμού. Τα πλαίσια αναγνώρισης (η χρήση τους είναι προαιρετική) χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση εκπομπών. Τα πλαίσια MAC εντολών εκτελούν εντολές του πρωτοκόλλου, όπως για παράδειγμα «αίτηση σύνδεσης» ή «αίτηση δεδομένων». Τέλος, τα πλαίσια δεδομένων χρησιμοποιούνται για όλες τις διαβιβάσεις δεδομένων.



Σχήμα 4.1: Το πλαίσιο δεδομένων του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4.

Τα πεδία του πλαισίου δεδομένων (Σχήμα 4.1) πιο αναλυτικά:

- *Preamble Sequence:* Χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό του τσιπ με ένα εισερχόμενο μήνυμα. Αποτελείται από τριάντα δύο δυαδικά μηδενικά.
- *SFD (Start of Frame Delimiter):* Υποδεικνύει το τέλος του πεδίου “Preamble Sequence” και την έναρξη των πακέτων δεδομένων. Έχει σταθερή τιμή ίση με 0xE5.
- *Frame Length:* Το μέγεθος δεδομένων του MAC πρωτοκόλλου (MPDU).
- *FCF (Frame Control Field):* Περιέχει πληροφορίες που καθορίζουν τον τύπο του πλαισίου, τους τρόπους διευθυνσιοδότησης και άλλες σημαίες ελέγχου.
- *Sequence Number:* Χρησιμοποιείται για ταίριασμα των πλαισίων αναγνώρισης με πλαίσια MAC εντολών ή πλαίσια δεδομένων.
- *Addressing fields:* Το IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο υποστηρίζει 16-bit και 64-bit διευθύνσεις. Επίσης, εάν το PAN αναγνωριστικό του αποστολέα και του παραλήπτη είναι το ίδιο, ένα από τα δύο μπορεί να αποφευχθεί. Ως εκ τούτου,

το πεδίο αυτό, είναι μεταβλητού μήκους, περιέχει τις διευθύνσεις του αποστολέα και του παραλήπτη, καθώς και το PAN αναγνωριστικό τους και ερμηνεύεται με βάση το πεδίο FCF.

- *Data Payload*: Τα δεδομένα που μεταδίδονται.
- *FCS (Frame Check Sequence)*: Χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της ακεραιότητας των δεδομένων.

4.3 Τεχνολογία ZigBee

Το ZigBee πρωτόκολλο ασύρματων δικτύων χαρακτηρίζεται από χαμηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και κόστους και απευθύνεται σε εφαρμογές όπου γίνεται απομακρυσμένος έλεγχος. Συνεπώς, το πρωτόκολλο αυτό προσφέρει επικοινωνία χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, χωρίς να χρησιμοποιεί υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, όπως για παράδειγμα η τεχνολογία Bluetooth. Επιπλέον, προσφέρεται η δυνατότητα υλοποίησης του πρωτοκόλλου σε μεγαλύτερα δίκτυα πλέγματος από αυτά που είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν στη τεχνολογία Bluetooth. Οι ZigBee ασύρματοι κόμβοι μεταδίδουν σε εμβέλεια από δέκα μέχρι και εβδομήντα πέντε μέτρα, εξαρτώμενη από την κατανάλωση ισχύος που χρειάζεται κάποια εφαρμογή. Επίσης, τέτοιου τύπου κόμβοι εκπέμπουν σε συχνότητες που δεν χρειάζονται άδεια λειτουργίας (στα 868 MHz στην Ευρώπη, στα 915 MHz σε Αμερική και Αυστραλία και στα 2.4 GHz παγκόσμια). Η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων που προσφέρει το ZigBee πρωτόκολλο είναι 20 Kbps στα 868 MHz, στα 40 Kbps στα 915 MHz και στα 250 Kbps στα 2.4 GHz.

Το IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο (Υποκεφάλαιο 4.2) επικεντρώνεται στην οργάνωση των physical και MAC στρωμάτων. Το ZigBee πρωτόκολλο, από την άλλη, έχει ως στόχο την παροχή ανώτερων στρωμάτων της στοίβας του πρωτοκόλλου για διαλειτουργικά δίκτυα δεδομένων, υπηρεσίες ασφαλείας και πλειάδα ασύρματων κτιριακών λύσεων.

Το ZigBee πρωτόκολλο παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου ενός πλήθους κόμβων που ενσωματώθηκαν σε συγκεκριμένα σημεία (για παράδειγμα σε συσκευές μέσα σε ένα σπίτι), μέσω ενός τηλεχειριστηρίου ή και ακόμη ενός κινητού τηλεφώνου.

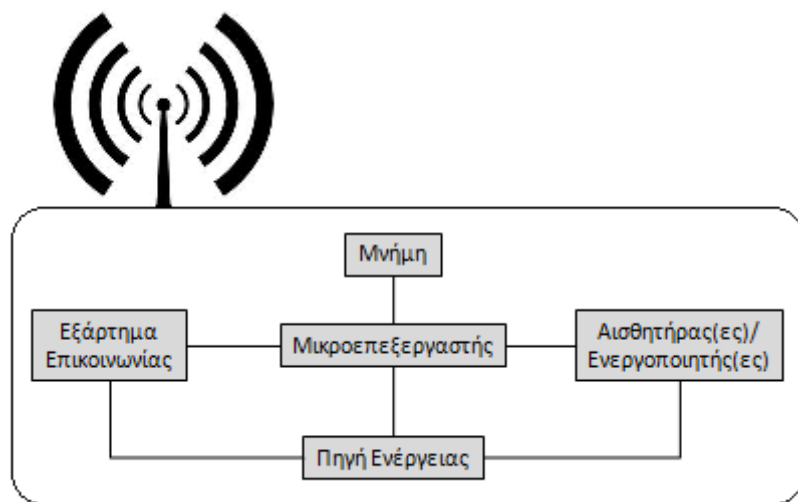
Ένα ZigBee δίκτυο χρησιμοποιεί ψηφιακούς πομπούς για την δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων κόμβων που βρίσκονται διάσπαρτες σε ένα χώρο. Ένας από τους κόμβους αυτούς, λειτουργεί ως συντονιστής, γνωρίζοντας όλους τους κόμβους του συγκεκριμένου δικτύου και διαχειρίζεται τα πακέτα που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων. Γενικά, σε ένα ZigBee δίκτυο, εκτός από τον κόμβο συντονιστή, οι υπόλοιποι κόμβοι δρουν είτε ως δρομολογητές, είτε ως αισθητήρες αλληλεπίδρασης με το φυσικό περιβάλλον.

Τα ZigBee δίκτυα έχουν δύο λειτουργίες: τη λειτουργία περιοδικής εκπομπής ενός σήματος συντονισμού και τη λειτουργία μη εκπομπής. Στη πρώτη περίπτωση, ο κόμβος συντονιστής αφυπνίζει όλους τους κόμβους του δικτύου, οι οποίοι πρέπει να τον ενημερώσουν αν υπάρχει μήνυμα για προώθηση, στέλλοντας περιοδικά μηνύματα. Στη δεύτερη περίπτωση, όταν δεν στέλλονται περιοδικά μηνύματα αφύπνισης από τον κόμβο συντονιστή, το δίκτυο είναι λιγότερο συντονισμένο, καθώς κάθε κόμβος εκπέμπει ένα σήμα το οποίο πρέπει να παραδοθεί στον συντονιστή κόμβο, μέσω των ενδιάμεσων κόμβων στο δίκτυο. Έτσι, ο συντονιστής πρέπει να είναι σε συνεχή λειτουργία για να είναι έτοιμος να ανταποκριθεί σε οποιοδήποτε σήμα, έχοντας αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας. Σε όλες τις περιπτώσεις που ένα δίκτυο αποτελείται από κόμβους που ενσωματώνουν το IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο διατηρείται χαμηλή κατανάλωση ισχύος, λόγω της πλειοψηφίας των κόμβων του δικτύου που παραμένουν σε κατάσταση ύπνου για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Αξιολογώντας την τεχνολογία ZigBee, παρουσιάζονται πολλά πλεονεκτήματα, με κύριο πλεονέκτημα την ικανότητα ρύθμισης ενός δικτύου πλέγματος με τους ασύρματους κόμβους του να είναι βιώσιμοι μόνο με μπαταρία για μερικά χρόνια. Επίσης, σημαντικό στοιχείο είναι ότι σε σχέση με την τεχνολογία Bluetooth, έχει καλύτερη διαχείριση ενέργειας, υποστηρίζει περισσότερους κόμβους και επιτρέπει στις συσκευές να ενώνονται πιο γρήγορα στο δίκτυο.

4.4 Ασύρματος Αισθητήρας

Συνήθως, ένας κόμβος αισθητήρα (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2) αποτελείται από: ένα ή περισσότερους αισθητήρες/συσκευές ενεργοποίησης, μετατροπείς σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό, τον μικροεπεξεργαστή, την μνήμη, το εξάρτημα επικοινωνίας και ένα εξάρτημα πηγής ενέργειας (συνήθως μπαταρία). Αυτά τα εξαρτήματα είναι ενσωματωμένα σε μια ή περισσότερες πλακέτες και είναι συσκευασμένα μέσα σε λιγοστά κυβικά εκατοστά. Με τελευταίας τεχνολογίας, χαμηλής ισχύος κυκλώματα και τεχνολογίες δικτύου, ένας αισθητήρας με δύο μπαταρίες μεγέθους AA μπορεί να είναι σε λειτουργία μέχρι και τρία έτη ρυθμισμένος σε χαμηλή λειτουργικότητα της τάξης του ένα τις εκατό.



Σχήμα 4.2: Τα μέρη ενός αισθητήρα.

Το σύστημα επικοινωνίας είναι το σημαντικότερο σύστημα ενός κόμβου, αφού αποτελεί το τμήμα με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του κόμβου, αλλά και τη συνολική απόδοση του δικτύου. Οι κόμβοι αισθητήρων επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με ραδιοσυχνότητες. Η μετάδοση δεδομένων αγγίζει τα 250 Kbps με χρήση του IEEE 802.11 b/g/a πρωτοκόλλου με την ακτίνα μετάδοσης να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέχρι και μερικές εκατοντάδες μέτρα. Οι πιθανές καταστάσεις του συστήματος επικοινωνίας ενός κόμβου είναι:

- Κατάσταση μετάδοσης (transmission mode): Αποστολή δεδομένων.
- Κατάσταση λήψης (receive mode): Λήψη πληροφοριών.
- Κατάσταση αδράνειας (idle mode): Έτοιμο για λήψη. Μερικές λειτουργίες του κόμβου απενεργοποιούνται, για εξοικονόμηση ενέργειας.
- Κατάσταση ύπνου (sleep mode): Σημαντικές λειτουργίες του συστήματος επικοινωνίας απενεργοποιούνται. Ο κόμβος δεν έχει τη δυνατότητα να λάβει κάποιο πακέτο άμεσα.

Οι αισθητήρες αποτελούν την διεπαφή που αναλαμβάνει την μετατροπή των σημάτων του φυσικού κόσμου σε αναλογικό σήμα. Το μέγεθος των αισθητήρων κυμαίνεται από το μέγεθος ενός κόκκου σκόνης μέχρι και μερικά εκατοστά. Οι αισθητήρες, λόγω του μικρού τους μεγέθους και των περιορισμένων πόρων ενέργειας, έχουν περιορισμένες υπολογιστικές και αποθηκευτικές ικανότητες. Συνεπώς, η κατανάλωση ενέργειας για κάθε λειτουργία του αισθητήρα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, με στόχο τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του.

Για την επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες, χρειάζεται ένας μετατροπέας σήματος (A/D) από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα. Ο μετατροπέας, αυτός, παραλαμβάνει τα αναλογικά σήματα που εκλαμβάνουν οι αισθητήρες και τα μετατρέπει σε ψηφιακό σήμα για να αξιοποιηθούν από τον μικροεπεξεργαστή.

Ο μικροεπεξεργαστής είναι υπεύθυνος για τη συμπεριφορά του κόμβου και του δίνει την δυνατότητα εκτέλεσης περίπλοκων λειτουργιών. Ο μικροελεγκτής προτιμάται έναντι άλλων επεξεργαστών, λόγω της βελτιστοποίησης του σε ενσωματωμένες εφαρμογές και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, στους σύγχρονοι μικροελεγκτές έχουν ενσωματωθεί μνήμες τύπου flash και RAM, A/D μετατροπείς και ψηφιακά I/O σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα χαμηλού κόστους.

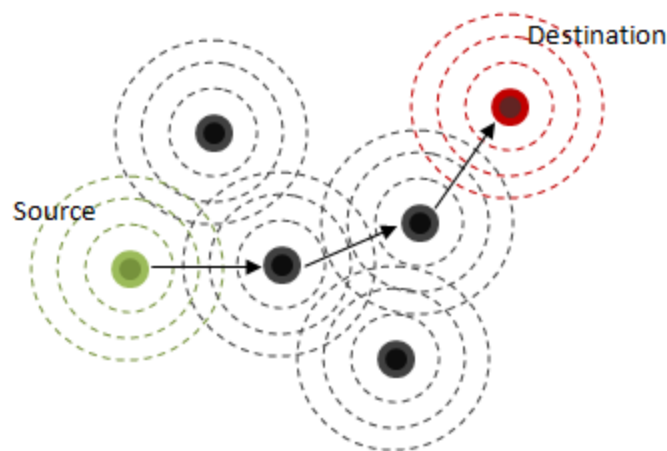
Καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία ενός κόμβου, έχει να διαδραματίσει η πηγή ενέργειας του. Η πιο συνηθισμένη πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται είναι μπαταρίες λιθίου ή αλκαλικές. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, υπάρχει ο ισχυρισμός ότι ένας κόμβος έχει διάρκεια ζωής μέχρι και τρία έτη. Αυτός ο ισχυρισμός πρακτικά δεν ισχύει, αφού

ενδείξεις λένε ότι λόγω των μεγάλων διαρροών ενέργειας προς το περιβάλλον, ένας αισθητήρας αντέχει μέχρι τους έξι μήνες.

4.5 Ασύρματα Δίκτυα Ad hoc

Το ad hoc ασύρματο δίκτυο είναι ένα αποκεντρωμένου τύπου ασύρματο δίκτυο, για το λόγω ότι δεν βασίζεται σε προϋπάρχουσα υποδομή, όπως δρομολογητές ή σε σημεία πρόσβασης (access points). Αντίθετα με ένα απλό ασύρματο δίκτυο, στα ad hoc δίκτυα κάθε κόμβος συμμετέχει στη δρομολόγηση των πακέτων, προωθώντας τα πακέτα μεταξύ τους. Ο προσδιορισμός του ποιος κόμβος θα προωθήσει ένα συγκεκριμένο πακέτο γίνεται δυναμικά με βάση την συνδεσιμότητα του δικτύου. Εκτός από την κλασική δρομολόγηση, τα ad hoc δίκτυα κάνουν και χρήση πλημμύρων (flooding) για την προώθηση πακέτων.

Λόγω των πιο πάνω, τα ad hoc δίκτυα εντάσσονται σε μια ευρύτερη κατηγορία δικτύων (Distributed Transient Network), τα οποία αποτελούνται από κόμβους, οι οποίοι δεν ανήκουν εξ ορισμού και διαρκώς στο δίκτυο. Αντιθέτως, έχουν τη δυνατότητα να εισέρχονται και να αποχωρούν από το δίκτυο οποιαδήποτε στιγμή και από οποιοδήποτε σημείο του. Επίσης, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με οποιοδήποτε άλλο ad hoc δίκτυο είναι εντός του εύρους σύνδεσής του. Πολύ συχνά το ad hoc δίκτυο αναφέρεται σε ένα τρόπο λειτουργίας του IEEE 802.11 πρωτοκόλλου.



Σχήμα 4.3: Δίκτυο πολλαπλών αλμάτων.

Τα ad hoc δίκτυα δημιουργούνται και αναπτύσσονται αυθόρμητα, βασιζόμενα στο κάθε κόμβο που ανακαλύπτοντας τους γειτονικούς του κόμβους δημιουργεί συνδέσεις μεταξύ τους. Έτσι, επαναστατώντας στις κλασικές δικτυακές τεχνολογίες που ήταν βασισμένες σε κόμβους δρομολογητές, ο κάθε κόμβος έχει σημαντικό ρόλο να διαδραματίσει στη λειτουργία του δικτύου αναλαμβάνοντας, εκτός από την προώθηση των δικών του πακέτων, την προώθηση πακέτων από γειτονικούς του κόμβους, αν αυτό είναι αναγκαίο. Αυτό το χαρακτηριστικό, καθιστά δυνατή την αποστολή ενός πακέτου μεταξύ δύο κόμβων (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3) ακόμη και αν ένας εκ των δύο (ή και οι δύο) δεν βρίσκεται στην εμβέλεια του άλλου. Οι ελάχιστες ρυθμίσεις που χρειάζεται και η γρήγορη ανάπτυξη ενός ad hoc δικτύου, το καθιστά κατάλληλο για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπως φυσικές καταστροφές.

Δεν υπάρχει ξεκάθαρη εικόνα για το που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτού του τύπου δίκτυα. Σε περιοχές όπου δεν είναι διαθέσιμη η υποδομή του Διαδικτύου, μπορεί να δημιουργηθεί ένα ad hoc δίκτυο μεταξύ κινητών κόμβων. Παράδειγμα της πιο πάνω περίπτωσης, είναι σε στρατιωτικές δυνάμεις σε περίπτωση που η υποδομή Διαδικτύου είναι είτε μη διαθέσιμη (πχ. σε δάσος), είτε κατεστραμμένη.

Τα ad hoc ασύρματα δίκτυα μπορούν να ταξινομηθούν, με βάση την εφαρμογή τους σε τρεις κατηγορίες:

- Κινητά ad hoc δίκτυα (MANET).
- Ασύρματα δίκτυα πλέγματος (WMN).
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN).

Λόγω του γεγονότος ότι ένα πακέτο μπορεί να χρειαστεί να κάνει πολλές αναπηδήσεις (multi-hops) μέχρι να φτάσει στον προορισμό του, απαιτείται ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης για ad hoc δίκτυα, έχει δύο βασικές λειτουργίες, την επιλογή διαδρομών από διάφορα ζεύγη αποστολέας – παραλήπτης και την παράδοση των πακέτων στο σωστό παραλήπτη. Η δεύτερη λειτουργία είναι εννοιολογικά απλή, αφού υλοποιείται χρησιμοποιώντας μια ποικιλία από πρωτόκολλα και πίνακες δρομολόγησης.

Μερικά από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης σε ad hoc δίκτυα είναι: MANET, παραλληλισμός αλληλουχίας διανύσματος απόστασης (DSDV), ad hoc με ζήτηση διανύσματος απόστασης (AODV), δυναμική πηγή δρομολόγησης (DSR), πρωτόκολλο δρομολόγησης ζώνης (ZRP), αλγόριθμος δρομολόγησης προσωρινής διαταγής (TORA), πρωτόκολλο ενθυλάκωσης MANET (IMEP) και πρωτόκολλο δρομολόγησης με βάση σύμπλεγμα (CBRP).

