

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**ENERGY-AWARE FLOCK-BASED CONGESTION
CONTROL APPROACH**

Κυριακή Γεωργίου

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2013

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Energy-aware Flock-based Congestion Control Approach

Κυριακή Γεωργίου

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Ανδρέας Πιτσιλλίδης

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

Μάιος 2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Κύπρου και επιβλέπων καθηγητή μου Αντρέα Πιτσιλλίδη για τη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, αλλά και για τη ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η καθοδήγηση και οι συμβουλές του έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στον Παύλο Αντωνίου, Ειδικό Εκπαιδευτικό Προσωπικό στο Πανεπιστήμιο Κύπρου, για την πολύτιμη και συνεχή υποστήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Η βοήθεια του δεν περιορίστηκε στην επεξήγηση του πρωτοκόλλου που υλοποίησε στα πλαίσια του διδακτορικού του, αλλά μου πρόσφερε γνώσεις σε θέματα που αφορούν Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και τον προσομοιωτή NS2.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, και ιδιαίτερα την μητέρα μου Μαρία, για την ολόψυχη αγάπη, κατανόηση και υποστήριξη που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια και περισσότερο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πανεπιστήμιο Κύπρου. Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω και όλους μου τους φίλους στο Τμήμα Πληροφορικής, και ιδιαίτερα τους πιο κοντινούς μου ανθρώπους, οι οποίοι με στήριξαν και με βοήθησαν στις δύσκολες μου στιγμές ενώ δε με άφησαν ποτέ να τα παρατήσω.

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη της τεχνολογίας των αισθητήρων βοήθησε στη ανάπτυξη νέων σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) αποτελούν σήμερα ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας στον τομέα των Ασύρματων Επικοινωνιών, δεδομένου του εκτενούς πεδίου εφαρμογών που μπορούν να υποστηρίξουν, ενώ συνιστούν μία νέα τάξη υπολογιστικών συστημάτων, που διευρύνει την ανθρώπινη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με το φυσικό περιβάλλον. Λόγω της μεγάλης ανάπτυξης που έχουν γνωρίσει τα τελευταία χρόνια τα WSNs, έχει αναπτυχθεί μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον γύρω από συναφή θέματα και πολλά πρωτόκολλα έχουν προταθεί για αυτά τα δίκτυα.

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα στο σχεδιασμό ενός WSN είναι η ενέργεια των κόμβων, μιας και όλες οι λειτουργίες εξαρτώνται συνήθως κατ' εξοχή από φορητές πηγές ενέργειας (συνήθως μια ή δύο μπαταρίες). Η αλλαγή των πηγών ενέργειας των αισθητήρων είναι σχεδόν αδύνατη λόγω της φύσης του δικτύου, με αποτέλεσμα η αποτελεσματική χρήση της ενέργειας του κάθε κόμβου να είναι μια μετρική υψηλής προτεραιότητας. Το πρωτόκολλο Flock-CC [1], το οποίο είναι πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς με λειτουργίες επιπέδου δρομολόγησης, δεν λαμβάνει υπόψη για την δρομολόγηση των πακέτων και κατά συνέπεια ολόκληρου του σμήνους τον παράγοντα ενέργεια. Για αυτό το λόγο, η παρούσα ατομική διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί στην τροποποίηση του Flock-CC πρωτοκόλλου, ώστε να λαμβάνει υπόψη και την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων για την δρομολόγηση των πακέτων.

Μελετήθηκαν πέντε διαφορετικές προσεγγίσεις οι οποίες μέσω της πειραματικής μελέτης έδειξαν ότι υπήρξαν trade-off μεταξύ των διάφορων μετρικών που λήφθηκαν υπόψη για την αξιολόγηση τους. Κάποιες από τις προσεγγίσεις υπερτερούσαν στις διάφορες μετρικές, όμως φάνηκε ότι παρ' όλη την βελτίωση των υπόλοιπων μετρικών, υπήρχε μεγαλύτερο ποσοστό νεκρών κόμβων στις χρονικές στιγμές που μελετήθηκαν, απ' ότι στο πρωτόκολλο Flock-CC.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	1
Εισαγωγή	1
1.1 Γενικές Πληροφορίες	1
1.2 Κίνητρο.....	3
1.3 Σκοπός.....	5
1.4 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	5
 Κεφάλαιο 2	 7
Υπόβαθρο	7
2.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και Συμφόρηση	7
2.1.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	8
2.1.2 Συμφόρηση Δικτύου	13
2.1.3 Χαρακτηριστικά Ασύρματου Δικτύου	14
2.1.4 Συνέπειες Συμφόρησης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	14
2.1.5 Ενδείξεις για την Συμφόρηση στα Ενσύρματα και Ασύρματα Δίκτυα	16
2.1.6 Τύποι Συμφόρησης σε WSNs	16
2.1.7 Πιθανά Μέρη για Συμφόρηση (hotspots)	17
2.1.8 Ανίχνευση Συμφόρησης	18
2.1.9 Η Σημασία της Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	19
2.1.10 Η Κατανάλωση Ενέργειας	20
2.2 Νοημοσύνη Σμήνους και Συμπεριφορά Σμήνους (flocking behavior)	21
2.2.1 Νοημοσύνη σμήνους (Swarm Intelligence)	22
2.2.2 Συμπεριφορά Σμήνους (flocking behavior).....	22
2.2.3 Τεχνητά Σμήνη.....	23
2.2.4 Το Μοντέλο ‘Boids’ του Reynolds [4]	24
2.2.5 Το Μοντέλο Βιολογικού Σμήνους (bio-swarm) των Couzin et al.	26

2.3 Πρωτόκολλο Flock-CC	28
2.3.1 Βασική Ιδέα Μοντέλου	28
2.3.2 Βασικά Στοιχεία Μοντέλου Flock-CC	30
2.3.3 Το Πρωτόκολλο Flock-CC	39
 Κεφάλαιο 3	41
 Προσεγγίσεις πρωτοκόλλου Energy-aware Flock-CC	41
3.1 Βασική Ιδέα.....	41
3.2 Προσεγγίσεις Τροποποίησης Πρωτοκόλλου	43
3.2.1 Προσέγγιση 1	43
3.2.2 Προσέγγιση 2	45
3.2.3 Προσέγγιση 3	46
3.2.4 Προσέγγιση 4	47
3.2.5 Προσέγγιση 5	48
 Κεφάλαιο 4	50
 Πειραματική αξιολόγηση	50
4.1 Τοπολογία.....	51
4.2 Σενάρια	53
4.3 Παράμετροι Προσομοίωσης Σεναρίων.....	54
4.4 Μετρικές Αξιολόγησης.....	55
4.5 Πειραματική Αξιολόγηση.....	59
4.5.1 Πρωτόκολλο Flock-CC	59
4.5.2 Προσέγγιση 1	65
4.5.3 Προσέγγιση 2	69
4.5.4 Προσέγγιση 3	74
4.5.5 Προσέγγιση 4	78
4.5.6 Προσέγγιση 5	82

4.6 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για Flock-CC και Προσεγγίσεις	96
4.6.1 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Flock-CC	96
4.6.2 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 1	97
4.6.3 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 2	98
4.6.4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 3	99
4.6.5 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 4	100
4.6.6 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 5	100
4.7 Συγκριτική Αξιολόγηση	105
 Κεφάλαιο 5	 118
Συμπεράσματα	118
5.1 Γενικά Συμπεράσματα	118
5.3 Μελλοντικές εργασίες	119
 Βιβλιογραφία	 Error! Bookmark not defined.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

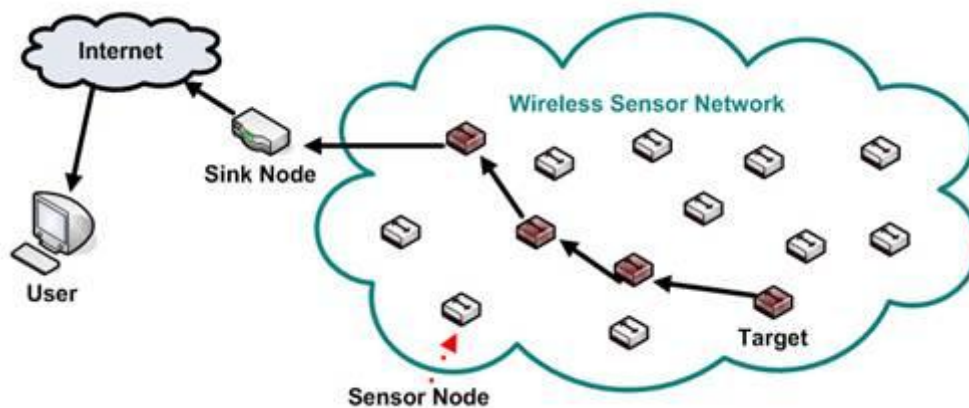
1.1 Γενικές Πληροφορίες	1
1.2 Κίνητρο	3
1.3 Σκοπός	5
1.4 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	5

1.1 Γενικές Πληροφορίες

Τα τελευταία χρόνια οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτομίες στον τομέα των αυτόνομων συστημάτων έχουν ωθήσει το όραμα της Διάχυτης Νοημοσύνης (Ambient Technology) από την ιδέα στην πραγματικότητα, συνδυάζοντας νανο-αισθητήρες και υπολογιστές, ασύρματα δίκτυα, και ευφυές λογισμικό, για την δημιουργία τεχνολογιών Διάχυτης Νοημοσύνης. Προς αυτή την ταχεία εξέλιξη κινήθηκε και το ερευνητικό ενδιαφέρον για αυτόνομα συστήματα με έμφαση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks–WSNs) [2], τα οποία έχουν γνωρίσει τεράστια εξέλιξη και αξιοποιούνται με επιτυχία σε μια πλειάδα διαφορετικών εφαρμογών, όπως για παράδειγμα,

στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος, σε θέματα υγεία, στο σπίτι, για στρατιωτικούς σκοπούς, για την ασφάλεια, και για εμπορικού χαρακτήρα τομείς. Το μεγάλο πλεονέκτημα των ασύρματων είναι η ικανότητά τους να αυτό-οργανώνονται και να λειτουργούν χωρίς επίβλεψη για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Με τον όρο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) εννοούμε ένα δίκτυο αποτελούμενο από αυτόνομες συσκευές (κόμβους) καταναεμημένες στο χώρο, οι οποίες χρησιμοποιούν το ασύρματο μέσο για να επικοινωνήσουν. Οι κόμβοι αυτοί συλλέγουν δεδομένα για κάποιες συνθήκες που επικρατούν στην εμβέλεια τους, για παράδειγμα υγρασία, θερμοκρασία, δόνηση και άλλα, μέσω αισθητήρων. Επικοινωνούν ασύρματα και συνεργάζονται για να μεταβιβάσουν τις πληροφορίες που πήραν μέσω των αισθητήρων μέσα στο δίκτυο σε έναν ή περισσότερους κόμβους συλλογής δεδομένων (sink nodes). Οι κόμβοι sink είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή δεδομένων και παρέχουν επίσης σύνδεση με το δικτυωμένο κόσμο, π.χ. Διαδίκτυο, για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων. Παράδειγμα ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων φαίνεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Τοπολογία ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων

Αυτό που χαρακτηρίζει τους κόμβους-αισθητήρες είναι η ικανότητά τους να αντιμετωπίζουν διάφορες καταστάσεις όπως αποτυχίες κόμβων, κινητικότητα των κόμβων, αποτυχίες επικοινωνίας, ετερογένεια των κόμβων, ενώ τα WSN's μπορούν να επεκταθούν

σε μεγάλη κλίμακα εγκατάστασης. Έχουν επίσης την ικανότητα να αντέχουν σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες και είναι σχετικά εύκολοι στην χρήση, όμως υπάρχουν περιορισμοί όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας μιας και συνήθως είναι εξοπλισμένοι με μία ή δύο μπαταρίες AA.

Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες εφαρμογών των WSNs [3] βάση των στόχων, των χαρακτηριστικών κίνησης δεδομένων και τις απαιτήσεις παράδοσης:

1. Εφαρμογές κατευθυνόμενες από γεγονότα (Event-driven applications)
2. Εφαρμογές συνεχούς ροής (streaming applications)
3. Έναρξη ερωτήματα από sink (sink-initiated querying)
4. Εφαρμογές βασισμένες στην παρακολούθηση (tracking-based applications)

Ένα WSN μπορεί να επέλθει σε κατάσταση συμφόρησης για διάφορους λόγους. Μερικοί από αυτούς είναι όταν οι κόμβοι αυξάνουν το ρυθμό μετάδοσης τους (data rate), ή όταν ο ρυθμός αποστολής πλησιάζει τη χωρητικότητα της γραμμής. Σε γενικές γραμμές, συμφόρηση δικτύου συμβαίνει όταν το προσφερόμενο κυκλοφοριακό φορτίο (offered traffic load) υπερβαίνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα (offered capacity) σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου. Πολλές είναι οι συνέπειες όταν ένα δίκτυο επέλθει σε κατάσταση συμφόρησης όπως συγκρούσεις (collisions), καθυστέρηση στις ουρές (queuing delays), υπερχειλίσσεις μνήμης και απώλειες πακέτων που οδηγούν σε αναμετάδοση (με βάση το CSMA/CA πρωτόκολλο). Λόγω των σοβαρών επακόλουθων που υπάρχουν όταν σε ένα ασύρματο δίκτυο υπάρχει συμφόρηση, πολλές έρευνες έχουν γίνει γύρω από το θέμα, με σκοπό είτε τη μείωση της πιθανότητας συμφόρησης, είτε αντιμετώπισης της όταν συμβεί.

1.2 Κίνητρο

Λόγω της αυξανόμενης χρήσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων, έχει δημιουργηθεί μεγάλη ανάγκη ύπαρξης πρωτοκόλλων τα οποία να αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τη συμφόρηση ενώ ταυτόχρονα να έχουν καλές επιδόσεις. Η παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί στην μελέτη του πρωτοκόλλου Flock-CC [1], με σκοπό την επέκταση του

ώστε να συμπεριληφθεί ο παράγοντας ενέργεια στην δρομολόγηση των πακέτων στο δίκτυο.

Η κύρια ιδέα του μοντέλου Flock-CC είναι η μίμηση της συμπεριφοράς που έχουν ομάδες ζώων, και πιο συγκεκριμένα σμήνη πουλιών, τα οποία πετούν ως μια ομάδα έχοντας ένα κοινό πόλο έλξης (πόλους ή ισημερινό), ενώ ταυτόχρονα αποφεύγουν τα διάφορα εμπόδια που συναντούν στο ταξίδι τους. Με παρόμοιο τρόπο το πρωτόκολλο Flock-CC, «οδηγεί» τα πακέτα ώστε να σχηματίσουν ομάδες ή σμήνη, και να ρέουν προς ένα καθολικό πόλο έλξης (sink), ενώ ταυτόχρονα να αποφύγουν τα εμπόδια (π.χ. περιοχές συμφόρησης). Τα πακέτα μπορούν να κινηθούν σε τοπολογία ενός διακριτού δισδιάστατου χώρου το οποίο αποτελείται από ένα γράφο με κόμβους.