4.6 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

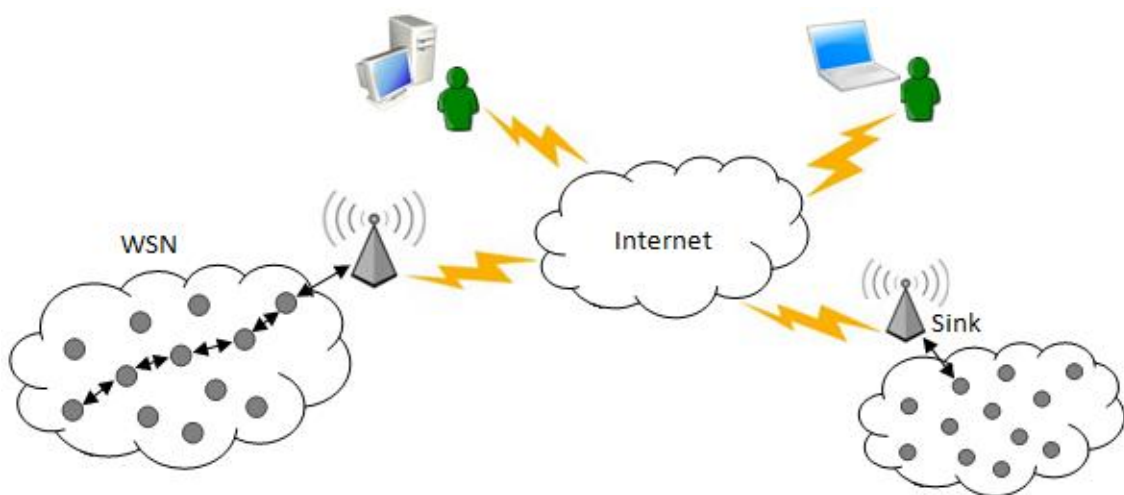
Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [5,17] είναι μια από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες του 21^{ου} αιώνα. Οι περισσότεροι ερευνητές και τεχνολογικοί αναλυτές, πιστεύουν ότι στο εγγύς μέλλον οι micro-sensors θα είναι στα σπίτια μας, στα εργοστάσια, στο ανθρώπινο σώμα, στα ζώα, στα αυτοκίνητα, παντού. Επίσης, τα δίκτυα αισθητήρων αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία σε διάφορες εφαρμογές, όπως η απογραφή για διαχείριση καταστροφών, η παρακολούθηση της υγείας διαφόρων υποδομών, η στρατιωτική επιτήρηση και αναγνώριση, ακόμη και η παρακολούθηση ασθενών.

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων συνήθως αποτελείται από εκατοντάδες των εν λόγω κόμβων (όπως περιγράφηκαν στο Υποκεφάλαιο 4.4) που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματων μέσων για την ανταλλαγή πληροφοριών αλλά και για συνεργασία επεξεργασίας δεδομένων. Σε πολλές εφαρμογές οι κόμβοι αυτοί αναπτύσσονται με ένα ad hoc τρόπο, χωρίς προσεκτικό σχεδιασμό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι κόμβοι πρέπει να οργανωθούν για να μορφοποιηθούν σε ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας πολλαπλών αλμάτων.

Μετά την αρχική εγκατάσταση του δικτύου (συνήθως ανάπτυξη ad hoc δικτύου), οι κόμβοι αισθητήρων είναι υπεύθυνοι για την οργάνωση κατάλληλης υποδομής δικτύου, συνήθως με συνδέσεις πολλαπλών αναπηδήσεων με άλλους κόμβους. Στη συνέχεια, οι αισθητήρες που υπάρχουν ενσωματωμένοι σε κάποιο κόμβο, ανάλογα με την τεχνολογία τους, αρχίζουν την συλλογή του ανάλογου φυσικού μεγέθους από το περιβάλλον τους. Αυτοί οι αισθητήρες λειτουργούν είτε συνεχώς, είτε με την ενεργοποίηση τους λόγω κάποιας αλλαγής στο περιβάλλον του. Επίσης, πληροφορίες

για την τοποθεσία των κόμβων μπορούν να αποκτηθούν είτε από το παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού θέσης (GPS), είτε από τοπικούς αλγόριθμους ανεύρεσης τοποθεσίας. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να συγκεντρωθούν για όλους τους κόμβους ενός δικτύου και με την κατάλληλη επεξεργασία των πληροφοριών αυτών να κατασκευαστεί μια συνολική εικόνα των φαινομένων που παρακολουθούνται. Η βασική φιλοσοφία πίσω από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ότι, ενώ η ικανότητα του κάθε κόμβου αισθητήρα είναι περιορισμένη, η συνολική δύναμη του δικτύου είναι επαρκής για την ανταπόκριση στην αποστολή του.

Σε ένα απλό σενάριο, οι χρήστες μπορούν να ανακτήσουν τις, ενδιαφέρον για αυτούς, πληροφορίες από ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με την εξάσκηση ερωτημάτων και τη συλλογή πληροφοριών από τους σταθμούς βάσεις (γνωστοί ως sink κόμβοι). Αυτοί οι σταθμοί βάσεις, συμπεριφέρονται σαν διεπαφή μεταξύ των χρηστών και του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να θεωρηθεί ως μια κατανεμημένη βάση. Είναι, επίσης, στόχος τα δίκτυα αισθητήρων να συνδεθούν με το Διαδίκτυο (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4), μέσω του οποίου θα γίνεται εφικτή η ανταλλαγή πληροφοριών.



Σχήμα 4.4: Σύνδεση σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μέσω του Διαδικτύου.

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στηρίζεται πολύ στις ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης. Το IEEE 802.11 πρωτόκολλο (Υποκεφάλαιο 4.1) ήταν το πρώτο πρωτόκολλο για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN). Στη συνέχεια, ανανεωμένη έκδοση του πρωτοκόλλου αυτού, το IEEE 802.11b, προσφέρει αυξημένη ταχύτητα

μετάδοσης δεδομένων και CSMA/CA μηχανισμούς για MAC. Ωστόσο, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας και οι πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων τα καθιστούν μη κατάλληλα πρωτόκολλα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το γεγονός αυτό έδωσε κίνητρο για αρκετές ερευνητικές προσπάθειες σχεδιασμού αποδοτικών, όσο αφορά ενέργεια, MAC πρωτοκόλλων. Το ZigBee πρωτόκολλο (Υποκεφάλαιο 4.3), που δημιουργήθηκε βασισμένο στο IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο (Υποκεφάλαιο 4.2), σχεδιάστηκε ειδικά για μικρής εμβέλειας και χαμηλής ταχύτητας δεδομένων ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN).

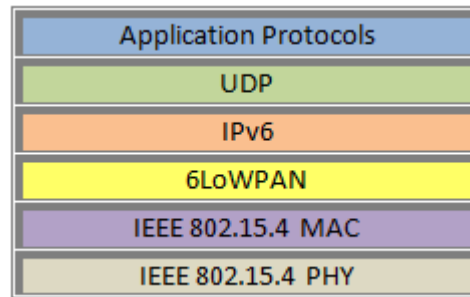
Μια άλλη σημαντική κατεύθυνση έρευνας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι οι τεχνικές δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα. Μερικά από τα αρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ουσιαστικά πρωτόκολλα για ασύρματα ad hoc δίκτυα ή για ασύρματα κινητά δίκτυα. Αυτά τα πρωτόκολλα είναι σχεδόν αδύνατον να εφαρμοστούν σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, λόγω της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειάς τους. Επίσης, στοχεύουν την υποστήριξη γενικών αιτημάτων δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη ειδικά μοτίβα επικοινωνίας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ωστόσο, η προσαρμογή των εν λόγω πρωτοκόλλων, αλλά και η ανάπτυξη νέων τεχνικών δρομολόγησης αποτελούν θέματα έρευνας που απασχολούν πολλούς ερευνητές.

4.6.1 6LoWPAN Δίκτυα

Η πιο σημαντική προσπάθεια για την ενσωμάτωση του Internet Protocol στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, γίνεται από την IETF και τη δημιουργία της ομάδας 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network) [19]. Στόχος αυτής της ομάδας είναι η χρήση του IPv6 πρωτοκόλλου πάνω στο IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο, με σκοπό την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που παρέχει το πρωτόκολλο αυτό.

Σε σχέση με την TCP/IP στοίβα, η 6LoWPAN στοίβα (Σχήμα 4.5) διαφέρει αισθητά. Αυτό οφείλεται στο ότι το TCP πρωτόκολλο δεν χρησιμοποιείται, για λόγους επίδοσης και πολυπλοκότητας. Το 6LoWPAN πρωτόκολλο είναι ουσιαστικά ένα στρώμα προσαρμογής που μεσολαβεί μεταξύ του Network και Link Layers και παρέχει όλες τις

υπηρεσίες που χρειάζεται το Network Layer και δεν προσφέρονται από το Link Layer. Επιπλέον, το 6LoWPAN πρωτόκολλο υποστηρίζει μόνο IPv6 διευθύνσεις, σε αντίθεση με τη TCP/IP στοίβα που υποστηρίζει και IPv4 διευθύνσεις.

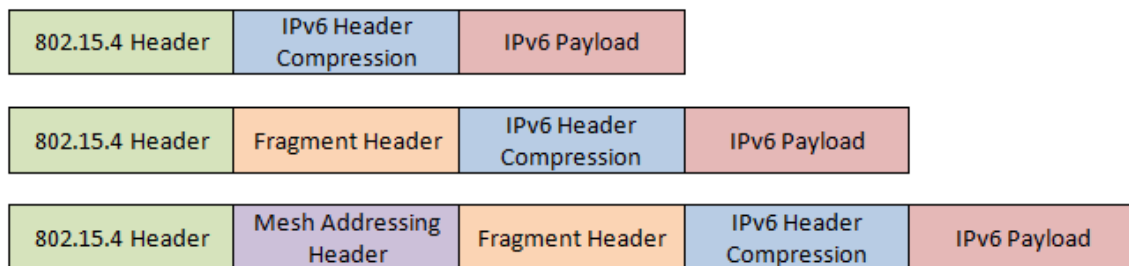


Σχήμα 4.5: Η 6LoWPAN στοίβα.

Αυτό το στρώμα προσαρμογής που εμφανίζεται ανάμεσα σε Network και Link Layers, παρέχει συμπίεση κεφαλίδας για μείωση του overhead, κατακερματισμό για την υποστήριξη του ελάχιστου maximum transmission unit (MTU) του IPv6 πρωτοκόλλου και για την υποστήριξη του layer-two forwarding για την μετάδοση του IPv6 πακέτου σε πολλαπλά radio hops.

Το IPv6 πρωτόκολλο χρειάζεται ελάχιστο MTU 1280 bytes για να προλαβαίνει τον συχνό κατακερματισμό της IP διεύθυνσης. Το IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4.1, υποστηρίζει μέχρι 127 bytes ως μέγιστο μέγεθος πλαισίου. Συνεπώς, ο κατακερματισμός που προσφέρεται από το 6LoWPAN πρωτόκολλο δεν επιτρέπει την εκπομπή μεγάλων πακέτων στο δίκτυο. Στη περίπτωση που το πακέτο δεν χωράει μέσα σε ένα 802.15.4 πλαίσιο, κατακερματίζεται σε μικρότερα τμήματα. Ο παραλήπτης των τμημάτων χρησιμοποιεί την διεύθυνση του αποστολέα, τη διεύθυνση του παραλήπτη, το μέγεθος του πακέτου και την ετικέτα αναγνώρισης όλων των τμημάτων που ανήκουν στο συγκεκριμένο πακέτο για την ανακατασκευή του. Ο κατακερματισμός είναι ανεπιθύμητος στη περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, αφού η περίπτωση που χαθεί κάποιο τμήμα χρειάζεται αναμετάδοση, καθώς επίσης και η ανακατασκευή του πακέτου κοστίζει σε πόρους.

Όπως προαναφέρθηκε, η μεταφορά των IPv6 πακέτων πάνω σε LoWPAN δίκτυα είναι δύσκολη, λόγω της κεφαλίδας του IEEE 802.15.4 πρωτοκόλλου. Συνεπώς, το 6LoWPAN πρωτόκολλο χρησιμοποιεί κεφαλίδες για την έκφραση των δυνατοτήτων του. Το 6LoWPAN πρωτόκολλο παρέχει τρεις μορφές κεφαλίδας (όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6): αποστολής (dispatch), πλέγματος (mesh) και κατακερματισμού (fragmentation). Η μορφή της κεφαλίδας προσδιορίζεται από το πεδίο 802.15.4 κεφαλίδας στην αρχή κάθε κεφαλίδας. Μειώνοντας το μέγεθος της κεφαλίδας, επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση ενέργειας ανά πακέτο, η αύξηση της ωφέλιμης πληροφορίας και ο μέγιστος δυνατός περιορισμός του κόστους του κατακερματισμού.



Σχήμα 4.6: Τα τρία είδη 6LoWPAN κεφαλίδας.

Ένα 6LoWPAN δίκτυο αποτελείται από 6LoWPAN κόμβους, 6LoWPAN δρομολογητές και edge δρομολογητές. Οι κόμβοι στέλνουν και λαμβάνουν πακέτα, οι δρομολογητές εκτελούν δρομολογήσεις εντός του LoWPAN δικτύου και οι edge δρομολογητές εκτελούν δρομολογήσεις μεταξύ 6LoWPAN δικτύων και άλλων IP δικτύων. Ένα 6LoWPAN IPv6 υποδίκτυο περιλαμβάνει όλους τους κόμβους που μοιράζονται το ίδιο IPv6 πρόθεμα που καλύπτουν το σύνολο LoWPAN δικτύων ή extended LoWPAN δικτύων. Ένα LoWPAN δίκτυο ορίζεται από τους κόμβους που μοιράζονται το ίδιο IPv6 πρόθεμα (συνήθως έχοντας μόνο ένα edge δρομολογητή) και μπορεί να συνδέεται με άλλα IP δίκτυα. Ένα extended LoWPAN δίκτυο μπορεί να αποτελείται από περισσότερους από ένα edge δρομολογητή και τους κόμβους του. Το extended LoWPAN δίκτυο χρησιμοποιεί ένα backbone σύνδεσμο (Ethernet) για το συντονισμό των πληροφοριών σχετικά με το LoWPAN.

4.6.1.1 6LoWPAN Neighbor Discovery

Το 6LoWPAN Neighbor Discovery πρωτόκολλο [20] είναι μια επέκταση του IPv6 Neighbor Discovery πρωτοκόλλου (Υποκεφάλαιο 3.2.2.1), με πρόσθεση κάποιων νέων μηνυμάτων για την στήριξη του όσων αφορά την κινητικότητα, ανοχή σφαλμάτων, bootstrapping, συμπίεση κεφαλίδας κλπ.

Στο σχεδιασμό του 6LoWPAN Neighbor Discovery πρωτοκόλλου λαμβάνονται υπόψη οι πιο κάτω παράμετροι, όσον αφορά ένα 6LoWPAN δίκτυο:

- Συνεχώς μεταβαλλόμενη ασύρματη σύνδεση.
- Ανάθεση διευθύνσεων για σύντομο χρονικό διάστημα.
- Το επίπεδο μοντέλο που έχει το 6LoWPAN δίκτυο.
- Χρήση δύο επιπέδων γραμμής και τεχνικές δρομολόγησης.
- Έλλειψη της μητρικής multicast.
- Βαθιούς κύκλους ύπνου των 6LoWPAN κόμβων.
- Κινητή φύση των ασύρματων κόμβων.
- Περιορισμένη ενέργεια και υπολογιστική ικανότητα των κόμβων.

Για περισσότερη απλότητα, οι IPv6 διευθύνσεις έχουν άμεση χαρτογράφηση για τη σύνδεση στρώματος MAC διευθύνσεων και ένα δευτερεύον δίκτυο επεκτείνεται σε ολόκληρο το 6LoWPAN δίκτυο. Η χρήση της πολυεκπομπής αποφεύγεται, καθώς και η λειτουργία των «οικοδεσποτών» διατηρείται όσο το δυνατόν απλούστερη.

Όταν ένας κόμβος τεθεί σε λειτουργία για πρώτη φορά, έχει μια MAC διεύθυνση. Σκοπεύοντας την δημιουργία σύνδεσης του με ένα 6LoWPAN δίκτυο, στέλνει Router Solicitation μήνυμα και λαμβάνει ως απάντηση Router Advertisement μηνύματα από τους τοπικούς δρομολογητές. Γίνεται αναζήτηση στα μηνύματα που έλαβε για έγκυρο πρόθεμα δικτύου και ανακαλύπτοντάς το δημιουργεί αυτόματα παγκόσμιες διευθύνσεις. Στη συνέχεια, γίνεται προσπάθεια εγγραφής του κόμβου στο δρομολογητή. Στη περίπτωση που ο edge δρομολογητής απέχει αρκετά hops από τον κόμβο, τότε το μήνυμα του κόμβου προωθείται σε τοπικό δρομολογητή, όπου αυτός με τη σειρά του θα το προωθήσει στον edge δρομολογητή. Ο edge δρομολογητής διατηρεί μια βάση

δεδομένων (whiteboard) με πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των γειτονικών κόμβων. Αυτή η βάση δεδομένων χρησιμοποιείται για τον έλεγχο διπλής εμφάνισης μιας διεύθυνσης. Με το πέρας των ελέγχων επαναχρησιμοποίησης της διεύθυνσης, ο δρομολογητής στέλλει μήνυμα επιβεβαίωσης με τις διαθέσιμες διευθύνσεις στον κόμβο. Έτσι, ο κόμβος μπορεί πλέον να επικοινωνήσει με τους κόμβους του δικτύου.

4.6.1.2 Πρωτόκολλο Δρομολόγησης RPL

Τα δίκτυα χαμηλής ισχύος με απώλειες, είναι μια κατηγορία δικτύου, στην οποία οι δρομολογητές και οι συνδέσεις τους περιορίζονται. Οι δρομολογητές αυτοί συνήθως λειτουργούν με περιορισμούς στην υπολογιστική δύναμη, στη μνήμη και στην ενέργεια. Οι συνδέσεις τους χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά απώλειας, χαμηλά ποσοστά δεδομένων και αστάθεια. Αυτού του είδους τα δίκτυα αποτελούνται από δεκάδες έως και χιλιάδες δρομολογητές. Το πρωτόκολλο [7,15,18] παρέχει υποστήριξη των ροών κυκλοφορίας point-to-point μορφής (μεταξύ κόμβων εντός του δικτύου), point-to-multipoint μορφής (από κεντρικό σημείο ελέγχου σε υποσύνολο κόμβων εντός του δικτύου) και multipoint-to-point μορφής (από κόμβους εντός του δικτύου σε κεντρικό σημείο ελέγχου). Το RPL πρωτόκολλο δρομολόγησης (IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks) παρέχει τον μηχανισμό με τον οποίο υποστηρίζονται οι point-to-multipoint και multipoint-to-point ροές κυκλοφορίες. Η υποστήριξη της point-to-point ροή κυκλοφορίας είναι εξίσου διαθέσιμη. Κόμβοι που έχουν στη διάθεσή τους το RPL πρωτόκολλο είναι σε θέση να αναπτύξουν ανεξάρτητα και αυτόνομα μια τοπολογία δικτύου, να εγκαταστήσουν και να υπολογίσουν διαδρομές, χωρίς κάποια διοικητική αλληλεπίδραση.