Η συλλογική νοημοσύνη των σμηνών πουλιών διέπεται από απλούς κανόνες συμπεριφοράς οι οποίοι οδηγούν σε αποδοτικές και αποτελεσματικές λύσεις για προβλήματα του πραγματικού κόσμου. Η έμφυτη ικανότητα των σμηνών πουλιών για ελιγμούς γύρω από τα εμπόδια και η προσανατολισμένη κίνηση των αποδημητικών πτηνών προς ένα καθολικό πόλο έλξης (δηλαδή στους πόλους) θεωρούνται ως οι βασικές πηγές έμπνευσης του πρωτοκόλλου Flock-CC [1], λόγω των ομοιοτήτων τους με ενδεχόμενους τρόπους αποφυγής της συμφόρησης σε WSNs. Σε αναλογία με το σμήνος πουλιών, το σύνολο των πακέτων που πρέπει να φτάσουν στον καθολικό πόλο έλξης (sink node), θα κινηθούν στο δίκτυο κάνοντας ελιγμούς γύρω από περιοχές συμφόρησης και περιοχές με νεκρούς κόμβους.

Το Flock-CC μοντέλο χαρακτηρίζεται από τα πιο κάτω βασικά στοιχεία: (α) οι ζώνες και δυνάμεις έλξης και απώθησης, (β) το τεχνητό μαγνητικό πεδίο, (γ) το οπτικό πεδίο (δ) η συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) που υπολογίζει την επιθυμητότητα ενός κόμβου, και (ε) τυχαιότητα. Η συνάρτηση επιθυμητότητας αποτελείται από τα πρώτα τρία στοιχεία και καθορίζει την κατεύθυνση που θα κινηθεί το κάθε πακέτο, ενώ η τυχαιότητα επιτρέπει την εξερεύνηση νέων διαδρομών. Τα πέντε αυτά βασικά στοιχεία θα συζητηθούν περαιτέρω στις παραγράφους που ακολουθούν ενώ αναλυτικότερη περιγραφή του πρωτοκόλλου Flock-CC βρίσκεται στο επόμενο κεφάλαιο. Οι προσεγγίσεις που έχουν

ληφθεί υπόψη για τη συμπερίληψη της ενέργειας στο πρωτόκολλο Flock-CC περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 και τα αποτελέσματά τους στο Κεφάλαιο 4.

1.3 Σκοπός

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) είναι η διαχείριση των ενεργειακών πόρων των κόμβων-αισθητήρων που απαρτίζουν αυτά τα δίκτυα, αφού είναι εφοδιασμένοι με μικρής χωρητικότητας μπαταρίες λόγω του μικρού μεγέθους τους, των οποίων η αντικατάσταση είναι αδύνατη ή δεν συμφέρει. Ανάμεσα στις διάφορες λειτουργίες που επιτελούν οι κόμβοι αισθητήρων, η μεταξύ τους επικοινωνία είναι από τις πιο απαιτητικές από άποψη κατανάλωσης. Γι' αυτό το λόγο, έχουν προταθεί διάφορες λύσεις τόσο για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των ενεργειακών τους αποθεμάτων, όσο και για τη μείωση της κατανάλωσης των αναγκών ασύρματης επικοινωνίας των κόμβων.

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η αύξηση της διάρκειας ζωής ενός WSN μέσω πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, τροποποιήθηκε το πρωτόκολλο Flock-CC [1] ώστε να συμπεριλαμβάνει την υπολειπόμενη ενέργεια των γειτονικών κόμβων για την επιλογή του επόμενου κόμβου που θα αποσταλεί το πακέτο δεδομένων (data packet). Έχουν μελετηθεί πέντε συνολικά προσεγγίσεις για τροποποίηση του πρωτοκόλλου Flock-CC ώστε να συμπεριληφθεί η ενέργεια. Μετά την υλοποίηση των προσεγγίσεων χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής ns-2.31 για την αξιολόγησή και σύγκριση των τεσσάρων τροποποιήσεων τόσο μεταξύ τους όσο και με το αρχικό πρωτόκολλο Flock-CC.

1.4 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Αυτή η διπλωματική εργασία αποτελείται από συνολικά πέντε (5) κεφάλαια. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφηκαν σε συντομία τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς και η βασική ιδέα του πρωτοκόλλου Flock-CC, στο οποίο βασίστηκε η παρούσα διπλωματική εργασία. Ακολούθως, περιγράφηκε ο στόχος της εργασίας αυτής.

Το επόμενο κεφάλαιο, Κεφάλαιο 2, είναι το θεωρητικό υπόβαθρο. Θα γίνει εκτεταμένη περιγραφή των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και της συμμόρφωσης στο υποκεφάλαιο 2.1. Στο υποκεφάλαιο 2.2, θα επεξηγηθούν οι έννοιες νοημοσύνη σμήνους, συμπεριφορά σμήνους και θα γίνει αναφορά στα τεχνητά σμήνη. Επίσης θα γίνει περιγραφή του μοντέλου Reynolds [4] και του μοντέλου Couzin et al. [5]. Το πρωτόκολλο Flock-CC [1] και τα χαρακτηριστικών του θα επεξηγηθούν στο επόμενο υποκεφάλαιο, 2.3.

Στο Κεφάλαιο 3 θα παρουσιαστούν οι προσεγγίσεις που ακολουθήθηκαν ώστε να συμπεριληφθεί η ενέργεια των κόμβο στο πρωτόκολλο Flock-CC, μιας και το πρωτόκολλο αυτό δεν λάμβανε καθόλου υπόψη την παράμετρο ενέργεια, η οποία είναι πολύ σημαντική σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται καταγραφή τόσο των μετρικών όσο και των σεναρίων που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση του μοντέλου που έχει αναπτυχθεί για την παρούσα διπλωματική εργασία. Στη συνέχεια, υπάρχει η πειραματική αξιολόγηση του πρωτοκόλλου καθώς και η σύγκριση με το πρωτόκολλο Flock-CC.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, Κεφάλαιο 5, θα αναφερθούν αρχικά κάποια γενικά συμπεράσματα και ακολούθως θα προταθούν μελλοντικές βελτιώσεις σε αυτά που υλοποιήθηκαν και εισηγήσεις για μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 2

Υπόβαθρο

2.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και Συμφόρηση	7
2.2 Νοημοσύνη Σμήνους και Συμπεριφορά Σμήνους (flocking behavior)	21
2.3 Πρωτόκολλο Flock-CC	28

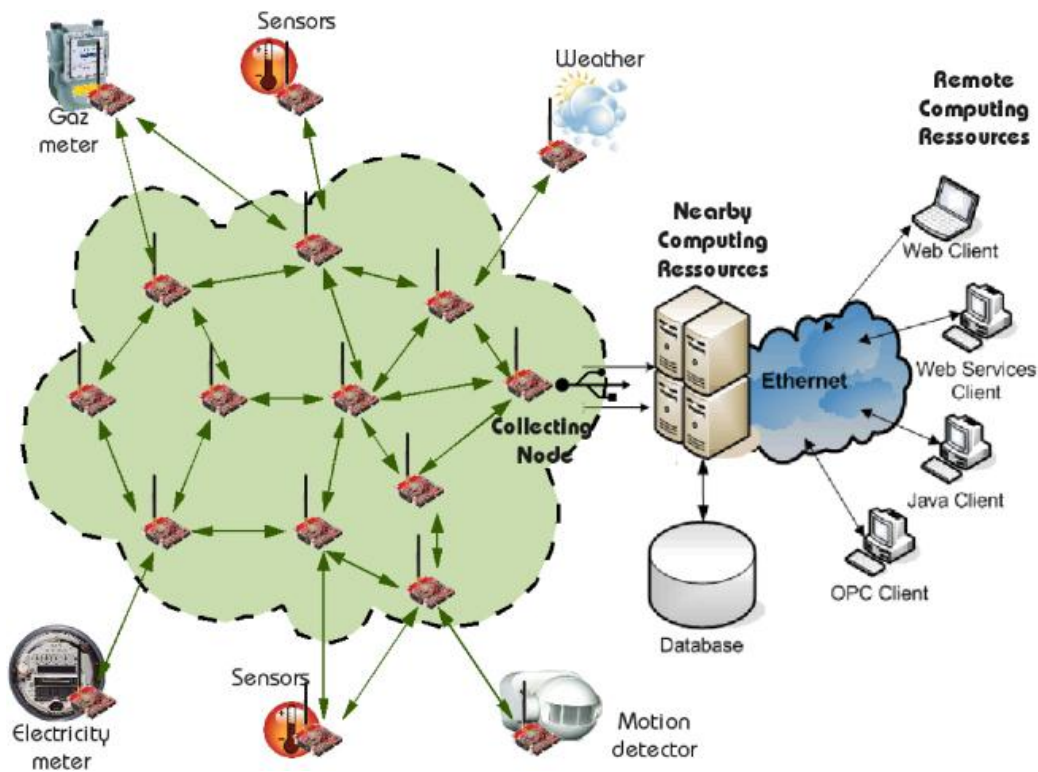
2.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και Συμφόρηση

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη της τεχνολογίας των αισθητήρων βοήθησε στη ανάπτυξη νέων σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών. Η συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής έδωσε ώθηση στον αυτοματισμό και την επιστημονική παρατήρηση. Επιπλέον, οι δυνατότητες των αισθητήρων έδωσαν το κίνητρο για να διερευνηθεί η προοπτική της καταγραφής και επεξεργασίας των μετρήσεων των αισθητήρων από απόσταση, ενώ παράλληλα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν τη ανάπτυξη στις ασύρματες επικοινωνίες. Η συγχώνευση της τεχνολογίας των αισθητήρων, των υπολογιστικών μικροσυσκευών και των ασύρματων επικοινωνιών οδήγησε σε μία νέα καινοτομία, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSNs). Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) αποτελούν σήμερα

ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας στον τομέα των Ασύρματων Επικοινωνιών, δεδομένου του εκτενούς πεδίου εφαρμογών που μπορούν να υποστηρίξουν, ενώ συνιστούν μία νέα τάξη υπολογιστικών συστημάτων, που διευρύνει την ανθρώπινη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με το φυσικό περιβάλλον. Λόγω της μεγάλης ανάπτυξης που έχουν γνωρίσει τα τελευταία χρόνια τα WSNs, έχει αναπτυχθεί μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον γύρω από συναφή θέματα και πολλά πρωτόκολλα έχουν προταθεί για αυτά τα δίκτυα. Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν περιγράφονται τόσο τα WSNs, τα χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές τους, καθώς επίσης και η έννοια της συμφόρησης μιας και είναι ένα από τα σημαντικά προβλήματα αυτών των δικτύων.

2.1.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) είναι ένα ασύρματο δίκτυο που αποτελείται από αυτόνομες συσκευές καταναμημένες στο χώρο, οι οποίες χρησιμοποιούν αισθητήρες για την παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, η δόνηση της γης, η πίεση, η υγρασία, η κίνηση ή τους ρύπους. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται ένα παράδειγμα ενός WSN το οποίο θα μπορούσε να αποτελείται από διάφορων τύπων αισθητήρων οι οποίοι παίρνουν μετρήσεις. Οι συσκευές αυτές, ή διαφορετικά κόμβοι, επικοινωνούν ασύρματα και συνεργάζονται για να μεταβιβάσουν τα δεδομένα τους μέσω του δικτύου σε έναν ή περισσότερους κόμβους συλλογής δεδομένων (sink nodes). Οι κόμβοι sink είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή δεδομένων και παρέχουν επίσης μια σύνδεση με το δικτυωμένο κόσμο, π.χ. Διαδίκτυο, για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση.



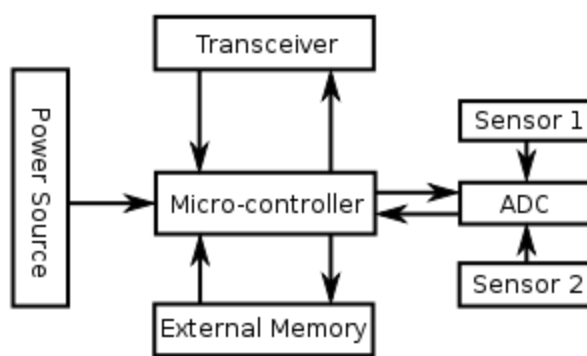
Σχήμα 2.1: Παράδειγμα Ασύρματου Δικτύου αισθητήρων

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός WSN είναι η ικανότητα να αντιμετωπίζουν τις αποτυχίες κόμβων, την κινητικότητα των κόμβων, τις αποτυχίες επικοινωνίας, την ετερογένεια των κόμβων, την επεκτασιμότητα σε μεγάλη κλίμακα εγκατάστασης, την ικανότητα να αντέχει σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες, την ευκολία χρήσης και τους περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας για τους κόμβους που χρησιμοποιούν μπαταρίες ή τη συλλογή ενέργειας.

Οι κόμβοι-αισθητήρες είναι σαν μικροί υπολογιστές, ενεργειακά αυτόνομοι, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να πάρουν μετρήσεις από τον αισθητήρα τους, να τις επεξεργαστούν και να μεταδώσουν ή παραλάβουν πακέτα με μετρήσεις ή εντολές που προέρχονται από τους κόμβους συλλογής δεδομένων (sink nodes), ή διαφορετικά βάση (base station). Κάθε κόμβος αποτελείται συνήθως από μια μονάδα επεξεργασίας (micro-controller) με περιορισμένη ισχύ και περιορισμένη μνήμη (external memory), αισθητήρες (sensors), μια συσκευή επικοινωνίας (συνήθως ράδιο-πομποδέκτες – radio frequency transceiver), και μια πηγή ενέργειας (συνήθως με τη μορφή μιας μπαταρίας – power source). Άλλες πιθανές

συμπεριλήψεις είναι ενότητες συγκομιδής ενέργειας, δευτεροβάθμια ASICs, και ενδεχομένως δευτεροβάθμιες συσκευές επικοινωνίας (π.χ. RS-232 ή USB). Οι κόμβοι sink έχουν περισσότερη υπολογιστική δύναμη, ενέργεια και πόρους επικοινωνίας, απ' ότι οι υπόλοιποι κόμβοι του ασύρματου δικτύου. Λειτουργούν ως πύλες μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων και του τελικού τερματικού, μιας και συνήθως προωθούν τα δεδομένα από το WSN σε ένα διακομιστή (server).

Μια τυπική αρχιτεκτονική των κόμβων-αισθητήρων (sensor nodes) φαίνεται στο Σχήμα 2.2 πιο κάτω.



Σχήμα 2.2: Η τυπική αρχιτεκτονική του κόμβου αισθητήρα.

Δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς [3, 6]. Οι πιο δημοφιλείς τομείς εφαρμογών των δικτύων αισθητήρων είναι στο περιβάλλον, σε θέματα υγείας, στο σπίτι, για στρατιωτικούς σκοπούς, την ασφάλεια και για εμπορικού χαρακτήρα τομείς.