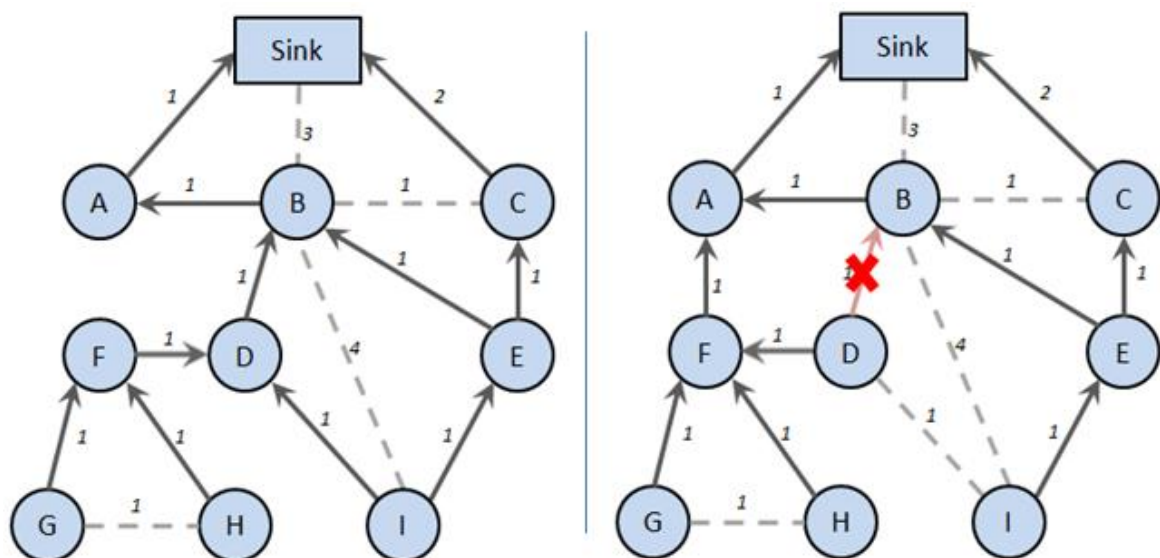
Το πρωτόκολλο αυτό βασίζεται στην κατασκευή προσανατολισμένων κατευθυνόμενων μη κυκλικών γραφημάτων (DODAG) με ρίζα ένα sink κόμβο. Ανάλογα με την ροή κυκλοφορίας που ζητείται, γίνεται και η ανάλογη προσέγγιση του γραφήματος. Πιο αναλυτικά, για multipoint-to-point ροή κυκλοφορίας η διαδικασία κινείται από κάτω προς τα πάνω (προς τον sink κόμβο) και για point-to-multipoint από τον sink κόμβο προς τα κάτω. Το γράφημα χρησιμοποιείται, επίσης, και για την αποφυγή βρόγχων.

Επιπρόσθετα, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, υποστηρίζεται η point-to-point ροή κυκλοφορίας μέσω της διαδικασίας από τον sink κόμβο προς τα κάτω.

Το RPL πρωτόκολλο δρομολόγησης, χρησιμοποιεί μετρητές δρομολόγησης για τον υπολογισμό του συντομότερου μονοπατιού. Οι τρεις μετρήσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

- Σύνδεση έναντι των μετρήσεων του κόμβου.
- Ποιότητα έναντι της ποσότητας.
- Δυναμικού έναντι του στατικού.

Έτσι, με βάση τις μετρήσεις δημιουργείται ο γράφος, επιλέγοντας πάντα την πιο σύντομη διαδρομή. Σε περίπτωση που κάποιος κόμβος, για οποιοδήποτε λόγο, δεν είναι πλέον προσβάσιμος στο δίκτυο, ή κάποια σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων δεν είναι πλέον διαθέσιμη, υποστηρίζεται ο υπολογισμός και η εγκατάσταση διαφορετικής διαδρομής για όλους τους επηρεαζόμενους κόμβους. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται, στα αριστερά η αρχική οργάνωση δρομολόγησης και στα δεξιά ο ανασχηματισμός του γράφου μετά από απώλεια μιας σύνδεσης.



Σχήμα 4.7: Αριστερά, η αρχική διάταξη ενός κατευθυνόμενου μη κυκλικού γράφου.

Δεξιά, ο ανασχηματισμός του γράφου μετά από απώλεια μιας σύνδεσης.

Κεφάλαιο 5

Προσαρμογή και Υλοποίηση

5.1 Λειτουργικό Σύστημα Contiki	36
5.2 Προσαρμογή Πρωτοκόλλων	37
5.2.1 Προσαρμογή IPv6 Neighbor Discovery	38
5.2.2 Προσαρμογή RPL πρωτοκόλλου	39
5.2.3 Προσαρμογή Mobility	40
5.2.3 Προβλήματα	41
5.3.1 Προσαρμογή CollectView	41

5.1 Λειτουργικό Σύστημα Contiki

Το Contiki [1,14] είναι ένα ανοικτού κώδικα λειτουργικό σύστημα, που υλοποιεί πρωτόκολλα για ενσωματωμένα συστήματα και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αναπτύχθηκε, αρχικά, από ομάδα προγραμματιστών, ακαδημαϊκού και επαγγελματικού επιπέδου, με επικεφαλής τον Adam Dunkels (από το Σουηδικό Ινστιτούτο Επιστήμης Πληροφορικής). Από τότε, μεγάλος αριθμός προγραμματιστών (μερικοί από αυτούς είναι μέλη της Cisco, SAP, SICS κλπ) συνέβαλε στην ανάπτυξή του.

Πολλές βασικές ιδέες και μηχανισμοί που αναπτύχθηκαν στο Contiki έχουν υιοθετηθεί ευρέως στη βιομηχανία. Η UIP embedded IP στοίβα (επίσημη δημοσίευση του πρωτοκόλλου το 2001) χρησιμοποιείται σήμερα από εκατοντάδες επιχειρήσεις σε διάφορα συστήματα, όπως συστήματα για πλοία μεταφοράς εμπορευμάτων, δορυφόρων και εξοπλισμών εξόρυξης πετρελαίου.

Σε αντίθεση με την πιο ακαδημαϊκή προσέγγιση του λειτουργικού συστήματος TinyOS με τον καθορισμό μιας νέας γλώσσας προγραμματισμού (nesC), το λειτουργικό σύστημα Contiki έχει υιοθετήσει μια πιο πρακτική προσέγγιση με την χρήση C μακροεντολών (macros). Το Contiki παρέχει ολοκληρωμένη την IPv6 στοίβα, όπου σε συνδυασμό με μηχανισμούς όπως το ContikiMAC, επιτρέπει σε συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία να συμμετέχουν σε IPv6 δικτύωση, ακόμη και με ρόλο δρομολογητή. Κατ' επέκταση των πιο πάνω, μεταξύ πολλών άλλων πρωτοκόλλων και μηχανισμών, το Contiki υποστηρίζει τη 6LoWPAN συμπίεση κεφαλίδας και την RPL δρομολόγηση.

Για την διευκόλυνση ανάπτυξης λογισμικού αλλά και διευκόλυνση στον εντοπισμό σφαλμάτων, παρέχονται τρία περιβάλλοντα προσομοίωσης: τον εξομοιωτή MSPsim, τον Cooja cross-layer προσομοιωτή δικτύου [4] και τον netsim process-level προσομοιωτή. Συνήθως, η διαδικασία ανάπτυξης λογισμικού στο Contiki πρέπει να εξεταστεί και να επιτύχει και στα τρία στάδια προσομοίωσης, για να τεθεί σε λειτουργία πάνω σε επίπεδο υλικού.

Τα προγράμματα αναπτύσσονται στη γλώσσα προγραμματισμού C. Για τη διευκόλυνση ανάπτυξης λογισμικού στο λειτουργικό σύστημα Contiki είναι δυνατή η λήψη του πακέτου “Instant Contiki”, το οποίο παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία και μεταγλωττιστές.

5.2 Προσαρμογή Πρωτοκόλλων

Για την πραγματοποίηση της παρούσας ερευνητικής εργασίας, χρειάστηκαν πολλές προσαρμογές και διορθώσεις όσον αφορά τα υπάρχον αρχεία ρυθμίσεων (configuration files), τις υλοποιήσεις των πρωτοκόλλων και των αρχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τις λειτουργίες των κόμβων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο περισσότερος χρόνος της έρευνας αξιοποιήθηκε σε αυτό το τομέα, για τον λόγο ότι τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις λειτουργίες των κόμβων είχαν, αρχικά, μηδαμινές δυνατότητες. Επιπρόσθετα, σε πολλά σημεία του ήδη υπάρχον κώδικα εφαρμόστηκαν

κάποιες αλλαγές, ή ακόμη και διορθώσεις. Αυτό συνέβηκε γιατί πολλά κομμάτια κώδικα που αναπτύσσονται είναι σε ερευνητικό στάδιο.

Αρχικά, τα δύο αρχεία που δόθηκαν για επεξεργασία, χωρίστηκαν σε δύο διαφορετικούς φακέλους, ο ένας φάκελος για τον κινητό κόμβο και ο άλλος φάκελος για τον εξυπηρετητή (sink node). Επίσης, για τις ανάγκες των σεναρίων δημιουργήθηκε και τρίτο φάκελο με αντίγραφα των αρχείων του κινητού κόμβου. Αυτός ο φάκελος αντιπροσωπεύει τους σταθερούς κόμβους και χρησιμεύουν στην αξιολόγηση του Neighbor Discovery πρωτοκόλλου και του RPL πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Όσον αφορά τον κώδικα των κόμβων αυτών, προσαρμόστηκε ούτως ώστε να μην στέλλουν μηνύματα προς τον εξυπηρετητή και να επιβαρύνεται η προσομοίωση ανούσια.

5.2.1 Προσαρμογή IPv6 Neighbor Discovery

Για την ενεργοποίηση του IPv6 Neighbor Discovery πρωτοκόλλου, αρχικά, προστέθηκε στα αρχεία ρυθμίσεων και των τριών ειδών κόμβων η σημαία UIP_CONF_ROUTER. Με την σημαία αυτή, επισημαίνεται η ύπαρξη δρομολογητή στο σενάριο και ενεργοποιήθηκαν μεταξύ άλλων οι λειτουργίες ανταλλαγής Neighbor Solicitation και Neighbor Advertisement για την εξεύρεση γειτονικών κόμβων. Επίσης, με βάση αυτή τη σημαία, ο εξυπηρετητής παίρνει ρόλο sink κόμβου και δημιουργεί την δική του παγκόσμια διεύθυνση βασισμένος σε πρόθεμα δικτύου (prefix) που δόθηκε χειροκίνητα στον κώδικα.

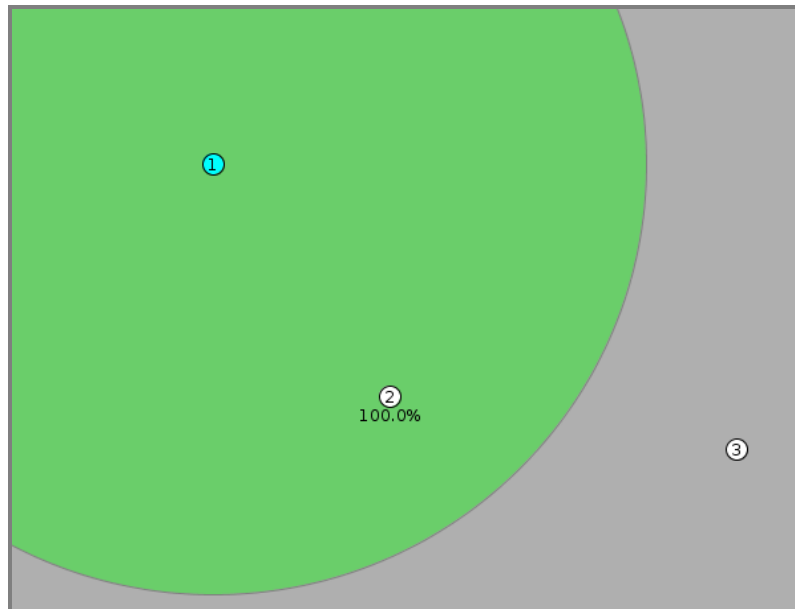
Στο αρχείο ρυθμίσεων των sky κόμβων αφαιρέθηκε η σημαία UIP_ND6_SEND_RA, με σκοπό να δηλωθεί μόνο στο αρχείο ρυθμίσεων του εξυπηρετητή. Ενόσω η σημαία για την αποστολή Router Advertisement μηνυμάτων ήταν δηλωμένη στο γενικό αρχείο ρυθμίσεων των sky κόμβων, οι κόμβοι αισθητήρων εμφάνιζαν συμπεριφορές εξυπηρετητή (έστελλαν περιοδικά Router Advertisement μηνύματα). Έτσι η σημαία UIP_ND6_SEND_RA δηλώθηκε στο αρχείο ρυθμίσεων του εξυπηρετητή, ενεργοποιώντας την αποστολή των Router Advertisement μηνυμάτων είτε περιοδικά, είτε σαν απάντηση σε Router Solicitation μηνύματα.

Στο αρχείο υλοποίησης του IPv6 Neighbor Discovery πρωτοκόλλου έγινε μια διόρθωση στη δημιουργία νέου Neighbor Advertisement μηνύματος. Προστέθηκε ο έλεγχος της περίπτωσης όπου ο κόμβος που προσπαθεί να δημιουργήσει Neighbor Advertisement μήνυμα είναι ο δρομολογητής. Στη περίπτωση που είναι, προσθέτει στις σημαίες που επισυνάπτονται στο πακέτο, τη σημαία που επισημαίνει ότι ο αποστολέας του μηνύματος αυτού είναι δρομολογητής.

Το πώς λειτουργούν στα οι πιο πάνω τροποποιήσεις παρουσιάζονται στις περιγραφές των σεναρίων (Κεφάλαιο 5).

5.2.2 Προσαρμογή RPL πρωτοκόλλου

Τα αρχεία που δόθηκαν για επεξεργασία, αρχικά δεν είχαν κάποιο πρωτόκολλο δρομολόγησης των πακέτων. Συνέπεια αυτού, ακόμη και σε απλά σενάρια τα πακέτα δεν δρομολογούνταν σωστά.



Σχήμα 5.1: Πιλοτικό σενάριο για εξεύρεση των ήδη υπάρχον δυνατοτήτων των κόμβων.

Παράδειγμα, στο Σχήμα 5.1 το σενάριο αποτελείται από δύο σταθερούς κόμβους και ένα εξυπηρετητή. Ο κόμβος υπ' αριθμόν ένα είναι ο εξυπηρετητής, ενώ οι άλλοι δύο είναι απλοί κόμβοι. Στη περίπτωση που ο κόμβος δύο προσπαθεί να στείλει «hello»

πακέτο στον εξυπηρετητή, τον προσεγγίζει μέσω Neighbor Solicitation μηνύματος και του το προωθεί. Στη δεύτερη περίπτωση, όπου ο κόμβος τρία προσπαθεί να στείλει «hello» πακέτο στον εξυπηρετητή, προσπαθεί να τον αναγνωρίσει σαν γείτονα και δεν «σκέφτεται» να δρομολογήσει το πακέτο μέσω του κόμβου δύο.

Για την προσαρμογή του RPL αλγόριθμου δρομολόγησης έγιναν τροποποιήσεις στο αρχείο λειτουργιών του εξυπηρετητή. Ο εξυπηρετητής, αρχίζοντας τη λειτουργία του, δημιουργεί μια παγκόσμια διεύθυνση, μέσω του προθέματος δικτύου που του δίνεται. Στη συνέχεια εξετάζει αν υπάρχει ήδη κάποιο δίκτυο στην εμβέλειά του. Αφού διαπιστωθεί ότι δεν υπάρχει, ο εξυπηρετητής διαμορφώνει ένα DAG δίκτυο (γράφο) και θέτει τον εαυτό του σαν ρίζα του γράφου αυτού. Έτσι, δημιουργείται η RPL DAG τοπολογία.

5.2.2 Προσαρμογή Mobility

Για την επίτευξη κίνησης του κόμβου έγινε ανεύρεση εφαρμογής στο Διαδίκτυο που προσφέρει αυτή τη δυνατότητα. Ο φάκελος της εφαρμογής τοποθετήθηκε στο φάκελο με τις επιρόσθετες εφαρμογές του Cooja προσομοιωτή. Στη συνέχεια, μέσα στις ρυθμίσεις του Cooja προστέθηκε το μονοπάτι της εφαρμογής.

Η εφαρμογή mobility είναι ανεπτυγμένη σε Java κώδικα και υλοποιεί την κίνηση των κόμβων διαβάζοντας αρχεία δεδομένων. Στο αρχείο δεδομένων δηλώνονται τέσσερις παράμετροι με τη συγκεκριμένη σειρά: αριθμός κόμβου (ξεκινώντας από το μηδέν), χρόνος μετακίνησης (σε ms), μετακίνηση στον x άξονα, μετακίνηση στον y άξονα. Για παράδειγμα, η έκφραση «1 5.0 14 11» μεταφράζεται από την εφαρμογή ως: στο 5ms ο κόμβος δύο πρέπει να μετακινηθεί στη θέση 14 ως προς τον άξονα x και στη θέση 11 ως προς τον άξονα y. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όταν διαβαστούν όλες οι γραμμές του αρχείου που δίνεται οι κινήσεις επαναλαμβάνονται από την αρχή.

Για σκοπούς προσομοίωσης υλοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά αρχεία δεδομένων. Δύο αρχεία για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (Υποκεφάλαιο 6.3) και δύο αρχεία για το τρίτο σενάριο προσομοίωσης (Υποκεφάλαιο 6.4). Οι διαφορές των δύο αυτών

αρχείων, και για τα δύο σενάρια, είναι η επίτευξη διπλάσιας ταχύτητας του κόμβου μέσω της τροποποίησης του χρόνου μετακίνησης.

5.3 Προβλήματα

Κατά την προσπάθεια υλοποίησης των πιο πάνω, παρουσιάστηκαν αρκετά προβλήματα. Το βασικότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε είναι η ελάχιστη μνήμη προσομοίωσης. Αυτό δυσχέραινε την προσπάθεια προσαρμογής και διόρθωσης των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιηθήκαν, αφού πολλές φορές απενεργοποιούνταν αναγκαστικά τα μηνύματα απασφαλμάτωσης.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του λειτουργικού συστήματος Contiki που δυσκολεύει την μελέτη και την ανάπτυξη σεναρίων είναι η χρήση μακροεντολών. Λόγω ύπαρξης πολλών βιβλιοθηκών και λόγω του ότι κάθε βιβλιοθήκη υπάρχει πιθανότητα να δηλώνει τις δικές τις μακροεντολές, η κατανόηση του κώδικα χρειαζόταν χρόνο και η ενεργοποίηση κάποιων λειτουργιών απαιτούσε προσεκτικές τροποποιήσεις.

5.3.1 Προσαρμογή CollectView

Για την συλλογή δεδομένων από τους κόμβους του δικτύου (όπως ενέργεια, γειτονικοί κόμβοι κλπ.) το λειτουργικό σύστημα Contiki παρέχει την εφαρμογή CollectView. Η εφαρμογή αυτή είναι ανεπτυγμένη σε Java κώδικα και για την εμφάνιση των επιθυμητών αποτελεσμάτων χρειάζονται τροποποιήσεις στον ήδη υπάρχον κώδικα των κόμβων. Οι τροποποιήσεις αυτές, έχουν ως αποτέλεσμα να στέλλονται με συγκεκριμένο τρόπο τα δεδομένα που χρειάζεται η εφαρμογή για την παραγωγή των αποτελεσμάτων.

Όπως προαναφέρθηκε πιο πάνω, ο Cooja προσομοιωτής έχει προβλήματα μνήμης. Αποτέλεσμα αυτού, κατά την προσπάθεια προσθήκης της πιο πάνω εφαρμογής στα σενάρια που δημιουργήθηκαν παρουσιάστηκε έλλειψη μνήμης τόσο για την εμφάνιση κειμένων, όσο και για τα δεδομένα.

Κεφάλαιο 6

Σενάρια και Αποτελέσματα

6.1 Γενική Λειτουργία	42
6.2 Πρώτο Σενάριο	43
6.2.1 Ανάλυση	43
6.3 Δεύτερο Σενάριο	45
6.3.1 Ανάλυση	46
6.3.2 Μετρήσεις και Αποτελέσματα	48
6.4 Τρίτο Σενάριο	52
6.4.1 Ανάλυση	53
6.4.2 Μετρήσεις και Αποτελέσματα	55

6.1 Γενική Λειτουργία

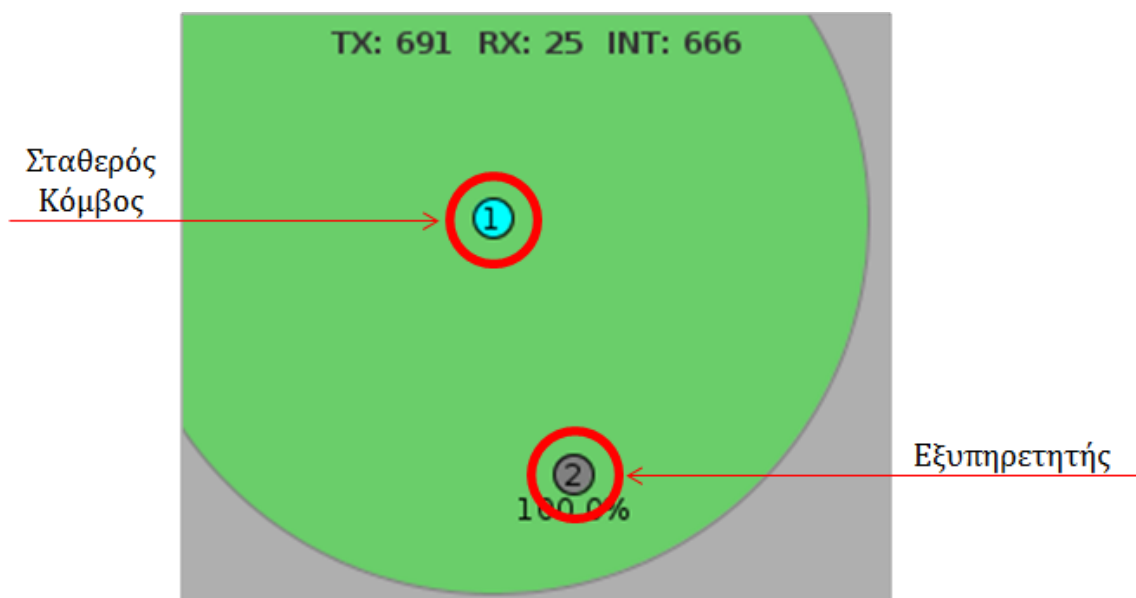
Ο εξυπηρετητής δημιουργεί την παγκόσμια διεύθυνσή του μέσω προθέματος που του δίνεται χειροκίνητα. Στη συνέχεια, ο κινητός κόμβος, ενώ κινείται εντός και εκτός του δικτύου, προσπαθεί συνεχώς να επιτύχει επικοινωνία μαζί με τον εξυπηρετητή.

Επιπρόσθετα, στα σενάρια χρησιμοποιούνται και σταθεροί κόμβοι που δεν στέλλουν πακέτα στον εξυπηρετητή. Ο λόγος ύπαρξής τους είναι η παρατήρηση της λειτουργίας του RPL αλγόριθμου δρομολόγησης και το πώς καταφέρνει ο κινητός κόμβος μέσω αυτών να επικοινωνήσει με τον εξυπηρετητή.

Στα πιο κάτω σενάρια γίνεται μια γενική ανάλυση του πως λειτουργεί το Neighbor Discovery πρωτόκολλο, αλλά και το RPL πρωτόκολλο.

6.2 Πρώτο Σενάριο

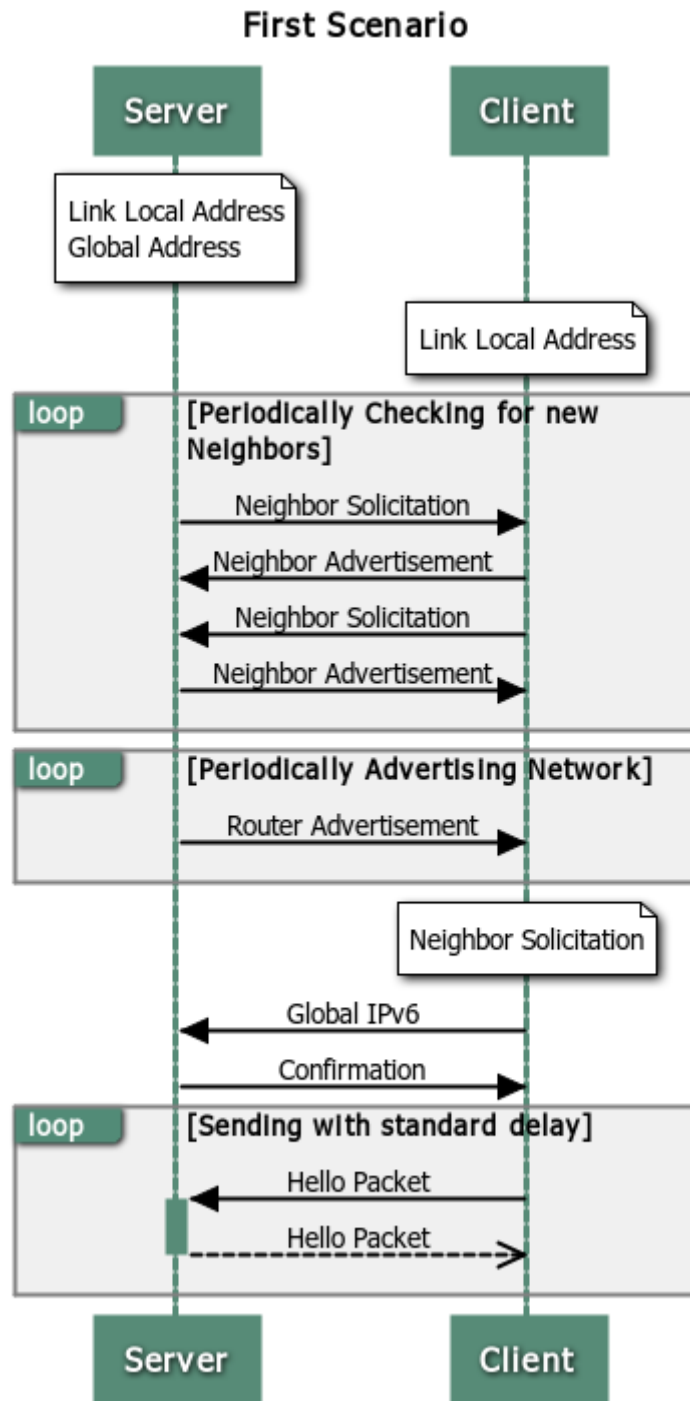
Το πρώτο σενάριο αποτελείται από ένα εξυπηρετητή και ένα σταθερό κόμβο που προσπαθεί να επικοινωνήσει με αυτόν. Αυτό το σενάριο (Σχήμα 6.1) χρησιμοποιείται για την επαλήθευση των λειτουργιών που χρειάστηκαν να αναπτυχθούν.



Σχήμα 6.1: Τοπολογία του Πρώτου Σεναρίου.

6.2.1 Ανάλυση

Αρχικά ο εξυπηρετητής δημιουργεί την δική του παγκόσμια διεύθυνση. Στη συνέχεια, στέλλει ανά τακτά χρονικά διαστήματα Router Advertisement πακέτα για να διαφημίσει την ύπαρξη του δικτύου.



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα Ροής Δεδομένων Πρώτου Σεναρίου

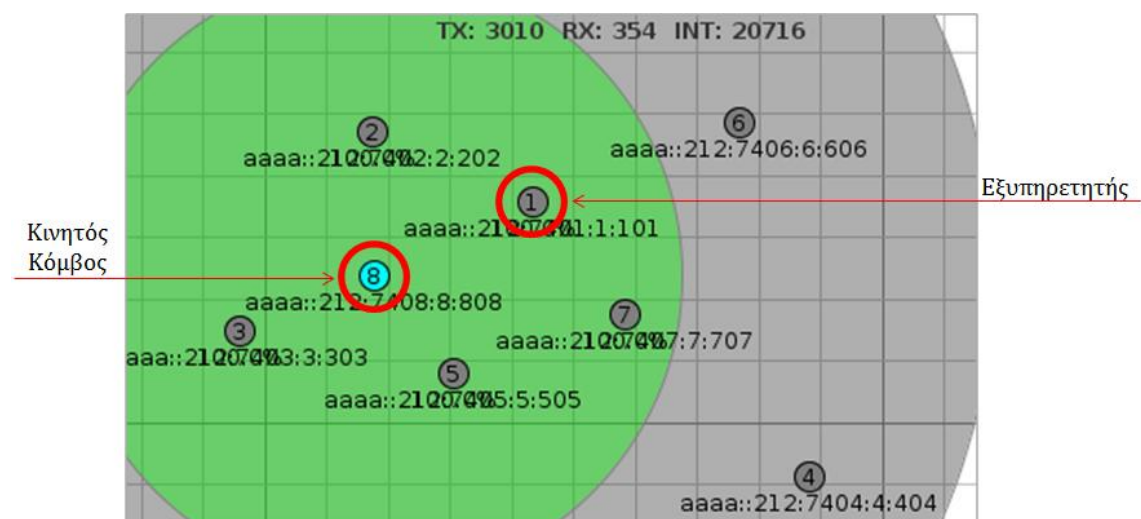
Ο κόμβος λαμβάνοντας αυτά τα μηνύματα προσπαθεί να δημιουργήσει τη δική του μοναδική παγκόσμια διεύθυνση. Έτσι, δημιουργώντας πιθανές παγκόσμιες διευθύνσεις στέλλει Neighbor Solicitation μηνύματα με σκοπό ανίχνευσης τυχόν κόμβου που ήδη έχει αυτή τη διεύθυνση. Δηλαδή, στέλλει αυτά τα μηνύματα με διεύθυνση προορισμού την διεύθυνση που στοχεύει να χρησιμοποιήσει. Αν λάβει Neighbor Advertisement σαν

απάντηση τότε δημιουργεί νέα παγκόσμια διεύθυνση και επαναλαμβάνει τη διαδικασία.

Συνεπώς, ο κόμβος εγγράφοντας, πλέον, την δική του μοναδική παγκόσμια διεύθυνση και προσθέτοντας τον εξυπηρετητή σαν γειτονικό κόμβο, αρχίζει η επιτυχημένη ανταλλαγή μηνυμάτων.

Σημειώνεται ότι ανά τακτά χρονικά διαστήματα παρατηρείται ανταλλαγή Neighbor Solicitation μηνυμάτων για επιβεβαίωση των ήδη υπάρχον αλλά και για την ανακάλυψη νέων γειτονικών κόμβων

6.3 Δεύτερο Σενάριο



Σχήμα 6.3: Τοπολογία του Δεύτερου Σεναρίου.

Το δεύτερο σενάριο αποτελείται από ένα εξυπηρετητή, ένα κινητό κόμβο και έξι σταθερούς κόμβους. Ο κινητός κόμβος βρίσκεται αρχικά εντός της εμβέλειας του δικτύου, δηλαδή εντός της εμβέλειας του εξυπηρετητή. Ο κόμβος αυτός δημιουργώντας την μοναδική παγκόσμια διεύθυνσή του, προσπαθεί συνεχώς να επικοινωνεί με τον εξυπηρετητή. Αυτό που εξετάζεται στο παρόν σενάριο είναι η λειτουργία του κόμβου καθώς κινείται, εξέρχεται και επανέρχεται της εμβέλειας του εξυπηρετητή. Δηλαδή, το πώς ο κόμβος καταφέρνει να εξασφαλίσει την επικοινωνία του με τον εξυπηρετητή. Η

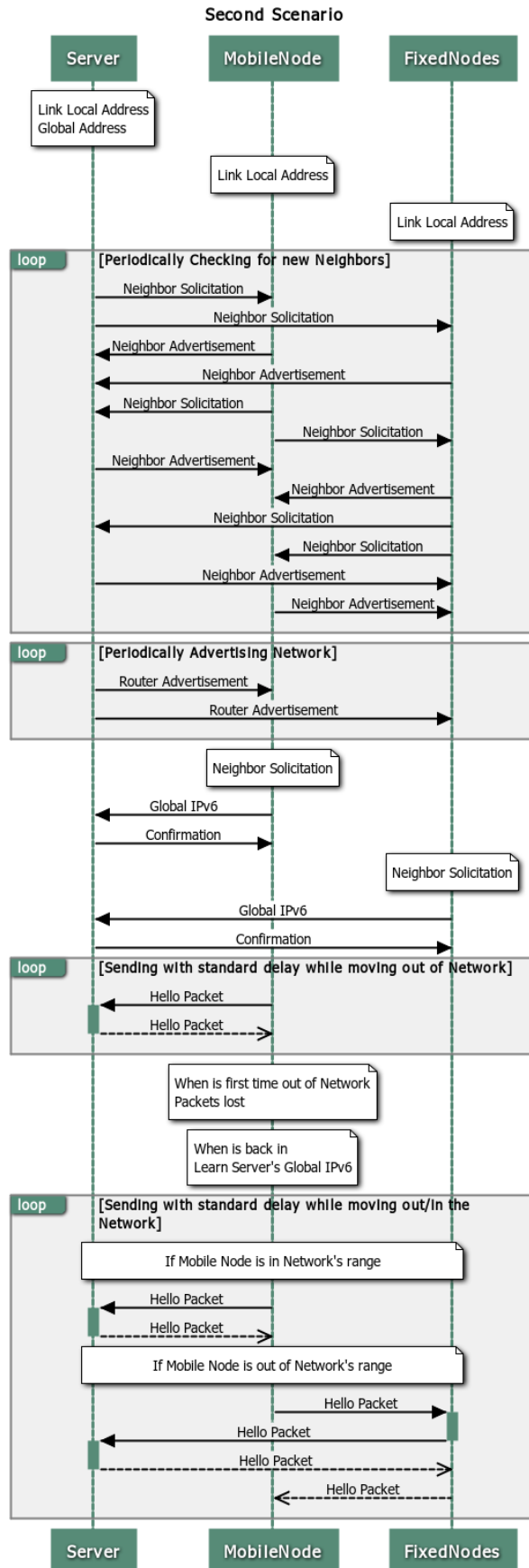
τοπολογία του δεύτερου σεναρίου σχεδιάστηκε όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, με τον κόμβο ένα να είναι ο εξυπηρετητής και τον κόμβο οκτώ ο κινητός κόμβος.

6.3.1 Ανάλυση

Με την εκκίνηση της προσομοίωσης όλοι οι κόμβοι δημιουργούν την δική τους τοπική διεύθυνση (link-local address). Στη συνέχεια, ο εξυπηρετητής αρχίζει να διαφημίζει το δίκτυο και όλοι οι κόμβοι στην εμβέλειά του δημιουργούν τη δική τους παγκόσμια διεύθυνση.

Ο κινητός κόμβος μετά την δημιουργία της δικής του παγκόσμιας διεύθυνσης και αφού αναγνώρισε τον εξυπηρετητή ως γειτονικό του κόμβο, αρχίζει την αποστολή πακέτων προς αυτόν. Σημειώνεται ότι, επειδή είναι εντός του δικτύου επικοινωνεί με τον εξυπηρετητή μέσω της τοπικής διεύθυνσης του. Έτσι, δεν γνωρίζει ακόμη την παγκόσμια διεύθυνση του εξυπηρετητή.

Συνεπώς, την πρώτη φορά που ο κινητός κόμβος εξέρχεται από την εμβέλεια του δικτύου, παρατηρούνται αρκετά χαμένα πακέτα. Ο λόγος είναι ότι ο κινητός κόμβος προσπαθεί να επικοινωνήσει μέσω της τοπικής διεύθυνσης του εξυπηρετητή, ενώ βρίσκεται εκτός του δικτύου. Όταν εισέρχεται ξανά στο δίκτυο, αναγνωρίζει την παγκόσμια διεύθυνση του εξυπηρετητή. Επομένως, με την ενδεχόμενη έξοδο του από το δίκτυο καταφέρνει να στέλλει τα πακέτα προς τον δρομολογητή μέσω της παγκόσμιας διεύθυνσής του (μέσω των γειτονικών του κόμβων).



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα Ροής Δεδομένων Δεύτερου Σεναρίου.

6.3.2 Μετρήσεις και Αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση του σεναρίου και του Neighbor Discovery πρωτοκόλλου, πάρθηκαν μετρήσεις και αξιολογήθηκε το ποσοστό των χαμένων πακέτων (packet lost) που παρατηρήθηκε. Οι μετρήσεις διαχωρίστηκαν στα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ταχύτητα κινητού κόμβου (μισό / ένα μέτρο ανά χιλιοστό δευτερολέπτου).
2. Ρυθμός μετάδοσης κινητού κόμβου (ανά δύο / πέντε / δέκα δευτερόλεπτα).