Οι εφαρμογές των WSNs μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τους στόχους, τα χαρακτηριστικά κίνησης δεδομένων και τις απαιτήσεις παράδοσης τους σε τέσσερις κατηγορίες [3].

1. Εφαρμογές κατευθυνόμενες από γεγονότα (Event-driven applications)

Ανίχνευση εισβολέα ως μέρος της στρατιωτικής παρακολούθησης, ανίχνευση ανώμαλης συμπεριφοράς ή τις αποτυχίες σε διαδικασία παραγωγής και η ανίχνευσης των δασικών πυρκαγιών είναι μερικά από τις WSN εφαρμογές της κατηγορίας αυτής.

Το κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των εφαρμογών είναι ότι τα γεγονότα ενδιαφέροντος δεν συμβαίνουν συχνά. Ως εκ τούτου, ένα WSN για μια εφαρμογή που ανήκει σε αυτή την κατηγορία θα είναι ανενεργό τον περισσότερο χρόνο μιας και οι κόμβοι ενεργοποιούνται μόνο όταν ανιχνευτεί ένα συμβάν. Αμέσως μετά την ανίχνευση του γεγονότος, πρέπει να αποστέλλεται μια έκθεση γεγονότος στο sink(s), η οποία να περιέχει μια περιγραφή του γεγονότος και κάποιες πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία του συμβάντος.

Είναι σημαντικό οι εκθέσεις γεγονότος να παραδίδονται μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα μέσω του κόμβου sink σε ένα κέντρο επεξεργασίας για περαιτέρω δράση, προκειμένου να αποφευχθούν καταστροφές. Η κίνηση των δεδομένων που παράγεται από ένα μόνο κόμβο μπορεί να είναι χαμηλής έντασης, αλλά αν ένας μεγάλος αριθμός κόμβων ανιχνεύσουν μια κοινή εκδήλωση ενός γεγονότος, η κυκλοφορία που θα παραχθεί θα είναι μεγάλη. Πολλαπλά πακέτα από διαφορετικούς θα ταξιδέψουν προς στους κόμβους sink, οδηγώντας σε πιθανή συμφόρηση στην περιοχή γύρω από τους κόμβους sink.

Οι περισσότερες εφαρμογές WSN ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

2. Εφαρμογές συνεχούς ροής (streaming applications)

WSN εφαρμογές αυτής της κατηγορίας που στέλνουν τα δεδομένα τους στο sink είναι, παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών που επηρεάζουν τις καλλιέργειες ή την κτηνοτροφία, παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του φωτισμού σε κτίρια γραφείων, εφαρμογές πολυμέσων συνεχής ροής (multimedia streaming applications), και άλλα.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες streaming εφαρμογών οι οποίες βασίζονται στο εύρος ζώνης (bandwidth) και στους περιορισμούς ως προς την καθυστέρηση (delay constraints). Από την μια πλευρά, οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου έχουν ελάχιστες απαιτήσεις στο εύρος ζώνης, είναι περιοριστικές ως προς την καθυστέρηση και η απώλεια πακέτων μπορεί να είναι ανεκτή σε ορισμένο βαθμό. Από την άλλη πλευρά, εφαρμογές μη πραγματικού

χρόνου στέλνουν πακέτα περιοδικά σχετικά με την κατάσταση που παρατηρούν, έτσι έχουν ανοχή στην απώλεια και στην καθυστέρηση.

Συμφόρηση σε εφαρμογές streaming θα μπορούσε να συμβεί λόγω του αυξανόμενου ρυθμού αναφοράς των κόμβων σε συνδυασμό με την ανεξέλεγκτη χρήση των πόρων του δικτύου (για παράδειγμα πακέτα ακολουθούν τον ίδιο δρόμο, υψηλά ποσοστά αποστολής). Αυτό σημαίνει ότι όταν τα πακέτα αφεθούν ανεξέλεγκτα για να φτάσουν τον προορισμό τους (sink), μπορεί να προκαλέσουν συμφόρηση σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου.

3. Έναρξη ερωτημάτων από sink (sink-initiated querying)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν εφαρμογές όπου ο κόμβος sink μπορεί να υποβάλλει ερωτήματα σε ένα σύνολο κόμβων για τις μετρήσεις τους, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο στο sink να αποσπάσει πληροφορίες σε διαφορετική ανάλυση ή βαρύτητα, από διαφορετικές περιοχές στο χώρο του δικτύου.

Στην περίπτωση όπου ένας μεγάλος αριθμός πακέτων ακολουθήσουν την ίδια διαδρομή στο δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία συμφόρησης. Μερικές άλλες πιθανές αιτίες συμφόρησης σε δίκτυα αυτής της κατηγορίας είναι σε σενάρια όπου ο sink ξεκινά ερωτήματα συχνά ή όταν δύο ή περισσότεροι sink κόμβοι ξεκινούν ερωτήματα ταυτόχρονα ή σχεδόν ταυτόχρονα.

4. Εφαρμογές βασισμένες στην παρακολούθηση (tracking-based applications)

Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων της κατηγορίας αυτής έχουν πολλές εφαρμογές στο στρατό ή στην επιτήρηση των συνόρων, όπου κάποιος ενδιαφέρεται για τον εντοπισμό ενός εισβολέα ή τις κινήσεις ενός ύποπτου αντικειμένου. Περιβαλλοντικές εφαρμογές χρησιμοποιούν αυτά τα δίκτυα παρακολούθησης ώστε να παρακολουθούνται οι κινήσεις και τα μοτίβα εντόμων, πτηνών ή μικρών ζώων. Τα ευφυή συστήματα μεταφορών συχνά ενδιαφέρονται για τον εντοπισμό οχημάτων σε μια ευρεία περιοχή, όπου τα στατιστικά στοιχεία των εν λόγω πληροφοριών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον καλύτερο σχεδιασμό της υποδομής μεταφορών.

Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία είναι σχεδιασμένα για την παρακολούθηση συνδυάζουν μερικά από τα χαρακτηριστικά των παραπάνω τριών κατηγοριών. Παραδείγματος χάρη, όταν ο στόχος εντοπιστεί, ο sink πρέπει να ενημερωθεί αμέσως. Στη συνέχεια, ο sink θα μπορούσε να ξεκινήσει ερωτήματα για να λάβει χρονοσήμανση της εκτίμησης της θέσης του στόχου, έτσι ώστε να μπορεί να υπολογίσει την τροχιά και να διατηρήσει τη δημιουργία ερωτημάτων για τα κατάλληλα σύνολα αισθητήρων. Για το σχεδιασμό πρωτοκόλλων επικοινωνίας θα πρέπει να απαντηθούν ερωτήσεις όπως: είναι καλύτερα οι ερωτήσεις (queries), ο υπολογισμός και η δρομολόγηση να γίνονται κατά τη διάρκεια (on-the-fly), ή είναι καλύτερα να διατηρηθεί κάποιο επίπεδο οργάνωσης ή συνδεσιμότητας για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας εντοπισμού, και ούτω καθεξής.

2.1.2 Συμφόρηση Δικτύου

Ένα δίκτυο μπορεί να επέλθει σε κατάσταση συμφόρησης για διάφορους λόγους, όπως όταν οι κόμβοι αυξάνουν το ρυθμό μετάδοσης τους (data rate), ή όταν το ρυθμό αποστολής πλησιάζει τη χωρητικότητα της γραμμής. Σε γενικές γραμμές, συμφόρηση δικτύου συμβαίνει όταν το προσφερόμενο φορτίο (offered traffic load) υπερβαίνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα (offered capacity) σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου.

Όταν ένα δίκτυο παρουσιάζει συμφόρηση, υπάρχουν αρκετές συνέπειες όπως συγκρούσεις (collisions), καθυστέρηση στις ουρές (queuing delays), υπερχειλίσσεις μνήμης και απώλειες πακέτων που οδηγούν σε αναμετάδοση (με βάση το CSMA/CA πρωτόκολλο). Όταν ένα μεγάλο ποσοστό πακέτων είναι αναμεταδόσεις, η απόδοση μπορεί να φαίνεται σταθερή (ή ελαφρώς αυξημένη), αλλά στην πραγματικότητα υπάρχει μια μείωση στην απόδοση (throughput) του δικτύου. Η μείωση αυτή παρατηρείται όταν η απόδοση μετριέται με βάση τα πρωτότυπα δεδομένα (τα οποία δεν έχουν σταλεί μέχρι τώρα) και όχι το προσφερόμενο φορτίο (πρωτότυπα και αναμεταδιδόμενα δεδομένα).

Η αναμετάδοση των δεδομένων δεν είναι παραγωγική λόγω του ότι οι κόμβοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν τους πόρους τους για να στείλουν πρωτότυπα δεδομένα, και όχι για να στείλουν αναμετάδοση των δεδομένων (που έχουν ήδη σταλεί, αλλά για κάποιο λόγο δεν έχουν αναγνωριστεί (acknowledged)).

2.1.3 Χαρακτηριστικά Ασύρματου Δικτύου

Υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ ενσύρματων και ασύρματων δικτύων μόλις παρατηρηθούν εις βάθος, όπως τα πρωτόκολλα, οι ταχύτητες, και οι διαδικασίες ελέγχου της μετάδοσης πακέτων. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους, από την οποία πολλές άλλες ως συνέπεια αυτής [7, 8], είναι το μέσο που χρησιμοποιούν. Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν ραδιοσυχνότητες, αντί για καλώδια για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Αυτή η διαφορά κάνει την ασύρματη επικοινωνία πιο ευάλωτη σε συγκρούσεις, δεδομένου ότι οι 'ράδιογραμμές' δεν είναι προστατευμένες η μια από την άλλη με τον ίδιο τρόπο που είναι τα καλώδια, πράγμα που καθιστά την κυκλοφορία που διέρχονται οποιοδήποτε δεδομένο μέρος του δικτύου ευκολότερο να παρέμβει σε μια άλλη γραμμή κυκλοφορίας (αν δύο διαφορετικά πηγές μεταδίδουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων). Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εξασθενεί καθώς περνά μέσα από την ύλη (π.χ. ένα ραδιοφωνικό σήμα που διέρχεται διαμέσου ενός τοιχώματος). Ακόμη και σε ελεύθερο χώρο, το σήμα θα εξασθενήσει, με αποτέλεσμα την μειωμένη ένταση του σήματος (που αναφέρεται επίσης ως η απώλεια διαδρομής (path loss)), όσο η απόσταση μεταξύ αποστολέα και δέκτη αυξάνει.

Μια άλλη σημαντική διαφορά είναι η διάδοση πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation). Διάδοση πολλαπλών διαδρομών προκύπτει όταν τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος αντικατοπτρίζονται στα αντικείμενα με τη λήψη μονοπατιών διαφορετικού μήκους μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το 'θόλωμα' του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη. Μετακίνηση αντικειμένων μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη μπορεί να προκαλέσει την αλλαγή της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών με την πάροδο του χρόνου.

2.1.4 Συνέπειες Συμφόρησης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Σε ένα WSN, το οποίο είναι ένα δίκτυο πολλαπλών βημάτων (multi-hop), συμφόρηση που λάβει χώρα σε έναν κόμβο μπορεί να διαχυθεί σε ολόκληρο το δίκτυο και να υποβαθμίσει την επίδοση του δραστικά. Η συμφόρηση προκαλεί πολλαπλά μειονεκτημάτων [9, 10] όπως:

- α) Αυξάνει τα ποσοστά απορρόφησης ενέργειας των κόμβων-αισθητήρων,
- β) Προκαλεί μεγάλη απώλεια πακέτων, η οποία με τη σειρά της μειώνει την απόδοση του δικτύου,
- γ) Παρεμποδίζει την εύκολη ανιχνεύσεις εκδήλωση γεγονότων (event detection) και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων,
- δ) Υπάρχουν μεγάλες καθυστερήσεις αναμονής στις ουρές όσο ο ρυθμός παραλαβής πακέτων πλησιάζει τη χωρητικότητα του ασύρματου μέσου,
- ε) Ο αποστολέας πρέπει να εκτελέσει αναμεταδόσεις (retransmissions), προκειμένου να αντισταθμίσει τις απώλειες πακέτων που οφείλεται σε υπερχειλίση (buffer overflow),
- στ) Αχρείαστες αναμεταδόσεις από τον αποστολέα για την αντιμετώπιση των μεγάλων καθυστερήσεων ενδέχεται να έχουν ως αποτέλεσμα ο κόμβος να χρησιμοποιήσει το εύρος ζώνης (link bandwidth) του για να προωθήσει αχρείαστα αντίγραφα του πακέτου, και
- ζ) Όταν ένα πακέτο πέσει κατά μήκος της διαδρομής προς τον προορισμό του, η χωρητικότητα μετάδοσης (transmission capacity) που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε ένα από τους συνδέσμους για να διαβιβάσει το πακέτο μέχρι το σημείο που έχει πέσει, καταλήγει να έχει σπαταληθεί.

Όπως προαναφέρθηκε, η συμφόρηση σε ένα WSN είναι υπεύθυνη για μεγάλες σπατάλες ενέργειας. Όταν η μπαταρία ενός αισθητήρα τελειώσει, δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας για να πάρει μετρήσεις ή να ενεργήσει ως ενδιάμεσος κόμβος ώστε να μεταδώσει πληροφορίες από το ένα σημείο στο άλλο (είναι σαν κάποιος να το αφαιρέσετε από το δίκτυο). Ως εκ τούτου η διάρκεια της ζωής του δικτύου μειώνεται και διασπάται η τοπολογία του δικτύου.

Είναι σαφές ότι οι συγκρούσεις στα ασύρματα δίκτυα είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τη διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων, και είναι πιθανό να συμβούν, οπότε είναι κατανοητό γιατί πολλές μελέτες προσπαθούν να αποφύγουν/ανιχνεύουν συγκρούσεις προκειμένου να τις ελαχιστοποιήσουν. Η ενέργεια, όμως, είναι ο πιο κρίσιμος παράγοντας

των κόμβων στα WSN, δεδομένου ότι καθορίζει τη διάρκεια ζωής των κόμβων και του ασύρματου δικτύου αισθητήρων γενικότερα. Λόγω της σημαντικότητας της ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αυτή η διπλωματική εργασία θα προσπαθήσει να λάβει υπόψη τον παράγοντα ενέργεια για την τροποποίηση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης Flock-CC (θα αναλυθεί αργότερα).

2.1.5 Ενδείξεις για την Συμφόρηση στα Ενσύρματα και Ασύρματα Δίκτυα

Όταν παρατηρείται ένα ενσύρματο δίκτυο, με σκοπό την ανίχνευση της συμφόρησης, υπάρχουν δύο κύριες ενδείξεις, η απώλεια πακέτων λόγω μνήμης (buffer overflow) και αύξηση των καθυστερήσεων (μεγάλες ουρές). Κατά τη διάρκεια των ετών, ο συνδυασμός του μηχανισμού προσαρμογής του παραθύρου συμφόρησης από άκρο σε άκρο (congestion window adaptation), απόρριψης πακέτων στο επίπεδο δικτύου ή τεχνικές σηματοδότησης χρησιμοποιούνται για να εξασφαλιστεί ότι τα δίκτυα θα λειτουργούν χωρίς να καταρρεύσουν λόγω συμφόρησης.

Στα ασύρματα περιβάλλοντα, όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από αυτά που έχουν προηγουμένως αναφερθεί, υπάρχουν πολλές απώλειες και οι παρεμβολές είναι υψηλές. Υπάρχει επίσης μια δυσκολία στη διάκριση συμφόρηση από τις αποτυχίες του κόμβου ή την κακή ποιότητα καναλιού (channel quality), και σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, η πληρότητα ουράς εισόδου δεν είναι πολύ καλή ένδειξη του επιπέδου συμφόρησης. Στα ασύρματα δίκτυα, και ιδιαίτερα τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, οι απώλειες πακέτων μπορούν να αποδοθούν κυρίως στις υπερχειλίσεις της μνήμης (buffer overflow) ή συγκρούσεις στο ασύρματο μέσο. Ένα μικρότερο ποσοστό των χαμένων πακέτων μπορεί επίσης να παρουσιαστεί τυχαία λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων (π.χ., εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών (multipath fading)).

2.1.6 Τύποι Συμφόρησης σε WSNs

Με βάση τις κύριες ενδείξεις για τη συμφόρηση (υπερχειλίσεις μνήμης και συγκρούσεις στο ασύρματο μέσο), μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα φαινόμενα συμφόρησης σε δύο τύπους:

Συμφόρηση τύπου Μνήμης (Buffer-type congestion): όταν η εισερχόμενη κίνηση ενός συγκεκριμένου κόμβου υπερβαίνει την εξερχόμενη κίνηση, η ουρά στη μνήμη (buffer) του κόμβου θα μεγαλώνει, οδηγώντας σε μεγάλες καθυστερήσεις. Εάν το πρόβλημα εξακολουθεί να υφίσταται και το μήκος της ουράς υπερβεί την χωρητικότητα της μνήμης, τότε έχουμε υπερχειλίση μνήμης (buffer overflow) και ο κόμβος από εκείνη τη στιγμή θα απορρίπτει τα πακέτα που θα έρχονται.

Συμφόρηση τύπου Σύνδεσης (Link-type congestion): Συμφόρηση στο επίπεδο της σύνδεσης (link level) προκαλείται λόγω των συγκρούσεων (collisions) όταν πολλαπλοί ενεργοί κόμβοι αισθητήρων προσπαθήσουν να εκμεταλλευτούν το ασύρματο κανάλι ταυτόχρονα. Η συμφόρηση αυτού του τύπου αυξάνει το χρόνο υπηρεσίας πακέτου (packet service time) ενώ μειώνει τόσο τη χρησιμοποίηση της σύνδεσης όσο και την συνολική απόδοση, ενώ γίνεται και σπατάλη ενέργειας στους κόμβους.

Οι δύο αυτοί τύποι συμφόρησης μπορούν να συνυπάρξουν σε ένα WSN.

2.1.7 Πιθανά Μέρη για Συμφόρηση (hotspots)

Όταν συμβαίνει ένα γεγονός, οι αισθητήρες κοντά σε εκείνη την περιοχή θα αρχίσουν να στέλνουν τα πακέτα δεδομένων τους (πληροφορίες σχετικά με την εκδήλωση του γεγονότος) προς τον κόμβο sink. Ανάλογα με την τοπολογία και το ρυθμό αποστολής δεδομένων (data rate) των κόμβων, η κυκλοφοριακή συμφόρηση μπορεί να συμβεί σε διαφορετικές τοποθεσίες στο δίκτυο.

Σε πυκνά αναπτυγμένα δίκτυα, ένα γεγονός θα ανιχνευθεί από ένα μεγάλο αριθμό αισθητήρων. Επομένως, πολλά πακέτα δεδομένων θα παραχθούν και προωθηθούν προς τον κόμβο sink. Σε μια κατάσταση όπως αυτή, σημεία συμφόρησης (hotspots) θα δημιουργηθούν κοντά στους κόμβους πηγές, οδηγώντας στην εξάντληση των τοπικών πόρων (ασύρματη χωρητικότητα καναλιού, χωρητικότητα μνήμης και ενέργεια των εμπλεκόμενων κόμβων).

Τα hotspots μπορούν επίσης να προκύψουν και σε αραιά ανεπτυγμένα δίκτυα. Η πρώτη περίπτωση είναι όταν οι κόμβοι-πηγές αποστέλλουν πακέτα δεδομένων σε ένα υψηλό

ρυθμό με αποτέλεσμα να προκύπτουν hotspot γύρω από έναν κόμβο sink. Αυτό συμβαίνει λόγω της συγκλίνουσας (πολλά-προς-ένα) φύσης των ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, δηλαδή πολλαπλοί κόμβοι-πηγές στέλνουν πακέτα δεδομένων προς ένα κόμβο sink. Ο δεύτερος λόγος για τη συμφόρηση στα αραιά ανεπτυγμένα δίκτυα μπορεί να είναι ακόμη και όταν οι κόμβοι-πηγές στέλνουν σε χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Το σενάριο αυτό θα μπορούσε να λάβει χώρα οπουδήποτε σε ένα δίκτυο αισθητήρων, όταν υπάρχουν δύο ή περισσότερα τεμνόμενα ρεύματα κυκλοφορίας (intersecting traffic flows).

Συνοψίζοντας, η συμφόρηση μπορεί να συμβεί σε πολλά διαφορετικά μέρη του δικτύου λόγω πολλών διαφορετικών αιτιών που θα μπορούσαν να συμβούν ακόμη και τυχαία.

2.1.8 Ανίχνευση Συμφόρησης

Στο Διαδίκτυο, τεχνικές ανίχνευσης της συμφόρησης κατά βάση χρησιμοποιούν την απώλεια πακέτων, η οποία οφείλεται σε υπερχειλίσεις της μνήμης, για να υπαινιχθεί συμφόρηση. Κάποιες άλλες τεχνικές χρησιμοποιούν πληρότητα ουράς και καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end delay) για την ανίχνευση της συμφόρησης, αλλά αυτές χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνότητα.

Οι μελέτες [11] και [12] έδειξαν ότι σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπου στο κοινόχρηστο ασύρματο μέσο χρησιμοποιείται το CSMA/CA πρωτόκολλο, οι απώλειες στο ασύρματο καναλιό μπορούν να κυριαρχήσουν τις απώλειες λόγω μνήμης (buffer drops) και να αυξήσουν γρήγορα το προσφερόμενο φορτίο (offered load). Το πρόβλημα των απωλειών καναλιό επιδεινώνεται γύρω από τις hotspot περιοχές (όπως συζητήθηκε στο 2.1.7), οδηγώντας στην πληρότητα της χωρητικότητας του καναλιό. Η μελέτη [13] αποκάλυψε ότι η χωρητικότητα του ασύρματος μέσου μπορεί να φτάσει το ανώτατο όριο της πιο γρήγορα από ότι η πληρότητας ουρά. Ως εκ τούτου, η πληρότητα ουρά από μόνη της δεν είναι μια καλή ένδειξη για την ανίχνευση συμφόρησης στο ασύρματο δίκτυο, ακόμη και αν είναι η κύρια ένδειξη στα ενσύρματα δίκτυα. Ούτε η ανίχνευση της συμφόρησης με βάση το ασύρματο κανάλι όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνη της διότι, όπως η μελέτη των Hull et al. [12] αποκάλυψε, αποδίδει χειρότερα από ότι η ανίχνευση της συμφόρησης με βάση την ουρά πληρότητας. Όπως μπορεί κανείς να

αντιληφθεί, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό τεχνικών βασισμένο τόσο στην πληρότητα ουράς όσο και στην ανίχνευσης συμφόρησης με βάση το κανάλι, η συμφόρηση αναμένεται να είναι πιο αποτελεσματικά ανιχνεύσιμη.

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τρεις είναι οι βασικοί δείκτες ανίχνευσης της συμφόρησης: πληρότητας μνήμης (buffer occupancy), πληρότητα buffer και φόρτος του ασύρματου καναλιού (wireless channel load), χρόνος άφιξης πακέτων (packet inter-arrival) και ο χρόνος εξυπηρέτησης (service time). Η Flock-CC προσέγγιση [1], και ως εκ τούτου αυτή η εργασία, χρησιμοποιεί τη χωρητικότητα μνήμης και το φόρτος του καναλιού για να συμπεράνει την ύπαρξη συμφόρησης. Ένα πακέτο όσο περιμένει να σταλεί, ο κόμβος-αισθητήρας παίρνει δείγματα για την κατάσταση του καναλιού ανά τακτά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, κάνοντας καταμέτρηση τόσο των επιτυχών αλλά και ανεπιτυχών αποστολών πακέτων. Επίσης παίρνει πληροφορίες όσο αφορά την πληρότητα της ουράς των γειτονικών κόμβων μέσω πακέτων ελέγχου (control packets) που αποστέλλονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Στο Flock-CC στο οποίο βασίζεται αυτή η διπλωματική εργασία, η συμφόρηση συμπερένεται από κάθε κόμβο που βρίσκεται μέσα σε μια περιοχή συμφόρησης, χωρίς την εμπλοκή οποιοδήποτε άλλου κόμβου στη διαδικασία (π.χ. χρόνος μετ'επιστροφής – round trip time).

2.1.9 Η Σημασία της Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι γραφτό να αναπτυχθούν σε μεγάλους αριθμούς σε διάφορα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των απομακρυσμένων και εχθρικών περιοχών, όπου οι ad-hoc επικοινωνίες αποτελούν βασικό συστατικό. Τα συστήματα αισθητήρων πρέπει να χρησιμοποιούν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια κατά τη λειτουργία τους, σε ένα ευρύ φάσμα σεναρίων λειτουργίας, δεδομένου ότι οι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων μπορεί μόνο να είναι εφοδιασμένοι με μια περιορισμένη πηγή ισχύος (<0,5 Ah, 1,2V).

Η δυσλειτουργία μερικών κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων (multihop), όπου οι κόμβοι παίζουν το διπλό ρόλο των πηγών δεδομένων (data originators)

και δρομολογητών δεδομένων (data routers), μπορεί να προκαλέσει σημαντικές τοπολογικές αλλαγές και μπορεί να απαιτηθεί η εκ νέου δρομολόγηση του δικτύου. Αυτό μπορεί επίσης να προκύψει όταν κινούμενα εμπόδια εμποδίζουν ορισμένα κόμβους από το "βλέπουν" κάποιους άλλους.

Από την παραπάνω συζήτηση, είναι σαφές ότι η ενέργεια καθορίζει τη διάρκεια ζωής των ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, καθιστώντας την ως ο πιο σπάνιος πόρος των κόμβων στα WSNs. Λόγω της φύσης των ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και του μεγάλου αριθμού των κόμβων που χρησιμοποιούνται συνήθως σε τέτοια δίκτυα, η αντικατάσταση των μπαταριών δεν θεωρείται επιλογή. Ως εκ τούτου, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα τα οποία να είναι ειδικά σχεδιασμένα για τα χαρακτηριστικά των ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

2.1.10 Η Κατανάλωση Ενέργειας

Συχνά θεωρείται ότι η ισχύς εκπομπής που σχετίζεται με την μετάδοση πακέτων είναι η πιο δαπανηρή λειτουργία. Ωστόσο, η αίσθηση του μέσου, η επεξεργασία σήματος, ακόμη και η λειτουργία του υλικού σε κατάσταση αναμονής καταναλώνουν σταθερή ποσότητα ενέργειας [14, 15]. Πολλές εργασίες έχουν γραφτεί όσον αφορά την ελαχιστοποίηση της ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, προτείνοντας διάφορες προσεγγίσεις.

Πολλοί ερευνητές πιστεύουν ότι η κατανάλωση ενέργειας θα μπορούσε να μειωθεί, εάν οι υφιστάμενες αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των επιπέδων της στοίβας των πρωτοκόλλων δικτύου (network protocols stack) εξεταστούν περαιτέρω. Για παράδειγμα, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης (routing) και πρωτόκολλα πρόσβασης καναλιού (channel access) θα μπορούσε να είχαν οφέλη από την ανταλλαγή πληροφοριών με το φυσικό επίπεδο (physical layer).

Στο φυσικό επίπεδο, η κατανάλωση ενέργειας θα μπορούσε να μειωθεί με μείωση των κύκλων λειτουργίας του ασυρμάτου μέσου (το μέτρο του κλάσματος του χρόνου όπου ένας αισθητήρας μεταδίδει) και με τη δυναμική κλιμάκωση συντονισμού [16]. Δυναμική κλιμάκωση συντονισμού (DMS – Dynamic modulation scaling) είναι μια τεχνική χρήσιμη για τη βελτιστοποίηση της ενέργειας μετάδοσης σχετική με τον αριθμό των πακέτων που

πρέπει να μεταδοθούν εκείνο το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Σε γενικές γραμμές, η χαμηλότερη λειτουργία κύκλων του ασύρματου μέσου και με το DMS, ανταλλάσει την ενέργεια μετάδοσης με την καθυστέρηση μετάδοσης. Η περιοδική ενεργοποίηση και απενεργοποίηση ενός υποσυστήματος όμως θα μπορούσε να είναι πιο δαπανηρή από ότι το υποσύστημα να είναι πάντοτε ενεργοποιημένο. Αξιοσημείωτες είναι οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε επεξεργαστές που βασίζονται στο CMOS [17], οι οποίοι αποσκοπούν στη μείωση της διαρροής ρεύματος όταν βρίσκονται σε κατάσταση αδράνεια (idle mode).

Μερικά από τα κύρια αίτια της σπατάλης ενέργειας βρίσκονται στο στρώμα MAC, για παράδειγμα συγκρούσεις, τα πακέτα ελέγχου και αδράνειας ακρόαση (idle listening). Συνεπώς, είναι κατανοητό ότι οι MAC λύσεις έχουν άμεσο αντίκτυπο στην κατανάλωση ενέργειας. Ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης προσπαθούν να αποφύγουμε την απώλεια ενός αισθητήρα λόγω της εξάντλησης της μπαταρίας, αλλά οι αισθητήρες γύρω από τον κόμβο sink αναμένεται να έχουν μειωμένη διάρκεια ζωής.

Πρόκειται να γίνει μια προσπάθεια προκειμένου να καταστεί το πρωτόκολλο Flock-CC ενεργειακά πιο αποδοτικό μέσα από την πειραματική μελέτη διάφορων σεναρίων και προσεγγίσεων. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με Flock-CC πρωτόκολλο θα συζητηθούν στο μεθεπόμενο υποκεφάλαιο 2.3. Σχετικά με τις προσεγγίσεις που θα μελετηθούν υπάρχει λεπτομερής περιγραφή στο κεφάλαιο 3 και η πειραματική αξιολόγηση στο κεφάλαιο 4.