2 sec / 0.5m per ms				
Time (s)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
20	8	5	3	37.50
40	18	15	3	16.67
60	27	24	3	11.11
120	58	45	13	22.41
180	88	45	43	48.86
300	148	98	50	33.78

2 sec / 1m per ms				
Time (s)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
20	8	5	3	37.50
40	18	15	3	16.67
60	27	21	6	22.22
120	58	52	6	10.34
180	88	78	10	11.36
300	148	135	13	8.78

5 sec / 0.5m per ms				
Time (s)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
20	4	3	1	25.00
40	8	7	1	12.50
60	12	11	1	8.33
120	24	19	5	20.83
180	36	19	17	47.22
300	60	41	19	31.67

5 sec / 1m per ms				
Time (s)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
20	4	3	1	25.00
40	8	7	1	12.50
60	12	9	3	25.00
120	24	21	3	12.50
180	36	30	6	16.67
300	60	54	6	10.00

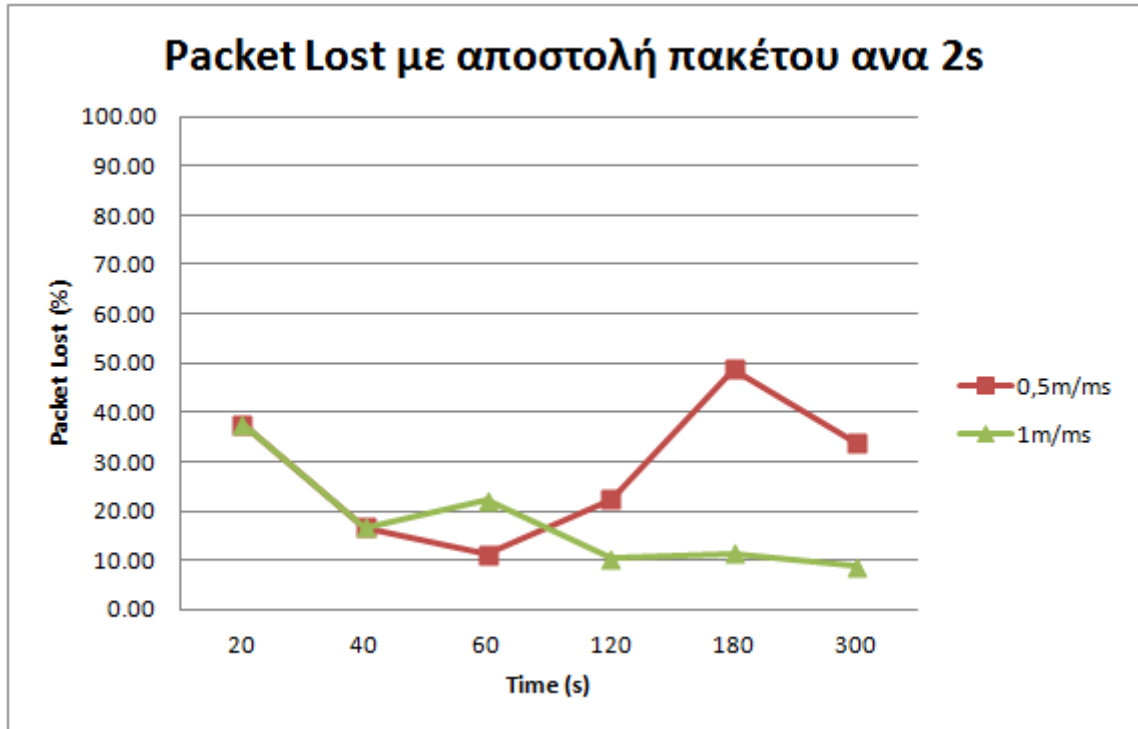
10 sec / 0.5m per ms				
Time (s)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
20	2	1	1	50.00
40	4	2	2	50.00
60	6	3	3	50.00
120	12	9	3	25.00
180	18	9	9	50.00
300	30	20	10	33.33

10 sec / 1m per ms				
Time (s)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
20	2	1	1	50.00
40	4	3	1	25.00
60	6	4	2	33.33
120	12	10	2	16.67
180	18	15	3	16.67
300	30	27	3	10.00

Σχήμα 6.5: Οι μετρήσεις που πάρθηκαν για το δεύτερο σενάριο.

Να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις αυτές (Σχήμα 6.5) είναι αποτέλεσμα πολλών επαναλήψεων του σεναρίου, με στόχο τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Για κάθε περίπτωση το σενάριο εκτελέστηκε αρκετές φορές και οι πιο πάνω μετρήσεις είναι ο μέσος όρος αυτών.

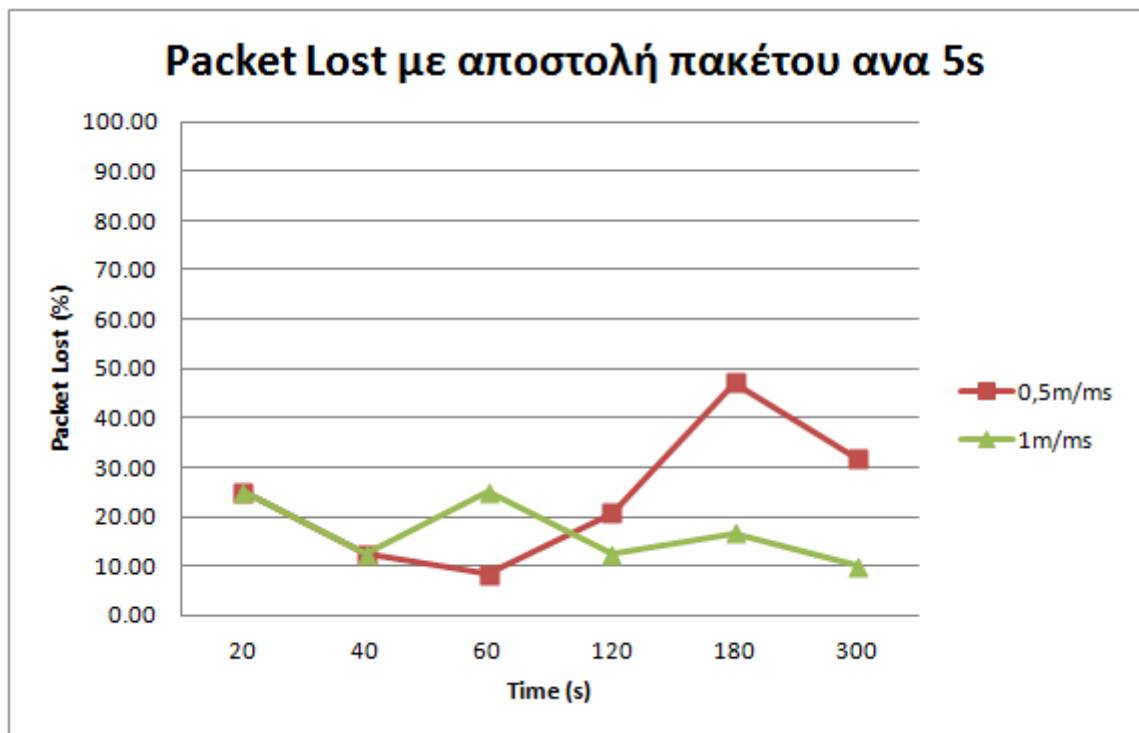
Επίσης, τα μεγάλα ποσοστά χαμένων πακέτων που παρατηρούνται είναι παραπλανητικά σε μερικές περιπτώσεις, αφού υπολογίζονται έχοντας υπόψη πολύ μικρό αριθμό πακέτων.



Σχήμα 6.6: Η γραφική παράσταση δείχνει το ποσοστό χαμένων πακέτων με ρυθμό αποστολής πακέτων ανά δύο δευτερόλεπτα.

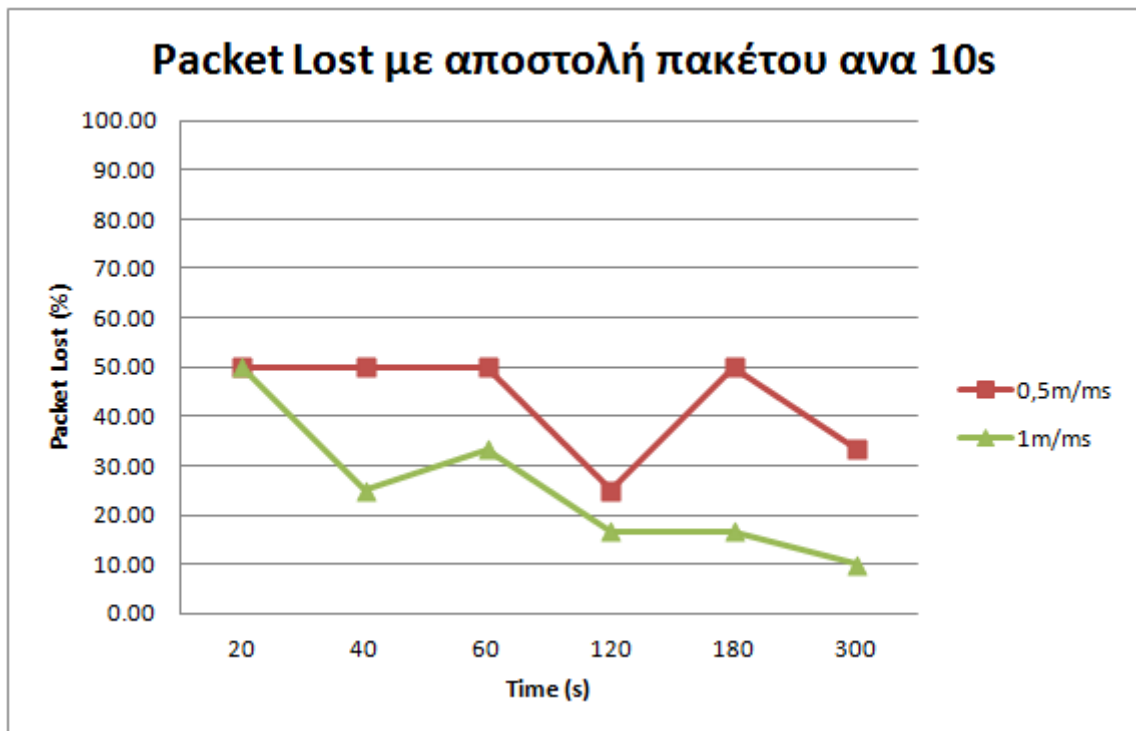
Στη πιο πάνω γραφική παράσταση (Σχήμα 6.6) παρουσιάζεται το ποσοστό χαμένων πακέτων που παρατηρήθηκε στη πάροδο πέντε λεπτών προσομοίωσης με αποστολή πακέτου ανά δύο δευτερόλεπτα. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει το σενάριο όπου ο κινητός κόμβος κινείται με μισό μέτρο ανά χιλιοστό δευτερολέπτου, ενώ η πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύει το σενάριο όπου ο κινητός κόμβος κινείται με τη διπλάσια ταχύτητα. Η άνοδος που παρουσιάζεται στο τρίτο λεπτό στη κόκκινη γραμμή και στο πρώτο λεπτό στη πράσινη γραμμή, οφείλεται στο ότι σε αυτή τη χρονική περίοδο ο κινητός κόμβος εξέρχεται για πρώτη φορά από το δίκτυο. Ο κινητός κόμβος, ενώ βρισκόταν εντός της εμβέλειας του δρομολογητή, επικοινωνούσε με αυτόν μέσω της τοπικής του διεύθυνσης. Έτσι, όταν εξέρχεται για πρώτη φορά από το δίκτυο παρατηρείται αυτή η μεγάλη άνοδος των χαμένων πακέτων. Όταν ξαναέλθει εντός του

δικτύου αναγνωρίζει πλέον τον δρομολογητή και με την παγκόσμια διεύθυνση του. Έτσι, στη συνέχεια τα χαμένα πακέτα που παρατηρούνται είναι μηδαμινά.



Σχήμα 6.7: Η γραφική παράσταση δείχνει το ποσοστό χαμένων πακέτων με ρυθμό αποστολής πακέτων ανά πέντε δευτερόλεπτα.

Στη πιο πάνω γραφική παράσταση (Σχήμα 6.7) παρουσιάζεται το ποσοστό χαμένων πακέτων που παρατηρήθηκε στη πάροδο πέντε λεπτών προσομοίωσης με αποστολή πακέτου ανά πέντε δευτερόλεπτα. Όπως και πιο πάνω (Σχήμα 6.6), παρατηρείται άνοδος στο τρίτο λεπτό στη κόκκινη γραμμή και στο πρώτο λεπτό στη πράσινη γραμμή και οφείλεται στο ότι σε αυτή τη χρονική περίοδο ο κινητός κόμβος εξέρχεται για πρώτη φορά από το δίκτυο. Ο λόγος που παρουσιάζονται οι πιο πάνω ενδείξεις αναλύονται πιο πάνω.



Σχήμα 6.8: Η γραφική παράσταση δείχνει το ποσοστό χαμένων πακέτων με ρυθμό αποστολής πακέτων ανά δέκα δευτερόλεπτα.

Στη πιο πάνω γραφική παράσταση (Σχήμα 6.8) παρουσιάζεται το ποσοστό χαμένων πακέτων που παρατηρήθηκε στη πάροδο πέντε λεπτών προσομοίωσης με αποστολή πακέτου ανά δέκα δευτερόλεπτα. Όπως και πιο πάνω (Σχήμα 6.6 και Σχήμα 6.7), παρατηρείται άνοδος στο τρίτο λεπτό στη κόκκινη γραμμή και στο πρώτο λεπτό στη πράσινη γραμμή και οφείλεται στο ότι σε αυτή τη χρονική περίοδο ο κινητός κόμβος εξέρχεται για πρώτη φορά από το δίκτυο.

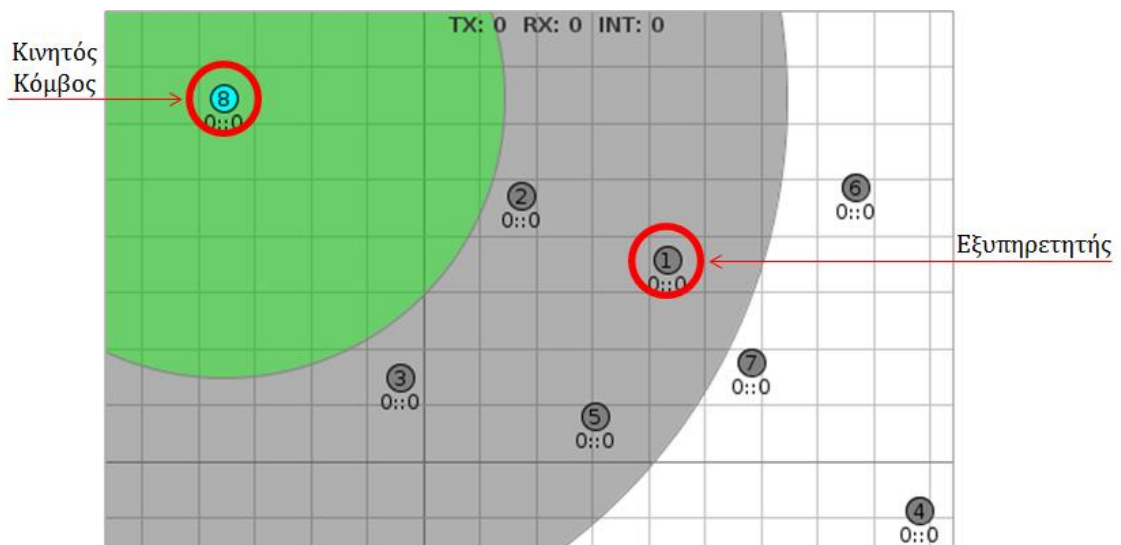
Η πιο πάνω γραφική παράσταση μπορεί να θεωρηθεί παραπλανητική, αφού το ποσοστό χαμένων πακέτων παρουσιάζεται αρκετά ψηλό. Οι μετρήσεις πάρθηκαν σε περίοδο πέντε λεπτών και ο κινητός κόμβος στέλλει πακέτα κάθε δέκα δευτερόλεπτα. Συνεπώς, είναι απολύτως φυσιολογικό να παρουσιάζεται η πιο πάνω γραφική παράσταση. Για παράδειγμα, σε είκοσι δευτερόλεπτα έχουν σταλεί μόλις δύο πακέτα και το ένα χάθηκε, έτσι εμφανίζεται το ποσοστό του πενήντα τις εκατό.

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι όταν η κίνηση του κόμβου ξεκινά εντός του δικτύου επηρεάζει αρνητικά τον κόμβο όταν εξέλθει για πρώτη φορά από το δίκτυο. Ο λόγος

είναι ότι, ενώ αρχικά μηδαμινός αριθμός πακέτων χάνονται λόγω του ότι ο κινητός κόμβος προωθεί τα πακέτα του στον εξυπηρετητή μέσω της τοπικής του διεύθυνσης, όταν εξέρχεται του δικτύου δεν γνωρίζει την παγκόσμια διεύθυνση του εξυπηρετητή. Αποτέλεσμα αυτού, ενώ υπάρχουν γειτονικοί του κόμβοι που μπορούν να προωθήσουν τα πακέτα στον εξυπηρετητή, τα πακέτα χάνονται αφού στέλλονται με προορισμό την τοπική διεύθυνση του εξυπηρετητή.

6.4 Τρίτο Σενάριο

Το τρίτο σενάριο αποτελείται από ένα εξυπηρετητή, ένα κινητό κόμβο και έξι σταθερούς κόμβους. Ο κινητός κόμβος, σε αυτό το σενάριο, ξεκινά τη λειτουργία του εκτός εμβέλειας του δικτύου με λογικό επακόλουθο να μην έχει παγκόσμια διεύθυνση. Αυτό που εξετάζεται στο παρόν σενάριο είναι η λειτουργία του κόμβου καθώς κινείται και εισέρχεται στην εμβέλεια του εξυπηρετητή. Δηλαδή, το πώς ο κόμβος καταφέρνει να εξασφαλίσει την επικοινωνία του με τον εξυπηρετητή χωρίς την παρουσία παγκόσμιας διεύθυνσης, αλλά και την δημιουργία παγκόσμιας διεύθυνσης κατά την προσπάθεια εισόδου του στο δίκτυο. Η τοπολογία του τρίτου σεναρίου σχεδιάστηκε όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9, με τον κόμβο ένα να είναι ο εξυπηρετητής και τον κόμβο οκτώ ο κινητός κόμβος.



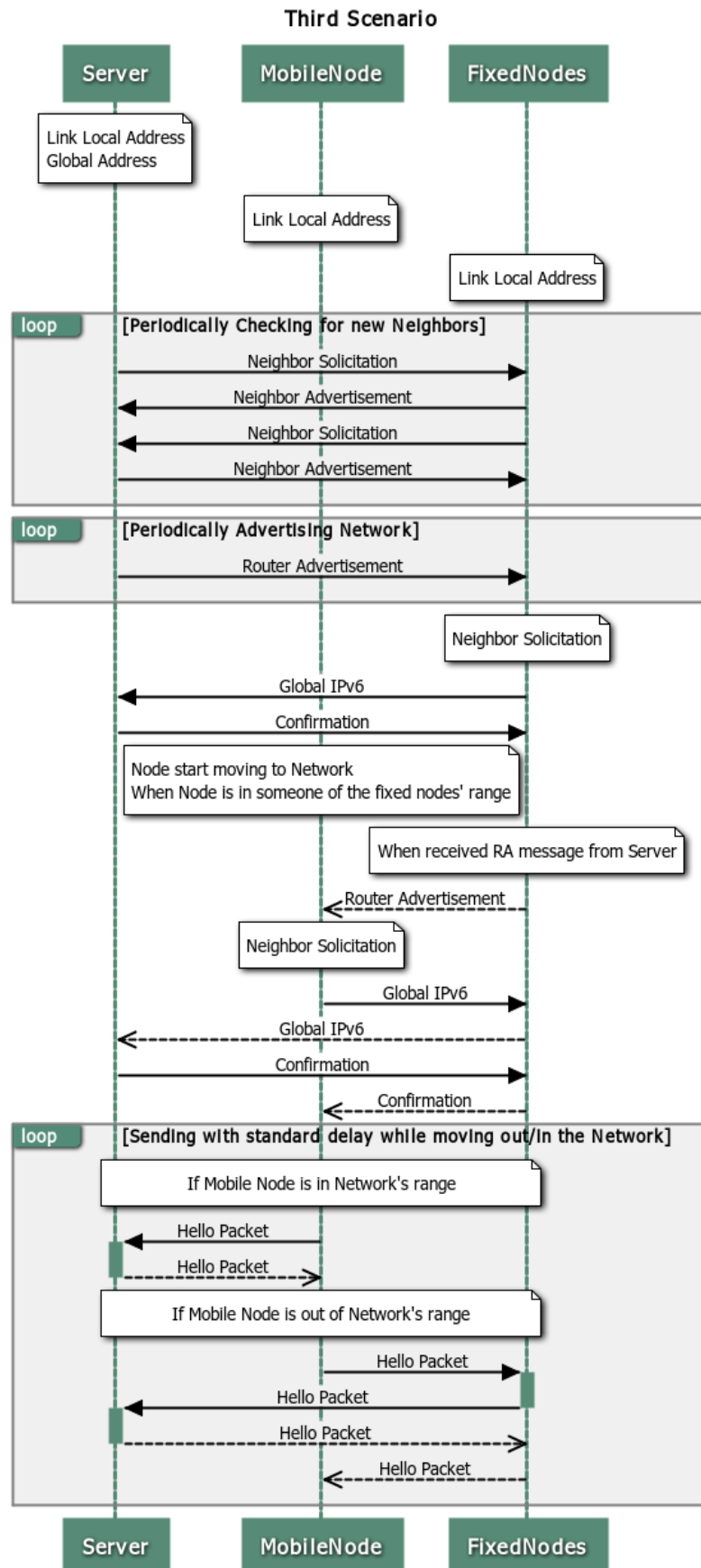
Σχήμα 6.9: Τοπολογία του Τρίτου Σεναρίου.

6.4.1 Ανάλυση

Με την εκκίνηση της προσομοίωσης όλοι οι κόμβοι δημιουργούν την δική τους τοπική διεύθυνση. Στη συνέχεια, ο εξυπηρετητής αρχίζει να διαφημίζει το δίκτυο και όλοι οι κόμβοι στην εμβέλειά του δημιουργούν τη δική τους παγκόσμια διεύθυνση.

Ο κινητός κόμβος βρίσκεται εκτός της εμβέλειας οποιουδήποτε κόμβου και δημιουργεί τη δική του τοπική διεύθυνση. Κατά την κίνησή του, εισέρχεται στην εμβέλεια κόμβου που είναι εντός του δικτύου. Στη περίπτωση που ο εξυπηρετητής διαφημίσει το δίκτυό του, το μήνυμα καταφθάνει στον κινητό κόμβο μέσω του σταθερού κόμβου που βρίσκεται εντός του δικτύου. Ο λόγος είναι ότι οι διαφημίσεις του εξυπηρετητή ακολουθούν μοντέλο πλημύρας. Δηλαδή ο εξυπηρετητής στέλλει το πακέτο στους γειτονικούς του κόμβους και αυτή με τη σειρά τους προωθούν το πακέτο στους δικούς τους γειτονικούς κόμβους.

Συνεπώς, με την παραλαβή του διαφημιστικού πακέτου από τον κινητό κόμβο, ο κόμβος αυτός δημιουργεί τη δική του μοναδική παγκόσμια διεύθυνση μέσω του προθέματος του δικτύου. Επομένως, η επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον εξυπηρετητή καθίσταται δυνατή, είτε μέσω του σταθερού κόμβου αρχικά, είτε απευθείας όταν εισέλθει εντελώς του δικτύου και αναγνωρίσει τον εξυπηρετητή ως γειτονικό του κόμβο.



Σχήμα 6.10: Διάγραμμα Ροής Δεδομένων Τρίτου Σεναρίου.

6.4.2 Μετρήσεις και Αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση του σεναρίου και του Neighbor Discovery πρωτοκόλλου, πάρθηκαν μετρήσεις και αξιολογήθηκε το ποσοστό των χαμένων πακέτων (packet lost) που παρατηρήθηκε. Οι μετρήσεις διαχωρίστηκαν στα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ταχύτητα κινητού κόμβου (μισό / ένα μέτρο ανά χιλιοστό δευτερολέπτου).
2. Ρυθμός μετάδοσης κινητού κόμβου (ανά δύο / πέντε / δέκα δευτερόλεπτα).

Να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις αυτές (Σχήμα 6.11) είναι αποτέλεσμα πολλών επαναλήψεων του σεναρίου, με στόχο τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Για κάθε περίπτωση το σενάριο εκτελέστηκε αρκετές φορές και οι πιο πάνω μετρήσεις είναι ο μέσος όρος αυτών.

2 sec / 0.5m per ms				
Time (m)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
2	35	35	0	0.00
3	65	39	26	40.00
5	125	81	44	35.20
8	215	162	53	24.65
10	275	213	62	22.55

2 sec / 1m per ms				
Time (m)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
2	35	17	18	51.43
3	65	39	26	40.00
5	125	93	32	25.60
8	215	169	46	21.40
10	275	217	58	21.09

5 sec / 0.5m per ms				
Time (m)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
2	14	14	0	0.00
3	26	23	3	11.54
5	50	38	12	24.00
8	86	65	21	24.42
10	110	85	25	22.73

5 sec / 1m per ms				
Time (m)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
2	14	5	9	64.29
3	26	13	13	50.00
5	50	33	17	34.00
8	86	61	25	29.07
10	110	80	30	27.27

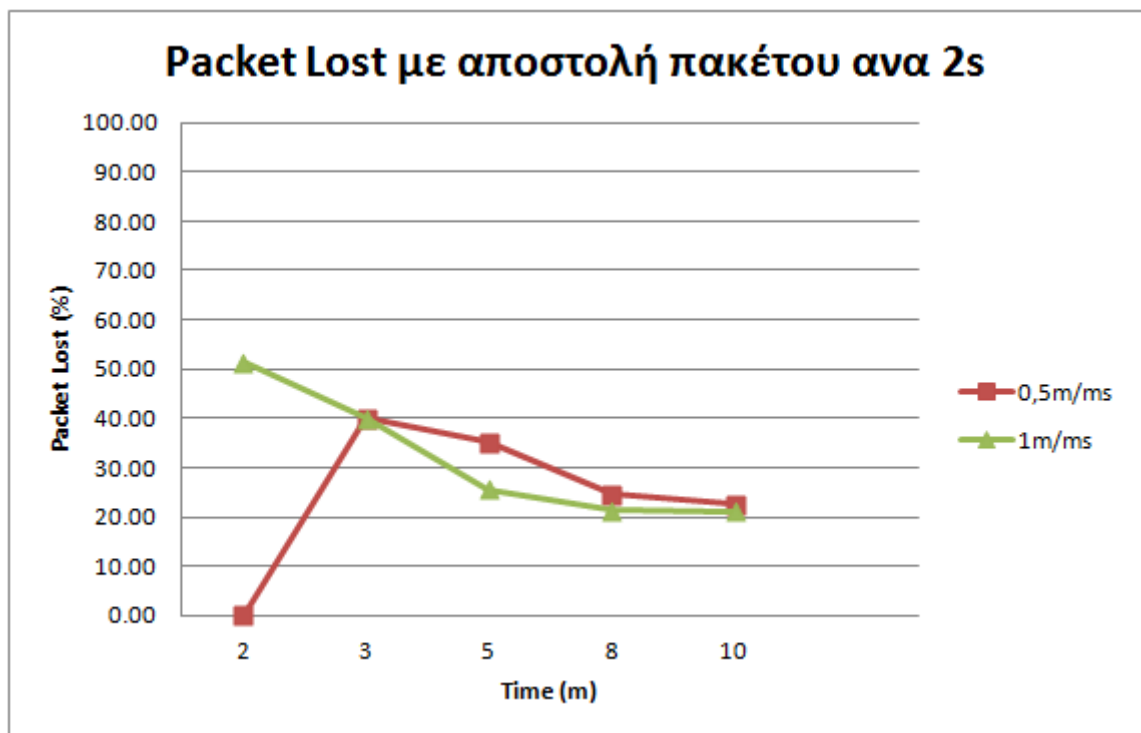
10 sec / 0.5m per ms				
Time (m)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
2	8	8	0	0.00
3	14	13	1	7.14
5	26	23	3	11.54
8	44	39	5	11.36
10	56	49	7	12.50

10 sec / 1m per ms				
Time (m)	Packets	Gets	Lost	Rate (%)
2	8	7	1	12.50
3	14	12	2	14.29
5	26	23	3	11.54
8	44	38	6	13.64
10	56	49	7	12.50

Σχήμα 6.11: Οι μετρήσεις που πάρθηκαν για το τρίτο σενάριο.

Επίσης, τα μεγάλα ποσοστά χαμένων πακέτων που παρατηρούνται είναι παραπλανητικά σε μερικές περιπτώσεις και οι λόγοι αναφέρονται στις αναλύσεις των αντίστοιχων γραφικών παραστάσεων.

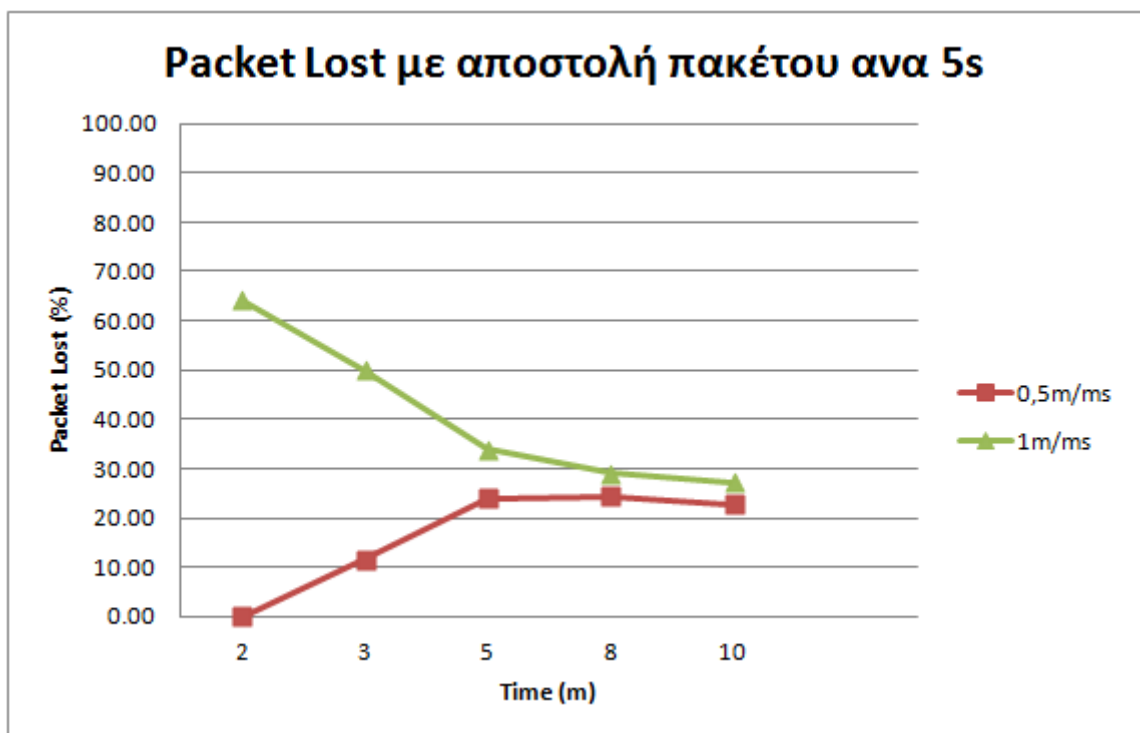
Στη γραφική παράσταση που παραδίνεται πιο κάτω (Σχήμα 6.12) παρουσιάζεται το ποσοστό χαμένων πακέτων που παρατηρήθηκε στη πάροδο δέκα λεπτών προσομοίωσης με αποστολή πακέτου ανά δύο δευτερόλεπτα. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει το σενάριο όπου ο κινητός κόμβος κινείται με μισό μέτρο ανά χιλιοστό δευτερολέπτου, ενώ η πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύει το σενάριο όπου ο κινητός κόμβος κινείται με τη διπλάσια ταχύτητα. Η άνοδος που παρουσιάζεται στο τρίτο λεπτό στη κόκκινη γραμμή και στο δεύτερο λεπτό στη πράσινη γραμμή, οφείλεται στο ότι σε αυτή τη χρονική περίοδο ο κινητός κόμβος εξέρχεται εντελώς του δικτύου (δεν υπάρχει στην εμβέλεια του κανένας κόμβος που ανήκει σε αυτό το δίκτυο). Στη περίπτωση της πράσινης γραμμής, ο κινητός κόμβος κατά την προσομοίωση στο δεύτερο λεπτό ήδη εισήλθε και εξήλθε της εμβέλειας του δικτύου. Συνεπώς, παρουσιάζεται αυτή η μεγάλη και παραπλανητική αύξηση των χαμένων πακέτων.



Σχήμα 6.12: Η γραφική παράσταση δείχνει το ποσοστό χαμένων πακέτων με ρυθμό αποστολής πακέτων ανά δύο δευτερόλεπτα.

Στη γραφική παράσταση που παρατίθεται πιο κάτω (Σχήμα 6.13) παρουσιάζεται το ποσοστό χαμένων πακέτων που παρατηρήθηκε στη πάροδο δέκα λεπτών προσομοίωσης

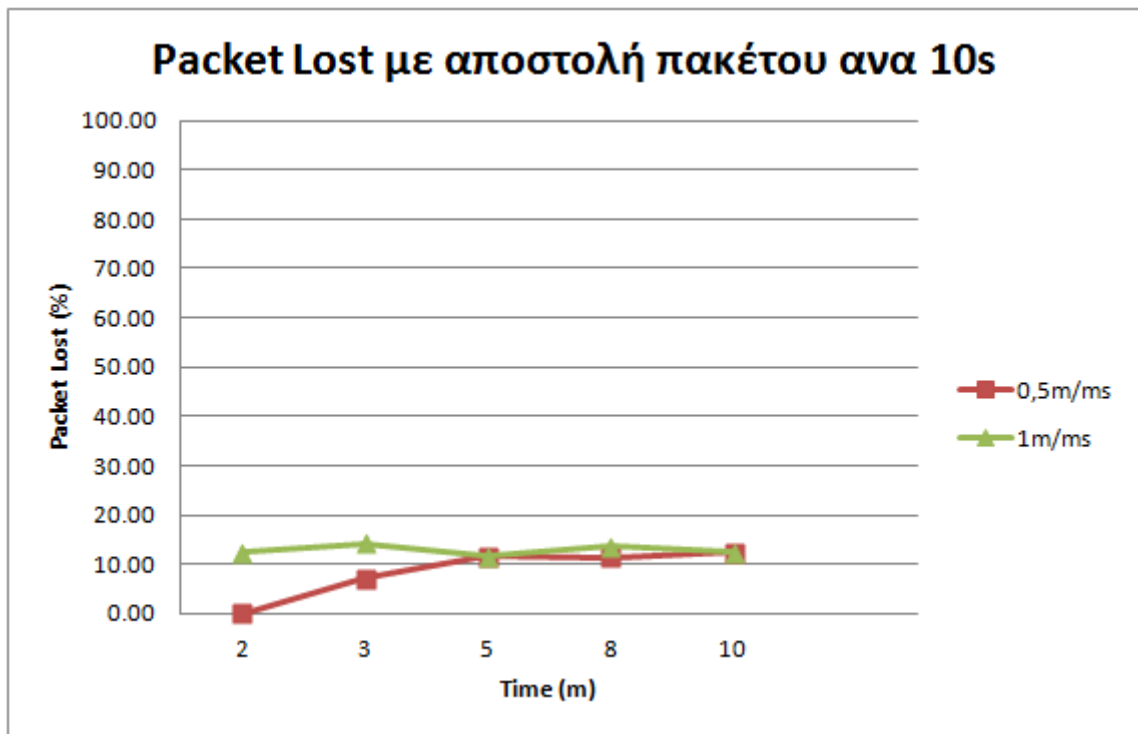
με αποστολή πακέτου ανά πέντε δευτερόλεπτα. Παρατηρείται άνοδος στο πέμπτο λεπτό στη κόκκινη γραμμή και στο δεύτερο λεπτό στη πράσινη γραμμή και οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, στο ότι σε αυτή τη χρονική περίοδο ο κινητός κόμβος εξέρχεται εντελώς του δικτύου (δεν υπάρχει στην εμβέλεια του κανένας κόμβος που ανήκει σε αυτό το δίκτυο). Όταν ο κινητός κόμβος είναι σε κάποιο χρονικό σημείο στην εμβέλεια ενός σταθερού κόμβου που είναι εντός του δικτύου, τότε τα πακέτα του προωθούνται επιτυχώς στον εξυπηρετητή. Έτσι, παρουσιάζεται η συνεχής μείωση του ποσοστού των χαμένων πακέτων.



Σχήμα 6.13: Η γραφική παράσταση δείχνει το ποσοστό χαμένων πακέτων με ρυθμό αποστολής πακέτων ανά πέντε δευτερόλεπτα.

Στη γραφική παράσταση που παρατίθεται πιο κάτω (Σχήμα 6.14) παρουσιάζεται το ποσοστό χαμένων πακέτων που παρατηρήθηκε στη πάροδο δέκα λεπτών προσομοίωσης με αποστολή πακέτου ανά δέκα δευτερόλεπτα. Όπως και πιο πάνω (Σχήμα 6.13), παρατηρείται άνοδος στο πέμπτο λεπτό στη κόκκινη γραμμή και στο πρώτο λεπτό στη πράσινη γραμμή και οφείλεται στο ότι σε αυτή τη χρονική περίοδο ο κινητός κόμβος εξέρχεται εντελώς του δικτύου (δεν υπάρχει στην εμβέλεια του κανένας κόμβος που ανήκει σε αυτό το δίκτυο).

Ο λόγος που αυτή η γραφική παράσταση φαίνεται, θεωρητικά, πιο ορθή (χαμηλό ποσοστό χαμένων πακέτων) είναι ο χαμηλός ρυθμός αποστολής πακέτων. Έτσι, όταν ο κόμβος εξέρχεται εντελώς του δικτύου μηδαμινά πακέτα στέλλονται (όσα πακέτα στέλλονται χάνονται αφού δεν υπάρχει ούτε κόμβος να τα προωθήσει) σε σχέση με τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν πιο πάνω.