2.2 Νοημοσύνη Σμήνους και Συμπεριφορά Σμήνους (flocking behavior)

Το πρωτόκολλο Flock-CC είναι εμπνευσμένο από τη συμπεριφορά σμήνους πουλιών, η οποία περιγράφεται πιο κάτω. Γενικότερα όμως, η νοημοσύνη σμήνους (swarm intelligence) έχει βοηθήσει την ανθρωπότητα στην επίλυση πολλών και διαφορετικών προβλημάτων με μεγάλη επιτυχία. Με τις πιο κάτω πληροφορίες θα γίνει κατανοητός ο τρόπος συμπεριφοράς σμήνους πουλιών ενώ ταυτόχρονα θα μπορέσει να γίνει ευκολότερα κατανοητή και η συσχέτιση μεταξύ των στοιχείων του πρωτοκόλλου Flock-CC και ενός σμήνους πουλιών.

2.2.1 Νοημοσύνη σμήνους (Swarm Intelligence)

Για τους καλλιτέχνες, τους φυσιολάτρες και ιδιαίτερα τα παιδιά, η συμπεριφορά των εντόμων που ζουν σε αποικίες, όπως οι μέλισσες, τα μυρμήγκια, οι σφήκες και οι τερμίτες, ήταν πάντα μια πηγή γοητείας. Άλλα παραδείγματα βιολογικών σμηνών είναι σμήνη πτηνών [18], οι ομάδες ψαριών [19, 20], τα σμήνη βακτήρια [13, 21], οι μοριακοί κινητήρες [22], τα τετράποδα κοπάδια [23] και οι άνθρωποι [24, 25, 26].

Όταν κάποιος παρατηρήσει τη συμπεριφορά μιας αποικίας, για παράδειγμα μια αποικία μυρμηγκιών, φαίνεται σαν κάθε μυρμήγκι να ενεργεί τυχαία και χωρίς κεντρικό έλεγχο, όμως η αποικία ως σύνολο συμπεριφέρεται σε ένα εξαιρετικά συντονισμένο τρόπο. Οι ερευνητές έχουν διαπιστώσει ότι η συνεργασία σε επίπεδο αποικίας είναι σε μεγάλο βαθμό αυτό-οργανωμένη. Συχνά, ο συντονισμός της ομάδας είναι απλά μια συνέπεια του τρόπου που τα άτομα αλληλεπιδρούν στην αποικία. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι ουσιαστικά απλοί κανόνες που κάθε άτομο ακολουθεί και έχουν ως αποτέλεσμα την αυτό-οργάνωση του συνόλου.

Η μελέτη νοημοσύνης σμήνους (SI – Swarm Intelligence) παρέχει πληροφορίες που μπορούν να βοηθήσουν τους ανθρώπους να διαχειριστούν και να επιλύσουν προβλήματα με αποτελεσματικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, νοημοσύνη σμήνους είναι η συλλογική συμπεριφορά των αποκεντρωμένων, αυτό-οργανωμένων συστημάτων, φυσικών ή τεχνητών. Η έκφραση εισήχθη από τον Gerardo Beni και Jing Wang το 1989, στο πλαίσιο των cellular ρομποτικών συστημάτων [27].

2.2.2 Συμπεριφορά Σμήνους (flocking behavior)

Το πρωτόκολλο Flock-CC εμπνεύστηκε από τη φύση και πιο συγκεκριμένα από τη συμπεριφορά σμήνους πουλιών, η οποία θα περιγραφεί στις ακόλουθες παραγράφους. Ακόμη και αν αυτό δεν συνδέεται άμεσα με αυτή τη μελέτη, είναι ένα παράδειγμα του πώς αυτό-οργανώνεται η φύση και βελτιστοποιεί τις λειτουργίες της.

Συμπεριφορά σμήνους είναι η συμπεριφορά που επιδεικνύει μια ομάδα πουλιών (η οποία ονομάζεται σμήνος), όταν βρίσκεται σε αναζήτηση τροφής ή σε μια πτήση. Εάν ένα πουλί συμμετέχει σε ένα σμήνος, τότε θα προσαρμόσει τις κινήσεις του ανάλογα με τις κινήσεις

του υπόλοιπου σμήνους. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα αποδημητικά πτηνά δημιουργούν ένα συμμετρικό σχήμα V όταν πετούν. Υπάρχουν δύο κύριοι λόγοι που τα πουλιά πετούν σε σχήμα V. Ο πρώτος λόγος είναι επειδή όταν τα πουλιά πετούν σε σχηματισμό V εξοικονομούν ενέργεια και το σύνολο του σμήνους προσθέτει τουλάχιστον 70% μεγαλύτερο εύρος πτήσης απ' ό,τι αν πετούσαν το καθένα από μόνο του. Αυτό επιτυγχάνεται επειδή το πουλί μπροστά δημιουργεί κινήσεις αέρα και με αυτό τον τρόπο μειώνεται το φορτίο των πουλιών πίσω. Δεν υπάρχει ένα ηγετικό πουλί στο σμήνος, αλλά αντί αυτού όλα τα πουλιά είναι ίσα και αναλαμβάνουν εκ περιτροπής να είναι μπροστά. Όταν το πουλί μπροστά κουράζεται, κάποιο πουλί από πίσω αναλάβει. Ο δεύτερος λόγος είναι γιατί με αυτό το σχήμα κατά τη διάρκεια πτήσης, είναι εύκολο να παρακολουθείτε κάθε πουλί του σμήνους.

Με βάση την [19], ένα πουλί μπορεί να γνωρίζει τρεις κατηγορίες όσο αφορά τα πουλιά στο σμήνος: τον εαυτό του, τους δύο ή τρεις πλησιέστεροι γείτονές του και το υπόλοιπο σμήνος. Η ισορροπία μεταξύ των πουλιών ενός σμήνους φαίνεται να επιτυγχάνεται με δύο αντίθετες συμπεριφορές, από την μια η επιθυμία να μείνει κοντά στο σμήνος και από την άλλη η επιθυμία για την αποφυγή συγκρούσεων μέσα στο σμήνος. Όταν ένα σμήνος συναντήσει κάποιο εμπόδιο, για παράδειγμα ψηλά δέντρα ή κτήρια, μια καταπληκτική συμπεριφορά παρατηρείται. Βρίσκει τον ιδανικό τρόπο για να χωριστεί και να πάει γύρω από το εμπόδιο, και στη συνέχεια ο V σχηματισμός δημιουργείται για άλλη μια φορά όταν το εμπόδιο έχει περάσει.

2.2.3 Τεχνητά Σμήνη

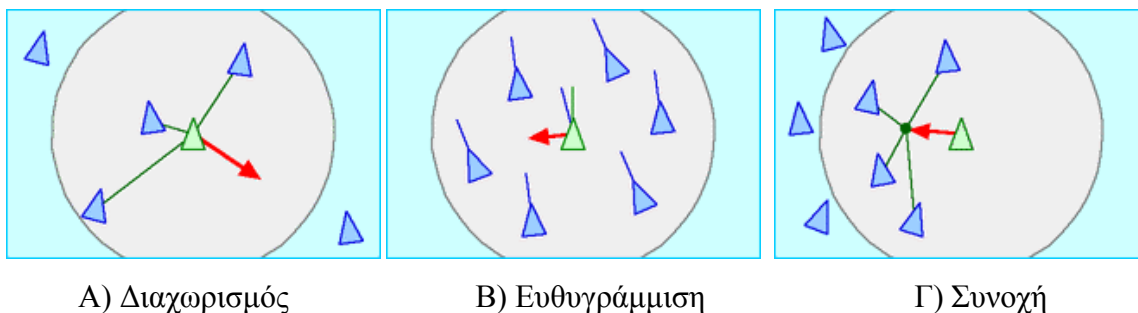
Τα τεχνητά σμήνη είναι παρόμοια με τα βιολογικά σμήνη (π.χ. σμήνη πτηνών, αποικίες μυρμηγκιών), αλλά αντί εντόμων σε μια αποικία, το τεχνητό σμήνος αποτελείται από έναν αριθμό τεχνητών οντοτήτων, που ονομάζονται σωματίδια. Ένα τεχνητό σμήνος υπάρχει ως ένα σύνολο κανόνων ή αλληλεπιδράσεων μεταξύ των τεχνητών οντοτήτων. Αυτοί οι κανόνες και αλληλεπιδράσεις ακολουθούν τα θεωρητικά μοντέλα των βιολογικών σμηνών.

Ο Craig Reynolds συνειδητοποίησε ότι η συντονισμένη κίνηση ενός σμήνους πουλιών θα μπορούσε να προσομοιωθεί αν κάθε οντότητα ακολουθούσε μια σειρά από απλούς

κανόνες. Η μελέτη του [4], αποκάλυψε ότι σμήνη και κοπάδια αυτό-οργανώνονται όταν οι τοπικοί, αποκεντρωμένοι κανόνες ακολουθούνται από κάθε τεχνητή οντότητα. Με βάση τη μελέτη του Reynolds, τα φυσικά σμήνη φαίνεται να αποτελούνται από δύο ισορροπημένες και αντίθετες συμπεριφορές: την επιθυμία να μείνουν κοντά στο κοπάδι και την επιθυμία για την αποφυγή συγκρούσεων μέσα στο κοπάδι. Συγκεκριμένα, υπάρχουν τρεις απλοί κανόνες που περιγράφουν πώς ελίσσεται μια οντότητα, οι οποίοι βασίζονται στη θέση και τις ταχύτητες των κοντινών πουλιών (περαιτέρω συζήτηση σε επόμενη υποενότητα 2.2.4).

2.2.4 Το Μοντέλο ‘Boids’ του Reynolds [4]

Το Boids είναι το πρόγραμμα τεχνητής ζωής που αναπτύχθηκε από τον Craig Reynolds το 1986, το οποίο προσομοιώνει την συμπεριφορά σμήνους πουλιών. Η ιδέα αυτή δημοσιεύθηκε το 1987 στα πρακτικά του συνεδρίου ACM SIGGRAPH [4]. Η μελέτη του Reynolds βασίστηκε στο σύστημα σωματιδίων που υλοποιήθηκε από τον Reeves [28] και το οποίο είναι μια μέθοδος για τη μοντελοποίηση ασαφών αντικειμένων, όπως πυρκαγιά, τα σύννεφα, και το νερό. Τα σωματίδια Reeves, που μοιάζουν με σημεία, αντικαταστήθηκαν από ένα ολόκληρο γεωμετρικό αντικείμενο που αποτελείται από ένα πλήρες τοπικό σύστημα συντεταγμένων και μια αναφορά σε ένα γεωμετρικό μοντέλο σχήματος. Οι boids συμπεριφορές είναι πιο περίπλοκες από ότι των σωματιδίων που περιγράφονται από τον Reeves. Τα σωματίδια του Reeves δεν έχουν σχεδιαστεί για να αλληλεπιδρούν το ένα με το άλλο, ενώ τα boids πρέπει να αλληλεπιδρούν βασισμένα σε εσωτερικές και εξωτερικές καταστάσεις.



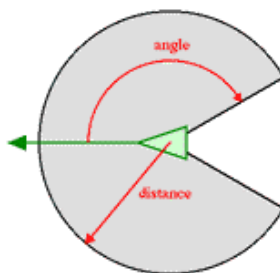
Σχήμα 2.3: Οι τρεις συμπεριφορές κατεύθυνσης των Boids' στο μοντέλο του Reynolds

Το μοντέλο boids αποτελείται από συμπεριφορές που είναι ισορροπημένες και αντίθετες ταυτόχρονα: η επιθυμία να μείνει κοντά στο κοπάδι και η επιθυμία για την αποφυγή συγκρούσεων μέσα στο κοπάδι. Η μελέτη των τεχνητών σμήνων προϋποθέτει ότι το κάθε boid έχει ένα πεπερασμένο πεδίο αντίληψης μέσα στο οποίο αισθάνεται την επιρροή των γειτόνων, και οι συμπεριφορές αλλαγής κατεύθυνσης βασίζονται σε τρεις απλούς κανόνες.

1. **Διαχωρισμός:** αλλαγή κατεύθυνσης για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις των τοπικών πουλιών (εάν είναι πολύ κοντά, απομακρύνονται)
2. **Συνοχή:** αλλαγή κατεύθυνσης για να κινηθεί προς τη μέση θέση των τοπικών πουλιών (αν είναι μακριά, να κινηθεί πιο κοντά)
3. **Ευθυγράμμιση:** αλλαγή κατεύθυνσης προς τη μέση κατεύθυνση των τοπικών πουλιών (προσπάθεια να ταιριάξουν οι ταχύτητες)

Αυτές οι τρεις συμπεριφορές απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.

Κάθε boid έχει άμεση πρόσβαση στη γεωμετρική περιγραφή του όλου σκηνικού, αλλά η συμπεριφορά σμήνους προϋποθέτει ότι το boid αντιδρά μόνο με πουλιά εντός ορισμένης μικρής γειτονιάς γύρω από τον εαυτό. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από μια απόσταση, που μετρείται από το κέντρο του boid και μία γωνία, η οποία μετρείται από την κατεύθυνση πτήσης του boid. Τα πουλιά που είναι εκτός της τοπικής γειτονιάς αγνοούνται. Η γειτονιά θα μπορούσε να θεωρηθεί ένα μοντέλο περιορισμένης αντίληψης (όπως ένα πτηνό στην ομίχλη), αλλά είναι ίσως πιο σωστό να το σκεφτούμε ως τον ορισμό της περιοχής στην οποία τα πουλιά επηρεάζουν την αλλαγή κατεύθυνση ενός boid (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Η γειτονιά ενός boid χαρακτηρίζεται από μια απόσταση και μια γωνία, τα οποία μετρώνται από την κατεύθυνση πτήσης του boid

Η κίνηση των boids μπορεί να χαρακτηριστεί είτε ως χαοτική ή ως ομαλή. Απροσδόκητες συμπεριφορές θα μπορούσαν επίσης να παρατηρηθούν, όπως όταν το σμήνος διασπαστεί και επανασυνδεθεί μετά από την αποφυγή των εμποδίων, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως επείγουσα συμπεριφορά.

Τα boids χρησιμοποιείται συχνά σε γραφικά ηλεκτρονικών υπολογιστών παρέχοντας ρεαλιστικές αναπαραστάσεις των σμηνών πουλιών και άλλων πλασμάτων, όπως οι ομάδες ψαριών ή κοπάδια ζώων. Η πρώτη φορά που το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ήταν το 1987 (Breaking the Ice) και ήταν ένα τεράστιο βήμα προς τα εμπρός σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές που χρησιμοποιούνταν στα κινούμενα σχέδια για κινούμενες εικόνες.

2.2.5 Το Μοντέλο Βιολογικού Σμήνους (bio-swarm) των Couzin et al.