Σχήμα 6.14: Η γραφική παράσταση δείχνει το ποσοστό χαμένων πακέτων με ρυθμό αποστολής πακέτων ανά δέκα δευτερόλεπτα.

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι όταν η κίνηση του κόμβου ξεκινώντας εκτός δικτύου είναι πολύ πιο αποτελεσματική από το προηγούμενο σενάριο. Ο λόγος είναι ότι, λαμβάνοντας τα πακέτα από κάποιο γειτονικό κόμβο, όπου ο εξυπηρετητής έστειλε για να διαφημίσει το δίκτυό του, ο κινητός κόμβος δημιουργεί την παγκόσμια διεύθυνσή του και γνωρίζει τον εξυπηρετητή με την παγκόσμια διεύθυνσή του. Αποτέλεσμα αυτού, ο κινητός κόμβος είτε είναι εντός του δικτύου είτε όχι προωθεί τα πακέτα του μέσω της παγκόσμιας διεύθυνσης του εξυπηρετητή και προωθούνται είτε απευθείας, είτε μέσω γειτονικών κόμβων. Έτσι σε αυτό το σενάριο τα περισσότερα χαμένα πακέτα οφείλονται σε περιόδους όπου ο κινητός κόμβος δεν έχει καμία επαφή με το δίκτυο.

Κεφάλαιο 7

Γενικά Συμπεράσματα

7.1 Γενικά Συμπεράσματα	59
7.2 Προτεινόμενη Λύση	60

7.1 Γενικά Συμπεράσματα

Με το πέρας της παρούσας πτυχιακής εργασίας εξάρθηκαν κάποια γενικά συμπεράσματα που αξίζει να ληφθούν υπόψη σε μετέπειτα έρευνες που θα αφορούν αυτό τον τομέα.

Ένας από τους κύριους στόχους της έρευνας ήταν η παρατήρηση της συμπεριφοράς του κινητού κόμβου κατά την κίνησή του και ο έλεγχος ύπαρξης της επικοινωνίας μεταξύ κινητού κόμβου και εξυπηρετητή ακόμη και αν ο πρώτος κινείται εκτός της εμβέλειας του δεύτερου. Στο δεύτερο σενάριο (Υποκεφάλαιο 6.3), όπου ο κινητός κόμβος ξεκινά τη λειτουργία του εντός εμβέλειας του εξυπηρετητή, παρατηρήθηκε πρόβλημα κατά την έξοδό του από την εμβέλεια του εξυπηρετητή. Αυτό, όπως διαπιστώθηκε και στην ανάλυση του σεναρίου (Υποκεφάλαιο 6.3.1), οφείλεται στο ότι ο κινητός κόμβος αναγνώριζε αρχικά τον εξυπηρετητή με την τοπική του διεύθυνση. Έτσι, όταν εξέρχεται της εμβέλειας του εξυπηρετητή δεν μπορεί να επικοινωνήσει μαζί του, ακόμη και αν υπάρχει ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ των δύο που μπορεί να προωθήσει το μήνυμα. Στο τρίτο σενάριο (Υποκεφάλαιο 6.4), όπου η διαφορά με το δεύτερο σενάριο είναι ότι ο κινητός κόμβος ξεκινά τη λειτουργία του εντελώς απομονωμένος, παρατηρείται κάτι αξιοσημείωτο. Ο κινητός κόμβος, κατά την κίνησή του προς τον εξυπηρετητή, τυγχάνει

να εισέρχεται στην εμβέλεια ενός άλλου κόμβου που είναι ήδη μέρος του δικτύου. Αυτός ο κόμβος, λαμβάνοντας τα πακέτα διαφήμισης του δικτύου από τον εξυπηρετητή τα προωθεί στους γειτονικούς του κόμβους. Αφού ο κινητός κόμβος είναι ένας από αυτούς, λαμβάνοντας το πακέτο, δημιουργεί τη δική του μοναδική παγκόσμια διεύθυνση και αναγνωρίζει τον εξυπηρετητή με την παγκόσμια του διεύθυνση. Συνεπώς, προσπαθώντας να επικοινωνήσει με τον εξυπηρετητή, αυτό επιτυγχάνεται μέσω του ενδιάμεσου κόμβου. Όταν στην συνέχεια ο εξυπηρετητής αναγνωριστεί ως γειτονικός κόμβος του κινητού κόμβου, τα πακέτα προωθούνται απευθείας από τον ίδιο.

Συμπερασματικά, με βάση την πειραματική μελέτη που έγινε, το τρίτο σενάριο φαίνεται αρκετά πιο βελτιωμένο και προτιμάται του δεύτερου. Ουσιαστικά, στο τρίτο σενάριο είναι εμφανείς η δυνατότητα του Neighbor Discovery πρωτοκόλλου που μέσω των γειτονικών κόμβων, αλλά και των μηνυμάτων διαφήμισης και ανεύρεσης γειτονικών κόμβων καθίσταται δυνατή η επικοινωνία μεταξύ κινητού κόμβου και εξυπηρετητή.

7.2 Προτεινόμενη Λύση

Τα 6LoWPAN δίκτυα (Υποκεφάλαιο 4.6.1.1) έχουν πολλές ευαισθησίες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον σχεδιασμό του 6LoWPAN Neighbor Discovery πρωτοκόλλου. Στη πειραματική μελέτη που διεξάχθηκε, φάνηκε ότι τα IPv6 Neighbor Discovery μηνύματα που χρησιμοποιούνται στα σενάρια που δημιουργήθηκαν, είναι χρονοβόρα και θεωρητικά είναι «βαριά» πακέτα για τους κόμβους αισθητήρων.

Με βάση τα πιο πάνω, στην παρούσα πτυχιακή εργασία προτείνεται η ανάπτυξη μιας ελαφριάς έκδοσης του 6LoWPAN Neighbor Discovery πρωτοκόλλου. Πιο αναλυτικά, τα περιοδικά μηνύματα που στέλλει ο εξυπηρετητής να αποτελούνται από τον τύπο τους (ότι είναι Router Advertisement μηνύματα), το πρόθεμα του δικτύου και τη διεύθυνση του εξυπηρετητή. Επίσης, σημαντικό είναι να μην παραληφτεί ο μηχανισμός εξεύρεσης διπλής παγκόσμιας διεύθυνσης.

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας, πάρθηκε η πρωτοβουλία υλοποίησης της πιο πάνω πρότασης σε πειραματικό στάδιο. Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν όμως, δεν κατέστησαν δυνατή την παρουσία μιας ολοκληρωμένης λύσης. Μεταξύ άλλων, παρουσιάστηκε δυσκολία προσαρμογής των μηνυμάτων που λαμβάνει ο κόμβος από το πακέτο (buffer) που στέλλεται από τον εξυπηρετητή και η μετατροπή των αλφαριθμητικών λέξεων σε κατάλληλη μορφή για τη δημιουργία παγκόσμιας διεύθυνσης. Επιπρόσθετα, οι απλοί κόμβοι είναι σχεδιασμένοι να λαμβάνουν απλά μηνύματα χωρίς να γνωρίζουν περαιτέρω λεπτομέρειες για το πακέτο. Αυτό δυσκόλεψε την παρούσα ιδέα, όσον αφορά το να γνωρίζει τη διεύθυνση του αποστολέα και αν αυτός είναι ο εξυπηρετητής να τον αναγνωρίζει με τη διεύθυνση αυτή.

Κεφάλαιο 8

Μελλοντική Εργασία

8.1 Πειραματισμός Παρούσας Εργασίας σε Test bench	62
8.2 Πειραματισμός Αλλαγής Δικτύου σε Test bench	62
8.3 Ανάπτυξη Αποτελεσματικού 6LoWPAN Neighbor Discovery	63

8.1 Πειραματισμός Παρούσας Εργασίας σε Test bench

Με βάση την παρούσα εργασία, προτείνεται η ανάπτυξη των σεναρίων που εξετάστηκαν σε Test bench περιβάλλον. Πιο αναλυτικά, προτείνεται η έρευνα και ανάλυση της συμπεριφοράς και των λειτουργιών που γίνονται μέσω του Neighbor Discovery πρωτοκόλλου με πραγματικούς κόμβους αισθητήρων.

Στόχος είναι η εξαγωγή πραγματικών αποτελεσμάτων, αλλά και η απαλοιφή σφαλμάτων όσον αφορά λειτουργίες που στην προσομοίωση δίνονται χειροκίνητα (όπως για παράδειγμα η διεύθυνση του εξυπηρετητή).

8.2 Πειραματισμός Αλλαγής Δικτύου σε Test bench

Μια άλλη ενδιαφέρουσα πτυχή του πως λειτουργεί το Neighbor Discovery πρωτόκολλο, αλλά και τα δίκτυα αισθητήρων είναι η μετακίνηση του δικτύου σε ένα νέο δίκτυο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1: Η μετακίνηση του κόμβου από το ένα δίκτυο αισθητήρων σε ένα γειτονικό.

Με βάση το ότι ο κινητός κόμβος ξεκίνησε τη λειτουργία του σε ένα δίκτυο (οι λειτουργίες του αναλύονται στη παρούσα πτυχιακή εργασία) έχει δημιουργήσει μια παγκόσμια διεύθυνση. Στη συνέχεια, ο κόμβος αυτός εξέρχεται του δικτύου και εισέρχεται και σε κάποια χρονική στιγμή εισέρχεται σε ένα νέο δίκτυο. Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν δύο περιπτώσεις που πρέπει να εξετασθούν. Πρώτη περίπτωση είναι, ο κόμβος να εισέρχεται στο νέο δίκτυο και να διατηρεί την παγκόσμια διεύθυνση που είχε δημιουργήσει στο home δίκτυο του. Η δεύτερη περίπτωση είναι, η παγκόσμια διεύθυνση του κόμβου να λήξει πριν την είσοδο του στο νέο δίκτυο.

Είναι ενδιαφέρον να εξεταστεί η συμπεριφορά των κινητών κόμβων, των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται, αλλά και η συμπεριφορά των εξυπηρετητών των δύο δικτύων. Για παράδειγμα, στη δεύτερη περίπτωση ο κινητός κόμβος ενώ έχει λήξει η προηγούμενη παγκόσμια διεύθυνσή του θα μπορεί να δημιουργήσει νέα παγκόσμια διεύθυνση βασισμένος στα πακέτα που θα λάβει από τον νέο εξυπηρετητή, αλλά ο προηγούμενος εξυπηρετητής έχει καταχωρημένο τον συγκεκριμένο κόμβο με την προηγούμενη του παγκόσμια διεύθυνση.

8.3 Ανάπτυξη Αποτελεσματικού 6LoWPAN Neighbor Discovery

Πολλοί φοιτητές και ερευνητές προσπαθούν να αναπτύξουν λειτουργίες του 6LoWPAN Neighbor Discovery στο λειτουργικό σύστημα Contiki, το οποίο έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που πρέπει να προσεχθούν. Μια αποτελεσματική λύση στη δημιουργία

ενός αρχικού πρωτοκόλλου που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις των 6LoWPAN δικτύων, είναι η αναλυτική έρευνα και εκμετάλλευση όλων των πόρων που μπορούν να παρθούν από τους Contiki προγραμματιστές και τις διάφορες εργασίες που εκπονήθηκαν.

Με βάση πολλές ηλεκτρονικές συνομιλίες, παρατηρήθηκε ότι αρκετοί προγραμματιστές προσπαθούν να λύσουν το ίδιο πρόβλημα, φτάνοντας στα ίδια προβλήματα και πολλές φορές προτείνονται πολλαπλές λύσεις για ένα πρόβλημα. Στόχος αυτής της έρευνας είναι να εξετάσει πιο αναλυτικά τα πιο πάνω και να δημιουργηθεί ένα αρχικό 6LoWPAN Neighbor Discovery αρχείο, ευρέως αποδεκτό, το οποίο στη συνέχεια θα ενισχυθεί με την συμβολή όλων των συμμετασχόντων.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Dunkels, B. Grönvall and T. Voigt, “Contiki – a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors”, *Proceedings of the First IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (Emnets-I)*, Tampa, Florida, USA, November 2004.
- [2] Arch Rock Corporation, “IP-based Wireless Sensor Networking: Secure, Reliable, Low-Power IP connectivity for IEEE 802.15.4 Networks”, *Arch Rock Corporation*, San Francisco, 2007.
- [3] D. Thaler, M. Talwar, and C. Patel, “Neighbor Discovery Proxies (ND Proxy)”, *RFC 4389, Internet Engineering Task Force*, April 2006.
- [4] F. Österlind, *Using COOJA for Contiki development*, Swedish Institute of Computer Science, April 2011.
- [5] H. Karl and A. Willing, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, 1st edition, June 2005.
- [6] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagöz, “MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey”, *IEEE Communications Magazine*, 2006
- [7] J. Martocci, P. De Mil, N. Riou and W. Vermeylen, “Building Automation Routing Requirements in Low Power and Lossy Networks”, *RFC 5867, Internet Engineering Task Force*, June 2010.

- [8] K. D. Korte, I. Tumar and J. Schönwälder, “Evaluation of IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks Implementations”, *IEEE 34th Conference on Local Computer Networks Lcn*, October 2009.
- [9] L. M. Ara, “Neighbor Discovery Proxy-Gateway for 6LoWPAN-based Wireless Sensor Networks”, Master’s Thesis, KTH Royal Institute of Technology, School of Information and Communication Technology, Stockholm, December 2011.
- [10] M. Harvan, “Connecting Wireless Sensor Networks to the Internet – a 6lowpan Implementation for TinyOS 2.0”, Master’s Thesis, Jacobs University Bremen, School of Engineering and Science, Bremen, May 2007.
- [11] N. A. Abbasi, “6LoWPAN: IPv6 for Battery-less Building Networks”, Master’s Thesis, Eindhoven University of Technology, Department of Mathematics and Computer Science and Department of Electrical Engineering, August 2009.
- [12] P. Nikander, J. Kampf, and E. Nordmark, “IPv6 Neighbor Discovery (ND) Trust Models and Threats”, *RFC 3756, Network Working Group*, May 2004.
- [13] P. Thubert, “6LoWPAN Backbone Router draft-thubert-6lowpan-backbone-router-02”, *Internet-Draft, Internet Engineering Task Force*, June 2010.
- [14] “The Contiki OS”, <http://www.contiki-os.org>, February 2012.
- [15] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, J. P. Vasseur and R. Alexander, “RPL: IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks”, *RFC 6550, Internet Engineering Task Force*, March 2012.
- [16] V. G. Cerf and R. E. Kahn, “A Protocol for Packet Network Intercommunication”, *IEEE Trans. on Comms.*, vol. COM-22, no 5, May 1974.

- [17] Y. Yu, V. K. Prasanna and B. Krishnamachari, *Information Processing and Routing in Wireless Sensor Networks*. California: World Scientific Publishing Co. Inc., December 2006.
- [18] Y. Chen, J. P. Chanet and K. M. Hou, “RPL Routing Protocol a Case Study: Precision Agriculture”, *First China-France Workshop on Future Computing Technology*, February 2012.
- [19] Z. Shelby and C. Bormann, *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. John Wiley & Sons, 1st edition, January 2010.
- [20] Z. Shelby, S. Chakrabarti, and E. Nordmark, “Neighbor Discovery Optimization for Low Power and Lossy Networks (6LoWPAN) draft-ietf-6lowpan-nd-18”, *Internet-Draft, 6LoWPAN Working Group*, October 2009.

Παράρτημα Α

Στο παρόν παράρτημα υπάρχουν οι κώδικες των κόμβων που υλοποιήθηκαν για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

Makefile κινητού κόμβου

```
all: mobile-node

APPS=servreg-hack
CONTIKI=../../..

WITH_UIP6=1
UIP_CONF_IPV6=1
DEFINES = UIP_CONF_ROUTER=1,UIP_ND6_SEND_RA=0
CFLAGS+= -DUIP_CONF_IPV6_RPL

ifdef PERIOD
CFLAGS+=-DPERIOD=$(PERIOD)
endif

include $(CONTIKI)/Makefile.include
```

Κώδικας κινητού κόμβου

```
/* Mobile Node's Code */

#include "contiki.h"
```

```

#include "lib/random.h"
#include "sys/ctimer.h"
#include "sys/etimer.h"
#include "net/uip.h"
#include "net/uip-ds6.h"
#include "net/uip-debug.h"

#include "node-id.h"

#include "simple-udp.h"
#include "servreg-hack.h"

#include <stdio.h>
#include <string.h>

#define UDP_PORT 80
#define SERVICE_ID 1411

#define SEND_INTERVAL      (5 * CLOCK_SECOND)
#define SEND_TIME          (random_rand() % (SEND_INTERVAL))

static struct simple_udp_connection unicast_connection;

/*-----*/
PROCESS(mobile_node_process, "Mobile Node's process");
AUTOSTART_PROCESSES(&mobile_node_process);
/*-----*/

static void
receiver(struct simple_udp_connection *c,
         const uip_ipaddr_t *sender_addr,
         uint16_t sender_port,
         const uip_ipaddr_t *receiver_addr,
         uint16_t receiver_port,

```

```

        const uint8_t *data,
        uint16_t datalen)
{
    printf("Receive from Sink\n");
}
/*-----*/
PROCESS_THREAD(mobile_node_process, ev, data)
{
    static struct etimer periodic_timer;
    static struct etimer send_timer;
    uip_ipaddr_t *addr;

    PROCESS_BEGIN();

    servreg_hack_init();
    simple_udp_register(&unicast_connection,  UDP_PORT,  NULL,  UDP_PORT,
receiver);

    etimer_set(&periodic_timer, SEND_INTERVAL);
    while(1) {
        PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(etimer_expired(&periodic_timer));
        etimer_reset(&periodic_timer);
        etimer_set(&send_timer, SEND_TIME);

        PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(etimer_expired(&send_timer));
        addr = servreg_hack_lookup(SERVICE_ID);
        if(addr != NULL) {
            static unsigned int num = 1;
            char buf[20];

            printf("Send to Sink (%d)\n",num);
            num++;
            sprintf(buf, "Msg");

```

```

    simple_udp_sendto(&unicast_connection, buf, strlen(buf) + 1, addr);
}
}

PROCESS_END();
}
/*-----*/

```

Makefile σταθερού κόμβου

```

all: fixed-node
APPS=servreg-hack
CONTIKI=../../..

WITH_UIP6=1
UIP_CONF_IPV6=1
DEFINES = UIP_CONF_ROUTER=1,UIP_ND6_SEND_RA=0
CFLAGS+= -DUIP_CONF_IPV6_RPL

ifdef PERIOD
CFLAGS+=-DPERIOD=$(PERIOD)
endif

include $(CONTIKI)/Makefile.include

```

Κώδικας σταθερού κόμβου

```

/* Fixed Node's Code */

#include "contiki.h"