Η μελέτη των Couzin et al. [5] παρουσιάζει ένα αυτό-οργάνωμένο μοντέλο ομαδικού σχηματισμού στον τρισδιάστατο χώρο, και χρησιμοποιείται για να ερευνήσει τις χωρικές δυναμικές ομάδων των ζώων, όπως τα σμήνη πουλιών. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε προσομοιώνει τη συμπεριφορά των ατόμων σε μια βιολογικό σμήνος (bio-swarm), όπως προκύπτει από δύο κανόνες συμπεριφοράς:

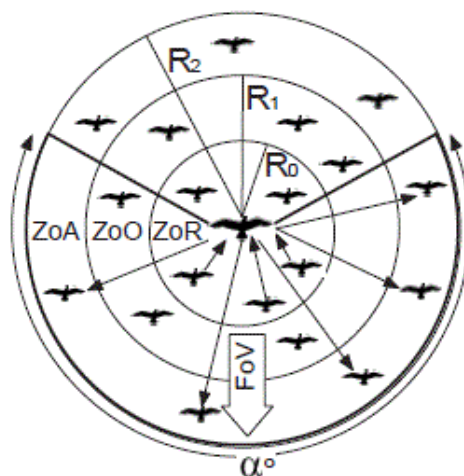
[1] Τα άτομα προσπαθούν να διατηρούν μία ελάχιστη απόσταση του εαυτού τους και των υπολοίπων ανά πάσα στιγμή. Ο κανόνας αυτός έχει την υψηλότερη προτεραιότητα και αντιστοιχεί σε μια συχνά παρατηρούμενη συμπεριφορά των ζώων στη φύση (Krause & Ruxton [29]).

[2] Εάν τα άτομα δεν κάνουν ελιγμό αποφυγής (κανόνας 1) έχουν την τάση να προσελκύονται προς άλλα άτομα (για να μην απομονωθούν) και να ευθυγραμμιστούν με τους γείτονες (Partridge & Pitcher [30], Partridge [19]).

Αυτές οι τάσεις συμπεριφοράς προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας τοπική αντίληψη και απλές συμπεριφορές αντίδρασης. Υπάρχουν τρεις ομόκεντρες ζώνες τις οποίες τα άτομα σε ένα βιολογικό σμήνος χρησιμοποιούν: Ζώνη Έλξης (ZoA – Zone of Attraction), Ζώνη Κατεύθυνσης (ZoO – Zone of Orientation) και Ζώνη Απώθησης (ZoR – Zone of Repulsion). Αυτές οι ζώνες είναι σφαιρικές, με εξαίρεση έναν όγκο πίσω από το άτομο,

εντός του οποίου οι γείτονες δεν είναι ανιχνεύσιμοι. Αυτός ο "τυφλός όγκος" (blind volume) ορίζεται ως ο κώνος με εσωτερική γωνία ($360^\circ - \alpha$), όπου το α ορίζεται ως το πεδίο αντίληψης (βλ. Σχήμα 2.5). Ένα άτομο με $\alpha = 360^\circ$, μπορεί να ανταποκριθεί στους άλλους σε οποιαδήποτε κατεύθυνση εντός των ζωνών συμπεριφοράς.

Στη "Ζώνη Απώθησης" (ZoR), κάθε άτομο προσπαθεί να διατηρήσει μια ελάχιστη απόσταση από τους άλλους. Έτσι, εάν υπάρχουν γείτονες παρόντες μέσα στο ZoR, το άτομο i αντιδρά με απομάκρυνση από τους γείτονες εντός αυτής της ζώνης. Εάν δεν υπάρχουν γείτονες εντός της "Ζώνης Απώθησης", το άτομο αντιδρά με τους άλλους γείτονες εντός της "Ζώνης Προσανατολισμού" (ZoO) και της "Ζώνης Έλξης" (ZoA). Στη "Ζώνη Προσανατολισμού", ένα άτομο θα προσπαθήσει να ευθυγραμμιστεί με τα γειτονικά άτομα εντός της ζώνης αυτής. Τέλος, στη "Ζώνη Έλξης" θα προσπαθήσει να κινηθεί προς τις θέσεις των ατόμων εντός της ZoA.



Σχήμα 2.5: Αναπαράσταση των ζωνών συμπεριφοράς ενός ατόμου (το κεντρικό) στο μοντέλο: ZoR = Zone of Repulsion, ZoO = Zone of Orientation, ZoA = Zone of Attraction. Το πιθανό «τυφλός όγκος» πίσω από το άτομο φαίνεται επίσης στο σχήμα, με α = πεδίο αντίληψης.

Η έλξη αντιπροσωπεύει την τάση των οργανισμών να συμμετέχουν σε ομάδες και να αποφύγει να την περιφέρει, ενώ ο προσανατολισμός επιτρέπει την συλλογική κίνηση ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των συγκρούσεων μεταξύ των ατόμων.

2.3 Πρωτόκολλο Flock-CC

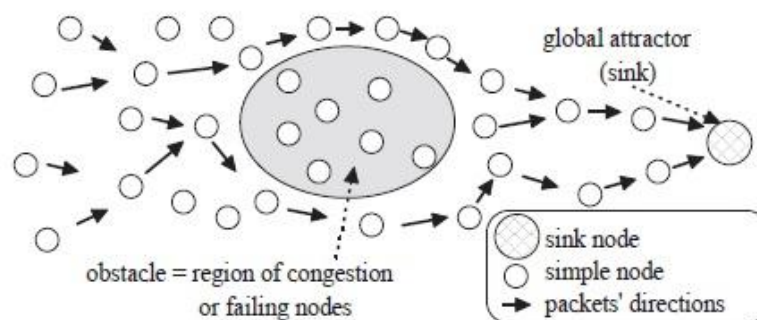
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά η προέλευση της αρχικής ιδέας για τη δημιουργία του πρωτοκόλλου καθώς επίσης και τα βασικά στοιχεία τα οποία συμβάλουν στην σύνθεση του Flock-CC όπως παρουσιάζονται στο [1]. Ακολούθως υπάρχει αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Flock-CC για τη δρομολόγηση των πακέτων στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

2.3.1 Βασική Ιδέα Μοντέλου

Η προσέγγιση του μοντέλου Flock-CC περιλαμβάνει αναφορές σε τεχνητά σμήνη πουλιών, τα οποία αποτελούνται από ομοιογενή άτομα με πεπερασμένο πεδίο όρασης. Αυτά τα άτομα αλληλεπιδρούν τόσο μεταξύ τους, όσο και με το περιβάλλον. Ο σχεδιασμός της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στις ομάδες πακέτων είναι επηρεασμένος από το μοντέλο Couzin en al. [5]. Υπάρχουν δύο βασικές διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων. Η πρώτη σημειώνεται στην τοπολογία που χρησιμοποιεί το κάθε μοντέλο. Από την μια, το μοντέλο Flock-CC προορίζεται για διακριτή τοπολογία δύο διαστάσεων η οποία καθορίζεται από ένα γράφο αποτελούμενο από κόμβους, όπου οι ακμές του γράφου είναι οι ασύρματες συνδέσεις μεταξύ δύο κόμβων, ενώ το μοντέλο Couzin et al. εφαρμόζεται σε συνεχόμενο χώρο τριών διαστάσεων 3D. Η δεύτερη σημαντική διαφορά μεταξύ των μοντέλων είναι ότι στο Couzin en al. τα σμήνη κινούνται συνεχώς σε ένα δεδομένο πεπερασμένο χώρο χωρίς να υπάρχει ένας καθολικός πόλος έλξης, ενώ στο Flock-CC τα σμήνη κινούνται κάτω από την επίδραση έλξης προς ένα πόλο έλξης (όπως και τα σμήνη αποδημητικών πουλιών).

Το μοντέλο Flock-CC μιμείται ουσιαστικά την συμπεριφορά που έχουν σμήνη πουλιών, τα οποία πετούν ως μια ομάδα έχοντας ένα κοινό πόλο έλξης, ενώ ταυτόχρονα αποφεύγουν τα

διάφορα εμπόδια που συναντούν στο ταξίδι τους. Στα WSN δημιουργούνται πολλαπλά πακέτα στους κόμβους-πηγές (source nodes), τα οποία πρέπει να κατευθυνθούν προς το sink node. Ο τρόπος με τον οποίο διαχειρίζεται αυτό το μοντέλο τα πακέτα είναι να τα καθοδηγήσει προς το sink node, με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται ομάδες ή σμήνη πακέτων, τα οποία ταυτόχρονα θα αποφεύγουν τα διάφορα εμπόδια του δικτύου, δηλαδή περιοχές συμφόρησης ή περιοχές με νεκρούς κόμβους. Ανάλογο δηλαδή με τη συμπεριφορά ενός σμήνους. Μια αναπαράσταση του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Σμήνος πακέτων κινούνται προς το sink ενώ ταυτόχρονα αποφεύγουν ‘εμπόδια’

Κάθε πακέτο είναι ανάλογο με ένα πουλί, το οποίο ανανεώνει δυναμικά τη θέση και την κατεύθυνση του καθώς ‘πετά’ από κόμβο σε κόμβο στο ασύρματο δίκτυο, μέσα στο διακριτό διδιάστατο χώρο (2D space). Ο χώρος που μπορεί να κινηθεί το κάθε πακέτο καθορίζεται από το σύνολο των κόμβων που αποτελούν το δίκτυο. Η διαδρομή που ακολουθεί ένα πακέτο καθορίζεται από την αλληλουχία μεταβάσεων του πακέτου ξεκινώντας από τον κόμβο-πηγή μέχρι να φτάσει στο sink node. Τα εμπόδια που συναντούν τα πουλιά ενός σμήνους, για παράδειγμα κτήρια και δέντρα, εδώ αντιστοιχούν με τις περιοχές συμφόρησης (congestion region) και τις νεκρές περιοχές (dead zones – οι οποίες αποτελούνται από κόμβους που έχουν πέσει). Τέλος, στα WSN τα πακέτα έχουν ως προορισμό το sink node, το οποίο λειτουργεί ως πόλος έλξης όλων των πακέτων, δημιουργώντας έτσι ροή πακέτων προς αυτή την καθολική έλξη.

Προκειμένου τα πακέτα να συμπεριφέρονται ως ένα σμήνος, θα πρέπει να ισχύουν τα βασικά χαρακτηριστικά των φυσικών σμηνών, όπως έχουν συζητηθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Σε κάθε κόμβο, ένα πακέτο αλληλεπιδρά με τα πακέτα που βρίσκονται σε γειτονικούς κόμβους, μέσα στο οπτικό πεδίο του πακέτου. Επιδρά επίσης σε κάθε πακέτο και η δύναμη του ‘μαγνητικού πεδίου’ προς την κατεύθυνση του sink, το οποίο είναι ο καθολικός πόλος έλξης στο ασύρματο δίκτυο.

Το Flock-CC διέπεται από τέσσερις απλούς κανόνες, οι οποίοι συνοψίζονται πιο κάτω:

- *Κανόνας 1:* Κάθε πακέτο απωθείται από γειτονικά πακέτα τα οποία βρίσκονται σε κόμβους σε κοντινή απόσταση (π.χ. ένα hop μακριά από το πακέτο) εντός του οπτικού πεδίου (FoV) του πακέτου.
- *Κανόνας 2:* Κάθε πακέτο έλκεται από γειτονικά πακέτα τα οποία βρίσκονται σε κόμβους σε μεσαία απόσταση (π.χ. δύο hops μακριά από το πακέτο) εντός του οπτικού πεδίου (FoV) του πακέτου.
- *Κανόνας 3:* Κάθε πακέτο προσανατολίζεται και έλκεται από τον καθολικό πόλο έλξης κάτω από την επίδραση του περιβαλλοντικού μαγνητικού πεδίου.
- *Κανόνας 4:* Κάθε πακέτο βιώνει κάποια διαταραχή η οποία μπορεί να βοηθήσει ένα πακέτο στο να επιλέξει μια τυχαία διαδρομή (δηλαδή εναλλαγή μεταξύ εξερεύνησης νέων διαδρομών και αξιοποίησης υπάρχον διαδρομών).

2.3.2 Βασικά Στοιχεία Μοντέλου Flock-CC

Τα βασικά στοιχεία του Flock-CC μοντέλου είναι: (α) οι ζώνες και δυνάμεις έλξης και απώθησης, (β) το τεχνητό μαγνητικό πεδίο, (γ) το οπτικό πεδίο (δ) η συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) που υπολογίζει την επιθυμητότητα ενός κόμβου, και (ε) η τυχειότητα. Η συνάρτηση επιθυμητότητας αποτελείται από τα πρώτα τρία στοιχεία και καθορίζει την κατεύθυνση που θα κινηθεί το κάθε πακέτο, ενώ η τυχειότητα επιτρέπει την εξερεύνηση νέων διαδρομών. Τα πέντε αυτά βασικά στοιχεία θα συζητηθούν περαιτέρω στις παραγράφους που ακολουθούν.

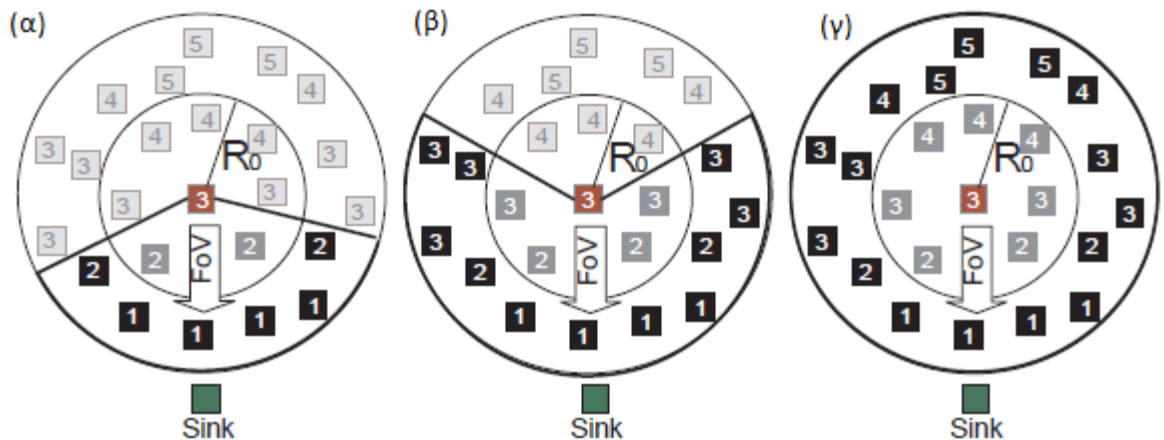
Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι δεδομένου ενός δικτύου με N αυτόνομους κόμβους, $N > 0$, οι οποίοι μπορούν να δημιουργούν πακέτα, ο κάθε κόμβος έχει πεπερασμένο μέγεθος ουράς (queue length) και ρυθμό απόδοσης (throughput) που περιορίζεται από τη χωρητικότητα του ασύρματου μέσου. Ένα πακέτο i και ο κόμβος $n \in \{1, \dots, N\}$, όπου βρίσκεται σε μια χρονική στιγμή το πακέτο i , θεωρούνται ως το σημείο αναφοράς για τον καθορισμό των ζωνών έλξης και απώθησης και του μαγνητικού καθώς και οπτικού πεδίου. Δηλαδή, η θέση του κόμβου n καθορίζει και τη θέση του πακέτου i .

2.3.2.1 Ζώνες και Δυνάμεις Έλξης και Απώθησης

Η ζώνη απώθησης (Zone of Repulsion - ZoR) καθορίζεται ως η περιοχή γύρω από ένα κόμβο με ακτίνα R_0 , όπου R_0 είναι η εμβέλεια μετάδοσης (transmission range) του κόμβου n , γύρω από το πακέτο i . Πιο συγκεκριμένα, στην ζώνη απώθησης περιλαμβάνονται όλα τα πακέτα που βρίσκονται σε κόμβους σε κοντινή απόσταση, δηλαδή ένα hop μακριά. Οι κόμβοι που περιλαμβάνονται σε αυτή τη ζώνη είναι οι γκρίζοι κόμβοι στο Σχήμα 2.7. Η ζώνη έλξης περιλαμβάνει όλα τα πακέτα που βρίσκονται σε μέση απόσταση R_1 από τον κόμβο, δηλαδή όλα τα πακέτα που βρίσκονται σε κόμβους 2 hop μακριά. Στο Σχήμα 2.7, οι κόμβοι που βρίσκονται εντός της ζώνης έλξης είναι οι μαύροι. Στο μοντέλο του Couzin et al. [5] υπάρχει μια επιπρόσθετη ζώνη, η ζώνη Προσανατολισμού (ZoO – Zone of Orientation), η οποία σε αυτό το μοντέλο δεν χρησιμοποιείται, μιας και δεν είναι σχετική η έννοια αυτή με το πρόβλημα που επιλύει το Flock-CC.

Η ένταση των δυνάμεων απώθησης και έλξης, οι οποίες εξασκούνται από πακέτα που βρίσκονται ένα ή δύο κόμβους μακριά αντίστοιχα, είναι ανάλογες του αριθμού των πακέτων που βρίσκονται στους αντίστοιχους κόμβους. Ο αριθμός των πακέτων σε κόμβους ένα hop μακριά μπορεί να ληφθεί κατ' ευθείαν μέσω των πακέτων ελέγχου που μεταδίδονται (broadcasted control packets). Αντίθετα, ο αριθμός των πακέτων που βρίσκονται δύο hops μακριά δεν μπορεί να ληφθεί με τον ίδιο τρόπο, ακριβώς λόγω του ότι οι κόμβοι αυτοί δεν είναι εντός της εμβέλειας μετάδοσης του παρόντος κόμβου. Αντί αυτού, ο αριθμός των πακέτων που βρίσκονται σε κόμβους 2 hop μακριά από τον κόμβο n προκύπτει με τη μέτρηση του αριθμού των επιτυχώς μεταδιδόμενων πακέτων από τους κόμβους ενός hop μακριά προς κόμβους που δεν βρίσκονται στην εμβέλεια του κόμβου n .

(και άρα είναι 2 hop μακριά). Τα πακέτα αυτά μπορεί να μετρηθούν λόγω της φύσης μετάδοσης του ασύρματου καναλιού.



Σχήμα 2.7: α) Στενό Οπτικό πεδίο. β) Ευρύ Οπτικό πεδίο γ) Πλήρη Οπτικό πεδίο

2.3.2.2 Τεχνητό Μαγνητικό Πεδίο

Το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι υπεύθυνο για την καθοδήγηση των αποδημητικών πουλιών ώστε να πετάζουν είτε προς τους μαγνητικούς πόλους είτε προς τον μαγνητικό ισημερινό. Αντίστοιχα, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων γίνεται χρήση του τεχνητού μαγνητικού πεδίου για την καθοδήγηση των πακέτων δεδομένων προς το sink node, αποφεύγοντας άσκοπους κύκλους στο δίκτυο. Το τεχνητό μαγνητικό πεδίο είναι αναγκαίο για δύο λόγους: α) για την παροχή προσανατολισμού και β) για την έλξη των πακέτων προς το sink.

Προσανατολισμός προς το sink συνάγεται από την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, ενώ η έλξη προς συντομότερα μονοπάτια στο νεροχύτη οδηγείται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η ισχύς του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερη μέσω των συντομότερων διαδρομών προς το sink, και εξασθενεί μέσω μακρύτερων διαδρομών. Ο προσανατολισμός, από την άλλη, επιτρέπει στα πακέτα να αναληφθούν την κατεύθυνση

στην οποία βρίσκεται το sink, διαφορετικά θα περιφέρονταν μέσα στο δίκτυο, παγιδευμένα σε κυκλικούς βρόγχους. Η απουσία προσανατολισμού θα είχε ως αποτέλεσμα τα πακέτα να περιπλανιούνται μέσα στο δίκτυο, επιδεινώνοντας την ποιότητα υπηρεσιών.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην προσέγγιση Flock-CC, μέσα από την πληθώρα μεθόδων που υπάρχουν για την δημιουργία μαγνητικού πεδίου προκειμένου να καθοδηγούνται τα πακέτα προς την κατεύθυνση του sink, είναι η απόσταση από το sink σε άλματα (hops). Η μέθοδος αυτή μπορεί να υπολογιστεί εύκολα ενώ ταυτόχρονα το κόστος για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου είναι μικρό. Η απόσταση σε hop μπορεί να αλλάξει λόγω τροποποιήσεων στην τοπολογία του δικτύου, όπως για παράδειγμα βλάβη κόμβου. Πιο κάτω περιγράφεται ο τρόπος υλοποίησης τόσο του προσανατολισμού, όσο και της έλξης των πακέτων προς το sink.

Υλοποίηση Προσανατολισμού Πακέτων προς το sink

Το τεχνητό μαγνητικό πεδίο εντός του δικτύου αισθητήρων πρέπει να δείχνει προς το sink. Η κατεύθυνση προσδιορίζεται βάση της απόστασης σε hop, $h_j(k)$, $j \in \{1, \dots, N\}$, υποδεικνύοντας τον αριθμό των hop μεταξύ κάθε κόμβου j και του sink κατά της k -ιοστής περιόδου δειγματοληψίας (sampling period). Κάθε κόμβος υπολογίζει την απόσταση του σε hop με το να προσθέτει ένα στην μικρότερη απόσταση hop των γειτονικών κόμβων. Η εκκίνηση της διαδικασίας υπολογισμού της απόστασης του κάθε κόμβου από το sink ξεκινά από το ίδιο το sink node με τη μετάδοση, μέσω ενός πακέτου ελέγχου, της δικής του hop απόστασης η οποία είναι μηδέν. Η τιμή της απόστασης σταδιακά διαδίδεται (μέσω των πακέτων ελέγχου) από το sink (που είναι ο πόλος) σε κάθε κόμβο στο δίκτυο.

Όπως προαναφέρθηκε, η τιμή της απόστασης (σε hops) μπορεί να αλλάξει λόγω τροποποιήσεων στην τοπολογία του δικτύου, οι οποίες μπορεί να προκληθούν λόγω αποτυχίας κόμβων (node failures), από μετατόπιση ή από άλλες εσωτερικές αιτίες. Αν ο κόμβος n δεν ακούει τα μηνύματα ελέγχου από ένα δεδομένο γειτονικό κόμβο m για ένα μέγιστο χρονικό διάστημα T_{lost} δευτερόλεπτα ($T_{lost} = 3T$), τότε ο κόμβος n υποθέτει ότι ο γείτονας m είτε έχει αποτύχει, είτε βγει εκτός εμβέλειας, είτε είναι πολύ απασχολημένος. Στην περίπτωση αυτή, ο απρόσιτος γείτονας m διαγράφεται από τον πίνακα γειτνίασης του κόμβου n , ο οποίος περιέχει της τιμές των αποστάσεων όλων των κόμβων ένα άλμα (hop)

μακριά. Στη συνέχεια, η τιμή της απόστασης του κόμβου n επανεκτιμάται εάν η απώλεια ενός γειτονικού κόμβου επηρεάζει την τιμή της απόστασης του. Κάθε αλλαγή στις τιμές απόστασης θα διαδοθεί προς τα πίσω μέσα στο δίκτυο και όλοι οι επηρεαζόμενοι κόμβοι αναμένεται να ενημερώσουν τις τιμές των αποστάσεων τους. Σημειώνεται ότι ελλειπείς ή λανθασμένες πληροφορίες τιμών απόστασης δεν επηρεάζουν αρνητικά το πρωτόκολλο Flock-CC.

Υλοποίηση έλξης στα κοντινότερα μονοπάτια προς το sink

Εκτός από τον προσανατολισμό, το τεχνητό μαγνητικό πεδίο δημιουργεί έλξη για τα συντομότερα μονοπάτια στο sink. Όταν ένα πακέτο δεδομένων, προσανατολισμένο προς το sink, βρίσκεται σε ένα κόμβο n και είναι έτοιμο να κινηθεί, έχει να επιλέξει μεταξύ ενός αριθμού πιθανών κόμβων για να επισκεφθεί. Κάποιοι κόμβοι θα έχουν τιμή απόστασης σε hop μικρότερη, ίση ή μεγαλύτερη από τον κόμβο n . Για να γίνει η επιλογή του επόμενου κόμβου που θα φιλοξενήσει το πακέτο, λαμβάνονται υπόψη οι δυνάμεις έλξης και απώθησης, όπως αυτές συνθέτονται στην συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function), η οποία θα επεξηγηθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Το μαγνητικό πεδίο καθοδηγεί τα πακέτα ώστε να μετακινηθούν σε κόμβους κοντά στο sink, όπου η δύναμη του πεδίου είναι πιο υψηλή. Συνεπώς τα πακέτα τείνουν να κινηθούν προς κόμβους με μικρότερη τιμή απόστασης, παρέχοντας ταχύτερη μετάβαση στο sink, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την άσκοπη περιπλάνηση πακέτων στο δίκτυο. Ουσιαστικά, αυτή η συμπεριφορά επιταχύνεται με την επιβολή διαφοροποιημένης έλξης στους πιθανούς κόμβους που θα επισκεφτεί στη συνέχεια το πακέτο, βάση της τιμής της απόστασης τους σε hop. Δηλαδή κόμβοι που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση από το sink έχουν μεγαλύτερη έλξη, απ' ό,τι κόμβοι που βρίσκονται πιο μακριά.

2.3.2.3 Οπτικό Πεδίο (FoV)

Ακριβώς όπως τα πουλιά έχουν περιορισμένο οπτικό πεδίο, ένα πακέτο i στον κόμβο n , δεν μπορεί να 'δει' όλα τα πακέτα που βρίσκονται σε όλους τους κόμβους μέσα στη γειτονιά του n . Το πακέτο i μπορεί να αντιληφθεί μόνο ένα ποσοστό των πακέτων που βρίσκονται σε γειτονικούς κόμβους. Η περιοχή η οποία μπορεί να αντιληφθεί και να αλληλεπιδράσει

το πακέτο ονομάζεται οπτικό πεδίο. Προκειμένου το σμήνος πακέτων να πετύχει προσανατολισμό προς τον καθολικό πόλο έλξης (sink node), θα πρέπει το οπτικό πεδίο κάθε πακέτου να καλύπτει την περιοχή στην κατεύθυνση του sink. Πιο συγκεκριμένα, στο πρωτόκολλο Flock-CC, το οπτικό πεδίο κάθε πακέτου επεκτείνεται προς τα εμπρός, κατευθυνόμενο από τη φθίνουσα απόσταση hop (προς τον sink).

Ο αναμενόμενος αριθμός κόμβων εντός του οπτικού πεδίου του πακέτου i είναι M , όπου $M \leq N$, και υπάρχουν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις όσο αφορά το άνοιγμα του οπτικού πεδίου, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.7. Οι τρεις περιπτώσεις ανοίγματος του οπτικού πεδίου για το πακέτο i στον κόμβο n (ο κεντρικός κόμβος με κόκκινο χρώμα) είναι οι ακόλουθες:

- Στενό οπτικό πεδίο: το πακέτο i μπορεί να ‘δει’ μόνο τα πακέτα που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση από τον κόμβο n (Σχήμα 2.7α)
- Ευρύ οπτικό πεδίο: το πακέτο i μπορεί να ‘δει’ μόνο τα πακέτα που βρίσκονται σε μικρότερη ή ίση απόσταση από τον κόμβο n (Σχήμα 2.7β)
- Πλήρη οπτικό πεδίο: το πακέτο i μπορεί να ‘δει’ όλα τα πακέτα στους γειτονικούς κόμβους (Σχήμα 2.7γ)

Η ζώνη απόθησης (ZoR) και η ζώνη έλξης (ZoA) επαναπροσδιορίζονται ώστε να περιλαμβάνουν και το οπτικό πεδίο (FoV). Η ζώνη απόθησης είναι ο εσωτερικός κύκλος με ακτίνα R_0 , εκτός από την περιοχή πίσω από το πακέτο i (τυφλή περιοχή) η οποία περιλαμβάνει πακέτα με μεγαλύτερη τιμή απόστασης από τον κόμβο n . Η περίπτωση με το πλήρες οπτικό πεδίο δεν έχει τυφλή περιοχή, μιας και περιλαμβάνει στο οπτικό πεδίο του πακέτου όλα τα πακέτα των γειτονικών κόμβων. Τα πακέτα που βρίσκονται στις ουρές κόμβων με σκούρο γκρίζο χρώμα, στο Σχήμα 2.7, περιλαμβάνονται στη ζώνη απόθησης και απωθούνται από το πακέτο i . Κάθε κόμβος n διατηρεί το μέγεθος της ουράς κάθε κόμβου μέσα στη ζώνη απόθησης στον πίνακα απόθησης, q_n .

Ανάλογη αλλαγή γίνεται και για τη ζώνη έλξης. Η ζώνη έλξης είναι ο εξωτερικός κύκλος και περιλαμβάνει πακέτα σε κόμβους σε απόσταση 2 hops από τον κόμβο n . Οι κόμβοι αυτοί είναι με μαύρο χρώμα στο Σχήμα 2.7. Όπως έχει συζητηθεί και σε προηγούμενα

υποκεφάλαια, ο αριθμός των πακέτων στους κόμβους 2 hop μακριά (μαυρισμένοι κόμβοι) δεν μπορεί να ληφθεί μέσω διάδοσης (broadcast) ενός πακέτου. Για αυτό το λόγο, για να γίνεται καταμέτρηση των πακέτων που βρίσκονται σε αυτούς τους κόμβους, ο κάθε κόμβος n καταγράφει τον αριθμό των επιτυχημένων αποστολών πακέτων από κάθε κόμβο μέσα στη ζώνης απώθησης προς κόμβους στη ζώνη έλξης μέσα στο πίνακα έλξης s_n . Επιπρόσθετα, κάθε κόμβος n καταμετρά και τον συνολικό αριθμό προσπαθειών για αποστολή πακέτων, συμπεριλαμβανομένου των αναμεταδόσεων πακέτων, από κόμβους μέσα στη ζώνης απώθησης προς κόμβους στη ζώνη έλξης μέσα στο πίνακα μεταδόσεων s'_n .