```

```

#include "lib/random.h"
#include "sys/ctimer.h"
#include "sys/etimer.h"
#include "net/uip.h"
#include "net/uip-ds6.h"
#include "net/uip-debug.h"

#include "node-id.h"

#include "simple-udp.h"
#include "servreg-hack.h"

#include <stdio.h>
#include <string.h>

#define UDP_PORT 80
#define SERVICE_ID 1411

#define SEND_INTERVAL      (60 * CLOCK_SECOND)
#define SEND_TIME          (random_rand() % (SEND_INTERVAL))

static struct simple_udp_connection unicast_connection;

/*-----*/
PROCESS(fixed_node_process, "Fixed node's process");
AUTOSTART_PROCESSES(&fixed_node_process);
/*-----*/

static void
receiver(struct simple_udp_connection *c,
         const uip_ipaddr_t *sender_addr,
         uint16_t sender_port,
         const uip_ipaddr_t *receiver_addr,
         uint16_t receiver_port,

```

```

    const uint8_t *data,
    uint16_t datalen)
{
    printf("S");
}
/*-----*/
PROCESS_THREAD(fixed_node_process, ev, data)
{
    static struct etimer periodic_timer;
    static struct etimer send_timer;

    PROCESS_BEGIN();

    servreg_hack_init();
    simple_udp_register(&unicast_connection, UDP_PORT, NULL, UDP_PORT,
receiver);

    etimer_set(&periodic_timer, SEND_INTERVAL);
    while(1) {
        PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(etimer_expired(&periodic_timer));
        etimer_reset(&periodic_timer);
        etimer_set(&send_timer, SEND_TIME);

        PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(etimer_expired(&send_timer));
    }
    PROCESS_END();
}
/*-----*/

```

Makefile εξυπηρετητή

```
all: server
```

```
APPS=servreg-hack
CONTIKI=../../..

WITH_UIP6=1
UIP_CONF_IPV6=1
DEFINES = UIP_CONF_ROUTER=1,UIP_ND6_SEND_RA=1
CFLAGS+= -DUIP_CONF_IPV6_RPL

ifdef PERIOD
CFLAGS+=-DPERIOD=$(PERIOD)
endif

include $(CONTIKI)/Makefile.include
```

Κώδικας εξυπηρετητή

```
/* Server's Code */

#include "contiki.h"
#include "lib/random.h"
#include "sys/ctimer.h"
#include "sys/etimer.h"
#include "net/uip.h"
#include "net/uip-ds6.h"
#include "net/uip-debug.h"

#include "simple-udp.h"
#include "servreg-hack.h"

#include "net/rpl/rpl.h"

#include <stdio.h>
```

```

#include <string.h>

#define UDP_PORT 80
#define SERVICE_ID 1411

#define SEND_INTERVAL      (10 * CLOCK_SECOND)
#define SEND_TIME          (random_rand() % (SEND_INTERVAL))

static struct simple_udp_connection unicast_connection;

/*-----*/
PROCESS(server_process, "Server's process");
AUTOSTART_PROCESSES(&server_process);
/*-----*/

static void
receiver(struct simple_udp_connection *c,
         const uip_ipaddr_t *sender_addr,
         uint16_t sender_port,
         const uip_ipaddr_t *receiver_addr,
         uint16_t receiver_port,
         const uint8_t *data,
         uint16_t datalen)
{
    static unsigned int num = 1;
    printf("Data (%d) from ", num);
    uip_debug_ipaddr_print(sender_addr);
    printf("\n");
    num++;
}
/*-----*/

static uip_ipaddr_t *
set_global_address(void)
{

```

```

static uip_ipaddr_t ipaddr;

uip_ip6addr(&ipaddr, 0xaaaa, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
uip_ds6_set_addr_iid(&ipaddr, &uip_lladdr);
uip_ds6_addr_add(&ipaddr, 0, ADDR_AUTOCONF);

return &ipaddr;
}
/*-----*/
static void
create_rpl_dag(uip_ipaddr_t *ipaddr)
{
    struct uip_ds6_addr *root_if;

    root_if = uip_ds6_addr_lookup(ipaddr);
    if(root_if != NULL) {
        rpl_dag_t *dag;
        uip_ipaddr_t prefix;

        rpl_set_root(ipaddr);
        dag = rpl_get_dag(RPL_ANY_INSTANCE);
        uip_ip6addr(&prefix, 0xaaaa, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
        rpl_set_prefix(dag, &prefix, 64);
        PRINTF("New RPL dag\n");
    } else {
        PRINTF("Failed to create a new RPL DAG\n");
    }
}
/*-----*/
PROCESS_THREAD(server_process, ev, data)
{
    uip_ipaddr_t *ipaddr;

```

```
PROCESS_BEGIN();

servreg_hack_init();

ipaddr = set_global_address();

create_rpl_dag(ipaddr);

servreg_hack_register(SERVICE_ID, ipaddr);

simple_udp_register(&unicast_connection,  UDP_PORT,  NULL,  UDP_PORT,
receiver);

while(1) {
    PROCESS_WAIT_EVENT();
}
PROCESS_END();
}
/*-----*/
```

Παράρτημα Β

Στο παρόν παράρτημα υπάρχουν οι ρυθμίσεις που δημιουργήθηκαν για την κίνηση των κόμβων.

Ρυθμίσεις πρώτου σεναρίου #1

#node	time(s)	x	y
-------	---------	---	---

7	0.0	26.23	76.58
---	-----	-------	-------

7	5.0	27	77
---	-----	----	----

7	6.0	27.5	77
---	-----	------	----

7	7.0	28	77.5
---	-----	----	------

7	8.0	28.5	77.5
---	-----	------	------

7	9.0	28.5	78
---	-----	------	----

7	10.0	28.5	78.5
---	------	------	------

7	11.0	29	79
---	------	----	----

7	12.0	29	79.5
---	------	----	------

7	13.0	29.5	79.5
---	------	------	------

7	14.0	30	79.5
---	------	----	------

7	15.0	30.5	80
---	------	------	----

7	16.0	30.5	80.5
---	------	------	------

7	17.0	30.5	81
---	------	------	----

7	18.0	31	81.5
---	------	----	------

7	19.0	31.5	82
---	------	------	----

7	20.0	32	82.5
---	------	----	------

7	21.0	32.5	83
---	------	------	----

7	22.0	33	83.5
---	------	----	------

7	23.0	33.5	84
---	------	------	----

7 24.0 34 84
7 25.0 34.5 84
7 26.0 35 84
7 27.0 35.5 84
7 28.0 36 84
7 29.0 36.5 84
7 30.0 37 84.5
7 31.0 37.5 84
7 32.0 38 83
7 33.0 38.5 83.5
7 34.0 39 84
7 35.0 39.5 84
7 36.0 40 84.5
7 37.0 40.5 85
7 38.0 41 85.5
7 39.0 41.5 86
7 40.0 42 86.5
7 41.0 42.5 87
7 42.0 43 88
7 43.0 43.5 88.5
7 44.0 44 89
7 45.0 44.5 89.5
7 46.0 45 90
7 47.0 45.5 90.5
7 48.0 46 91
7 49.0 46.5 91.5
7 50.0 47 92
7 51.0 47.5 92.5
7 52.0 48 93
7 53.0 48.5 93.5
7 54.0 48.5 94
7 55.0 49 94.5
7 56.0 49 95

7 57.0 49.5 95.5
7 58.0 50 96
7 59.0 50.5 96.5
7 60.0 51 97
7 61.0 51.5 97.5
7 62.0 52 98
7 63.0 52.5 98.5
7 65.0 52.5 99
7 66.0 53 99
7 67.0 53.5 99.5
7 68.0 54 100
7 69.0 54.5 100.5
7 70.0 55 101
7 71.0 55.5 101
7 72.0 56 101.5
7 73.0 56.5 101.5
7 74.0 57 101
7 75.0 57.5 101.5
7 76.0 58 101.5
7 77.0 58.5 101
7 78.0 59 100.5
7 79.0 59.5 100
7 80.0 60 100.5
7 81.0 60.5 101
7 82.0 61 101.5
7 84.0 61.5 101.5
7 86.0 62 101.5
7 88.0 62.5 102
7 90.0 63 102.5
7 91.0 63.5 102.5
7 92.0 64 103
7 93.0 64.5 103.5
7 94.0 65 104

7 95.0 65.5 104.5
7 96.0 66 105
7 97.0 66.5 105.5
7 98.0 67 106
7 99.0 67.5 106.5
7 100.0 68 106.5
7 101.0 68.5 107
7 102.0 69 107.5
7 103.0 69.5 108
7 104.0 70 108.5
7 105.0 70.5 109
7 106.0 70.5 109.5
7 107.0 71 110
7 108.0 71.5 110.5
7 150.0 71.5 110
7 151.0 72 109.5
7 152.0 72.5 109
7 153.0 73 108.5
7 154.0 73.5 108
7 155.0 74 107.5
7 156.0 74.5 107
7 157.0 74 106.5
7 158.0 73.5 106
7 159.0 73 105.5
7 160.0 72.5 105
7 161.0 72 104.5
7 162.0 71.5 104
7 163.0 71.5 103.5
7 164.0 71.5 103
7 165.0 71 102.5
7 166.0 70.5 102
7 167.0 70 101.5
7 168.0 71.5 101

7 169.0 71 101.5
7 170.0 70.5 102
7 171.0 70 101.5
7 172.0 69.5 101
7 173.0 69 100.5
7 200.0 68 102.5

Ρυθμίσεις πρώτου σεναρίου #2

#node time(s) x y

7 0.0 26.23 76.58
7 5.0 27 77
7 5.5 27.5 77
7 6.0 28 77.5
7 6.5 28.5 77.5
7 7.0 28.5 78
7 7.5 28.5 78.5
7 8.0 29 79
7 8.5 29 79.5
7 9.0 29.5 79.5
7 9.5 30 79.5
7 10.0 30.5 80
7 10.5 30.5 80.5
7 11.0 30.5 81
7 11.5 31 81.5
7 12.0 31.5 82
7 12.5 32 82.5
7 13.0 32.5 83
7 13.5 33 83.5
7 14.0 33.5 84

7 14.5 34 84
7 15.0 34.5 84
7 15.5 35 84
7 16.0 35.5 84
7 16.5 36 84
7 17.0 36.5 84
7 17.5 37 84.5
7 18.0 37.5 84
7 18.5 38 83
7 19.0 38.5 83.5
7 19.5 39 84
7 20.0 39.5 84
7 20.5 40 84.5
7 21.0 40.5 85
7 21.5 41 85.5
7 22.0 41.5 86
7 22.5 42 86.5
7 23.0 42.5 87
7 23.5 43 88
7 24.0 43.5 88.5
7 24.5 44 89
7 25.0 44.5 89.5
7 25.5 45 90
7 26.0 45.5 90.5
7 26.5 46 91
7 27.0 46.5 91.5
7 27.5 47 92
7 28.0 47.5 92.5
7 28.5 48 93
7 29.0 48.5 93.5
7 29.5 48.5 94
7 30.0 49 94.5
7 30.5 49 95

7 31.0 49.5 95.5
7 31.5 50 96
7 32.0 50.5 96.5
7 32.5 51 97
7 33.0 51.5 97.5
7 33.5 52 98
7 34.0 52.5 98.5
7 34.5 52.5 99
7 35.0 53 99
7 35.5 53.5 99.5
7 36.0 54 100
7 36.5 54.5 100.5
7 37.0 55 101
7 37.5 55.5 101
7 38.0 56 101.5
7 38.5 56.5 101.5
7 39.0 57 101
7 39.5 57.5 101.5
7 40.0 58 101.5
7 40.5 58.5 101
7 41.0 59 100.5
7 41.5 59.5 100
7 42.0 60 100.5
7 42.5 60.5 101
7 43.0 61 101.5
7 43.5 61.5 101.5
7 44.0 62 101.5
7 44.5 62.5 102
7 45.0 63 102.5
7 45.5 63.5 102.5
7 46.0 64 103
7 46.5 64.5 103.5
7 47.0 65 104

7 47.5 65.5 104.5
7 48.0 66 105
7 48.5 66.5 105.5
7 49.0 67 106
7 50.0 67.5 106.5
7 50.5 68 106.5
7 51.0 68.5 107
7 51.5 69 107.5
7 52.0 69.5 108
7 52.5 70 108.5
7 53.0 70.5 109
7 53.5 70.5 109.5
7 54.0 71 110
7 54.5 71.5 110.5
7 55.0 71.5 110
7 55.5 72 109.5
7 56.0 72.5 109
7 56.5 73 108.5
7 57.0 73.5 108
7 57.5 74 107.5
7 58.0 74.5 107
7 58.5 74 106.5
7 59.0 73.5 106
7 59.5 73 105.5
7 60.0 72.5 105
7 60.5 72 104.5
7 61.0 71.5 104
7 61.5 71.5 103.5
7 62.0 71.5 103
7 62.5 71 102.5
7 63.0 70.5 102
7 63.5 70 101.5
7 64.0 71.5 101

7 65.5 71 101.5
7 66.0 70.5 102
7 66.5 70 101.5
7 67.0 69.5 101
7 67.5 69 100.5
7 100.0 68 102.5

Ρυθμίσεις δεύτερου σεναρίου #1

#node time(s) x y

7 0.0 -35.5 35.67
7 10.0 -35 35.67
7 11.0 -34.5 35.67
7 12.0 -34 35.67
7 13.0 -33.5 35
7 14.0 -33 35
7 15.0 -32.5 35.5
7 16.0 -32 36
7 17.0 -31.5 36.5
7 18.0 -31.5 37
7 19.0 -31 37.5
7 20.0 -30.5 38
7 21.0 -30 38.5
7 22.0 -29.5 39
7 23.0 -29 39.5
7 24.0 -28.5 40
7 25.0 -28 40.5
7 26.0 -27.5 41
7 27.0 -27 41.5
7 28.0 -26.5 42
7 29.0 -26 42.5

7 30.0 -25.5 43
7 31.0 -25 43.5
7 32.0 -24.5 44
7 33.0 -24 44.5
7 34.0 -23.5 45
7 35.0 -23 45.5
7 36.0 -23.5 46
7 37.0 -23 46.5
7 38.0 -22.5 47
7 39.0 -22 47.5
7 40.0 -21.5 47.5
7 41.0 -21 48
7 42.0 -20.5 48
7 43.0 -20 48
7 44.0 -19.5 48.5
7 45.0 -19 49
7 46.0 -18.5 49.5
7 47.0 -18 50
7 48.0 -17.5 50.5
7 49.0 -17 51
7 50.0 -16.5 51.5
7 51.0 -16 52
7 52.0 -15.5 52.5
7 53.0 -15 53
7 54.0 -14.5 53.5
7 55.0 -14 54
7 56.0 -13.5 54
7 57.0 -13 54
7 58.0 -12.5 54
7 59.0 -12 54
7 60.0 -11.5 54
7 61.0 -11 54.5
7 62.0 -11 55

7 63.0 -10.5 55.5
7 64.0 -10 56
7 65.0 -9.5 56.5
7 66.0 -9 57
7 67.0 -8.5 57.5
7 68.0 -8 58
7 69.0 -7.5 58
7 70.0 -7 58
7 71.0 -6.5 58.5
7 72.0 -6 58.5
7 73.0 -5.5 59
7 74.0 -5 59
7 75.0 -4.5 59
7 76.0 -4 59.5
7 77.0 -3.5 59.5
7 78.0 -3 59.5
7 79.0 -2.5 60
7 80.0 -2 60
7 100.0 -2 60.5
7 101.0 -2 60.5
7 102.0 -2.5 61
7 103.0 -3 61.5
7 104.0 -3.5 62
7 105.0 -4 62.5
7 106.0 -4.5 63
7 107.0 -5 63
7 108.0 -5.5 63
7 109.0 -6 63
7 110.0 -6.5 63.5
7 111.0 -7 63.5
7 112.0 -7.5 64
7 113.0 -8 64.5
7 114.0 -8.5 65

7 115.0 -9 65
7 116.0 -9.5 65
7 117.0 -10 65.5
7 118.0 -10.5 66
7 119.0 -11 66.5
7 120.0 -11.5 67
7 121.0 -12 67.5
7 122.0 -12.5 68
7 123.0 -13 68.5
7 124.0 -13.5 69
7 125.0 -14 69
7 130.0 -14 69

Ρυθμίσεις δεύτερου σεναρίου #2

#node time(s) x y
7 0.0 -35.5 35.67
7 10.0 -35 35.67
7 10.5 -34.5 35.67
7 11.0 -34 35.67
7 11.5 -33.5 35
7 12.0 -33 35
7 12.5 -32.5 35.5
7 13.0 -32 36
7 13.5 -31.5 36.5
7 14.0 -31.5 37
7 14.5 -31 37.5
7 15.0 -30.5 38
7 15.5 -30 38.5
7 16.0 -29.5 39
7 16.5 -29 39.5

7 17.0 -28.5 40
7 17.5 -28 40.5
7 18.0 -27.5 41
7 18.5 -27 41.5
7 19.0 -26.5 42
7 19.5 -26 42.5
7 20.0 -25.5 43
7 20.5 -25 43.5
7 21.0 -24.5 44
7 21.5 -24 44.5
7 22.0 -23.5 45
7 22.5 -23 45.5
7 23.0 -23.5 46
7 23.5 -23 46.5
7 24.0 -22.5 47
7 24.5 -22 47.5
7 25.0 -21.5 47.5
7 25.5 -21 48
7 26.0 -20.5 48
7 26.5 -20 48
7 27.0 -19.5 48.5
7 27.5 -19 49
7 28.0 -18.5 49.5
7 28.5 -18 50
7 29.0 -17.5 50.5
7 29.5 -17 51
7 30.0 -16.5 51.5
7 30.5 -16 52
7 31.0 -15.5 52.5
7 31.5 -15 53
7 32.0 -14.5 53.5
7 32.5 -14 54
7 33.0 -13.5 54

7 33.5 -13 54
7 34.0 -12.5 54
7 34.5 -12 54
7 35.0 -11.5 54
7 35.5 -11 54.5
7 36.0 -11 55
7 36.5 -10.5 55.5
7 37.0 -10 56
7 37.5 -9.5 56.5
7 38.0 -9 57
7 38.5 -8.5 57.5
7 39.0 -8 58
7 39.5 -7.5 58
7 40.0 -7 58
7 40.5 -6.5 58.5
7 41.0 -6 58.5
7 41.5 -5.5 59
7 42.0 -5 59
7 42.5 -4.5 59
7 43.0 -4 59.5
7 43.5 -3.5 59.5
7 44.0 -3 59.5
7 44.5 -2.5 60
7 45.0 -2 60
7 65.0 -2 60.5
7 65.5 -2 60.5
7 66.0 -2.5 61
7 66.5 -3 61.5
7 67.0 -3.5 62
7 67.5 -4 62.5
7 68.0 -4.5 63
7 68.5 -5 63
7 69.0 -5.5 63

7 69.5 -6 63
7 70.0 -6.5 63.5
7 70.5 -7 63.5
7 71.0 -7.5 64
7 71.5 -8 64.5
7 72.0 -8.5 65
7 72.5 -9 65
7 73.0 -9.5 65
7 73.5 -10 65.5
7 74.0 -10.5 66
7 74.5 -11 66.5
7 75.0 -11.5 67
7 75.5 -12 67.5
7 76.0 -12.5 68
7 76.5 -13 68.5
7 77.0 -13.5 69
7 77.5 -14 69
7 80.0 -14 69