2.3.2.4 Συνάρτηση Επιθυμητότητας (desirability function)

Οι δυνάμεις απώθησης και έλξης οι οποίες εξασκούνται από πακέτα ένα και δύο hops μακριά αντίστοιχα συνθέτουν την διαδικασία απόφασης, η οποία ξεκινά από κάθε κόμβο, για κάθε πακέτο δεδομένων που θα αποσταλεί. Η διαδικασία απόφασης έχει ως αποτέλεσμα την επιλογή του πιο επιθυμητού επόμενου κόμβου για να αποσταλεί το πακέτο, έχοντας ως γνώμονα την αποφυγή ή καλύτερα ελαχιστοποίηση φαινομένων συμφόρησης στον επόμενο κόμβο. Η συνάρτηση επιθυμητότητας αξιολογείται μια φορά που κάθε περίοδο T , όπως περιγράφεται πιο κάτω.

Για τον υπολογισμό της συνάρτησης επιθυμητότητας χρησιμοποιείται ένα διάνυσμα M διαστάσεων $\vec{D}(k)$, όπου $M \leq N$ είναι ο αριθμός των πιθανών κόμβων που θα αποσταλεί το πακέτο την k -ιστή περίοδο. Οι M αυτοί κόμβοι βρίσκονται εντός της εμβέλειας μετάδοσης του κόμβου n , και ταυτόχρονα εντός του οπτικού του πεδίου. Κάθε στοιχείο $D_{nm}(k)$ του διανύσματος $\vec{D}_n(k)$ αντιπροσωπεύει το πόσο επιθυμητός είναι ο κάθε κόμβος m , $m \in \{1, \dots, M\}$, στον κόμβο n την k -ιστή περίοδο, και χρησιμοποιείται για την καθοδήγηση κάθε πακέτου που θα αποσταλεί στον επόμενο κόμβο.

Η συνάρτηση επιθυμητότητας κάθε κόμβου m στον κόμβο n υπολογίζεται ως εξής:

$$D_{nm}(k) = s_{nm}^{norm}(k) - q_{nm}^{norm}(k), \quad (2.1)$$

όπου

$$s_{nm}^{norm}(k) = \begin{cases} \frac{s_{nm}(k)}{s'_{nm}(k)} & \text{if } s'_{nm}(k) > 0 \\ \xi & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

- $\xi \in [0, 1]$ είναι η μεταβλητή διασποράς (spreading variable), η οποία ελέγχει τη διασπορά του σμήνους,
- $s_{nm}(k)$ είναι ο αριθμός των επιτυχημένων αποστολών πακέτων από τον κόμβο m σε κόμβους δύο hops μακριά από τον κόμβο n,
- $s'_{nm}(k)$ είναι ο αριθμός όλων των αποστολών πακέτων (συμπεριλαμβανομένου των αναμεταδόσεων πακέτων) από τον κόμβο m σε κόμβους δύο hops μακριά από τον κόμβο n,

και

$$q_{nm}^{norm}(k) = \frac{q_{nm}(k)}{Q_m}, \quad (2.3)$$

- $q_{nm}(k)$ είναι ο αριθμός των πακέτων στην ουρά του κόμβου m,
- Q_m είναι ο μέγιστος αριθμός πακέτων που μπορεί ο κόμβος m στην ουρά του

Η συνάρτηση $s_{nm}^{norm}(k)$ μπορεί να θεωρηθεί ως η μέτρηση της ποιότητας φόρτους του ασύρματου δικτύου γύρω από τον κόμβο n. Παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 1 και αντιπροσωπεύει την κανονικοποιημένη ελκτική δύναμη που ασκείται στο πακέτο i από τα πακέτα που κινήθηκαν επιτυχώς από κάθε κόμβο m σε κόμβους 2 hops μακριά από τον κόμβο που φιλοξενεί το πακέτο i. Δηλαδή τα πακέτα που τώρα βρίσκονται στην ζώνη έλξης, ενώ πριν ήταν στην ζώνη απόθησης. Στην περίπτωση όπου $s_{nm}^{norm}(k) \rightarrow 1$, σημαίνει ότι δεν υπάρχει συμφόρηση στο κανάλι γύρω από τον κόμβο m και κατά συνέπεια ένα μεγάλο ποσοστό πακέτων κατάφεραν να αποσταλούν ενώ ταυτόχρονα το ποσοστό αναμεταδόσεων πακέτων είναι χαμηλό. Στην αντίθετη περίπτωση όπου $s_{nm}^{norm}(k) \rightarrow 0$, τότε υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο γύρω από τον κόμβο m, μιας και σημαίνει ότι ένα μικρό ποσοστό πακέτων κατάφεραν να αποσταλούν ενώ το ποσοστό αναμεταδόσεων

πακέτων είναι υψηλό. Όταν ένας κόμβος δεν έχει στείλει κανένα πακέτο, τότε $s'_{nm}(k) = 0$ και κατά συνέπεια δεν μπορούμε να γνωρίζουμε κατά πόσο είναι επιθυμητός ή όχι αυτός ο κόμβος. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, το πρωτόκολλο Flock-CC χρησιμοποιεί την μεταβλητή διασποράς (spreading variable) ξ , η οποία είναι η κανονικοποιημένη έλξη που ασκείται από κάθε κόμβο l , ο οποίος είναι αδρανής (idle). Μεγάλες τιμές στην μεταβλητή διασποράς έχει ως αποτέλεσμα τα πακέτα να εξαπλώνονται στο δίκτυο, μιας και θα υπάρχει μεγάλη έλξη στους ανενεργούς κόμβους. Αν από την άλλη η τιμή της μεταβλητής ξ είναι μικρή, τότε θα υπάρχει συνεκτική κίνηση των πακέτων μιας και δεν θα υπάρχει μεγάλη εξάπλωση σε νέους κόμβους.

Η συνάρτηση $q_{nm}^{norm}(k)$ παίρνει επίσης τιμές από 0 έως 1. Αντιπροσωπεύει το ποσοστό πληρότητας της ουράς του κόμβου m και κατ' επέκταση την κανονικοποιημένη δύναμη απόθησης που εξασκείται στο πακέτο i από τα πακέτα που βρίσκονται στον κόμβο m . Τα πακέτα αυτά είναι εκείνα που τη χρονική στιγμή k βρίσκονται στη ζώνη απόθησης. Όταν $q_{nm}^{norm}(k) \rightarrow 0$, η ουρά του κόμβου m είναι άδεια ή σχεδόν άδεια, ενώ όταν $q_{nm}^{norm}(k) \rightarrow 1$, η ουρά του είναι γεμάτη ή σχεδόν γεμάτη. Στην πρώτη περίπτωση όπου $q_{nm}^{norm}(k) \rightarrow 0$, υποδεικνύονται χαμηλά επίπεδα συμφόρησης, ενώ από την άλλη όταν $q_{nm}^{norm}(k) \rightarrow 1$, υποδεικνύεται συμφόρηση λόγω πληρότητας της ουράς του κόμβου m .

Η συνάρτηση επιθυμητότητας για κάθε κόμβο m παίρνει τιμές $-1 \leq D_{nm}(k) \leq 1$. Για να αποσταλεί το πακέτο i από τον κόμβο n σε κάποιο κόμβο m^* , όπου ο κόμβος m^* να βρίσκεται εντός της εμβέλειας μετάδοσης (στη ζώνη απόθησης) του κόμβου n και συγχρόνως εντός του οπτικού του πεδίου, θα πρέπει ο κόμβος αυτός να έχει την μεγαλύτερη τιμή στη συνάρτηση επιθυμητότητας στον κόμβο n .

2.3.2.5 Τυχειότητα

Η συνάρτηση επιθυμητότητας βοηθά στην αξιοποίηση των υπάρχοντων καλών διαδρομών, αλλά δεν επιτρέπει την εξερεύνηση νέων διαδρομών που ίσως αποδειχθούν καλύτερες. Για αυτό το λόγο, το τελευταίο από τα βασικά στοιχεία του πρωτοκόλλου είναι η τυχειότητα, η οποία επιτρέπει την εξερεύνηση και ίσως εύρεση νέων καλύτερων διαδρομών μέσω της ύπαρξης δυνατότητας το πακέτο να επιλέξει μια τυχαία διαδρομή. Επιπρόσθετα, με την

εισαγωγή της τυχαιότητας στο πρωτόκολλο αντιμετωπίζεται και το πρόβλημα που θα δημιουργείτο εάν οι κόμβοι έστελναν τα πακέτα τους στους ίδιους κόμβους.

2.3.3 Το Πρωτόκολλο Flock-CC

Τα πέντε στοιχεία, τα οποία συζητήθηκαν στις παραγράφους 2.2.1 μέχρι 2.2.5, συμβάλλουν στη σύνθεση του πρωτοκόλλου Flock-CC. Κάθε φορά που ένας κόμβος n θέλει να στείλει ένα πακέτο, ξεκινά η διαδικασία απόφασης από τον κόμβο n με σκοπό τον καθορισμό του επόμενου κόμβου που θα επισκεφτεί το πακέτο. Συνολικά υπάρχουν τρία στάδια: (1) επιλογή κατεύθυνσης (μπροστά, πλάγια ή πίσω) χρησιμοποιώντας την έννοια του οπτικού και μαγνητικού πεδίου, (2) ταξινόμηση όλων των γειτονικών κόμβων στην επιλεγμένη κατεύθυνση κατά φθίνουσα σειρά βάση της τιμής της συνάρτησης επιθυμητότητας που είχε ο κάθε κόμβος, και (3) επιλογή του νέου κόμβου βάση πιθανοτήτων (βάση της τιμής επιθυμητότητας).

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο κόμβος sink για την κατεύθυνση κίνησης του πακέτου, μιας και το πακέτο προσανατολίζεται προς τον κόμβο sink για να καθορίσει το οπτικό του πεδίο και αντιλαμβάνεται την έλξη προς αυτόν τον καθολικό πόλο έλξης. Για να καθοριστεί η κατεύθυνση που θα ακολουθήσει το πακέτο υπάρχει μια σειρά από ελέγχους. Αρχικά γίνεται έλεγχος αν το πακέτο μπορεί να κινηθεί προς τα εμπρός, διαφορετικά γίνεται έλεγχος αν μπορεί να κινηθεί προς τα πλάγια και αν καμία από τις πιο πάνω κατευθύνσεις δεν μπορεί να ακολουθηθεί, τότε το πακέτο κινείται προς τα πίσω. Ο έλεγχος που γίνεται για να καθοριστεί αν το πακέτο μπορεί να κινηθεί προς κάποια κατεύθυνση είναι αρχικά να υπάρχει τουλάχιστο ένας κόμβος που να βρίσκεται στη συγκεκριμένη κατεύθυνση, και αν υπάρχει τότε γίνεται έλεγχος αν υπάρχει κόμβος με διαθέσιμο χώρο στην ουρά του. Στην περίπτωση όπου ικανοποιούνται αυτές οι δύο συνθήκες, τότε το πακέτο κινείται προς εκείνη την κατεύθυνση.

Μετά την επιλογή του συνόλου των πιθανών κόμβων για αποστολή του πακέτου, οι κόμβοι αυτοί ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά βάση της τιμής της συνάρτησης επιθυμητότητας τους. Για την τελική επιλογή του κόμβου που θα αποσταλεί το πακέτο χρησιμοποιείται η τυχαιότητα, η οποία υλοποιείται χρησιμοποιώντας το rank based selection αλγόριθμο. Ο

αλγόριθμος αυτός κατατάσσει κάθε επιλογή (στην περίπτωση μας κόμβο) βάση της επιθυμητότητας f_i , και στη συνέχεια αναθέτει μια νέα τιμή επιθυμητότητας, f_i' , βάση της θέσης κατάταξης που είχε το i . Ο ασθενέστερος, από άποψη επιθυμητότητας πιθανός κόμβος παίρνει τιμή 1, ο δεύτερος ασθενέστερος τιμή 2 και ούτω καθεξής. Ο καλύτερος κόμβος για επιλογή παίρνει τιμή J , $J=M$ όπου M ο αριθμός των κόμβων στο σύνολο πιθανών κόμβων που έχει επιλεγθεί (ανάλογα με την κατεύθυνση).

Η πιθανότητα επιλογής ενός κόμβου i είναι p_i , και είναι ίση με την νέα τιμή επιθυμητότητας του κόμβου διά της συνολικής νέας τιμής επιθυμητότητας, όπως φαίνεται και στην εξίσωση 2.4.

$$p_i = \frac{f_i'}{\sum_{j=1}^J f_i'} \quad (2.4)$$

Κεφάλαιο 3

Προσεγγίσεις πρωτοκόλλου Energy-aware Flock-CC

3.1 Βασική Ιδέα	41
3.2 Προσεγγίσεις Τροποποίησης Πρωτοκόλλου	43

3.1 Βασική Ιδέα

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα στο σχεδιασμό ενός WSN είναι η ενέργεια των κόμβων, μιας και όλες οι λειτουργίες τους (όπως επεξεργασία πακέτων, αίσθηση του μέσου) εξαρτώνται συνήθως κατ' εξοχή από φορητές πηγές ενέργειας (συνήθως μια ή δύο μπαταρίες). Η αλλαγή των πηγών ενέργειας τους είναι σχεδόν αδύνατη λόγω της φύσης του δικτύου, με αποτέλεσμα η αποτελεσματική χρήση της ενέργειας του κάθε κόμβου να είναι μια μετρική υψηλής προτεραιότητας. Το πρωτόκολλο Flock-CC, το οποίο είναι πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς με λειτουργίες επιπέδου δρομολόγησης, δεν λαμβάνει υπόψη για την δρομολόγηση των πακέτων και κατά συνέπεια ολόκληρου του σμήνους τον παράγοντα ενέργεια. Παρ' όλα αυτά είναι ένα πρωτόκολλο με πολύ καλά αποτελέσματα

και για αυτό το λόγο η εργασία αυτή θα επικεντρωθεί στην τροποποίηση του, ώστε να λαμβάνει υπόψη και την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων για την δρομολόγηση των πακέτων.

Όπως και στο πρωτόκολλο Flock-CC [1], έτσι και εδώ, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) αντιμετωπίζεται ως ένα τεχνικό οικοσύστημα, στο οποίο οι κόμβοι του δικτύου δημιουργούν πολλαπλά πακέτα τα οποία αποστέλλουν προς ένα καθολικό πόλο έλξης, τον κόμβο sink. Τα πακέτα δεδομένων δημιουργούν ένα σμήνος πακέτων, όπου κάθε πακέτο είναι ανάλογο με ένα πουλί σε ένα σμήνος. Το σμήνος πακέτων κατευθύνεται προς το sink αποφεύγοντας τα διάφορα εμπόδια, όπως περιοχές συμφόρησης και νεκρές ζώνες (περιοχές με νεκρούς κόμβους).

Το Flock-CC διέπεται από τέσσερις απλούς κανόνες, οι οποίοι συνοψίζονται πιο κάτω (εκτενής επεξήγηση στο Κεφάλαιο 2):

- *Κανόνας 1:* Κάθε πακέτο απωθείται από γειτονικά πακέτα τα οποία βρίσκονται σε κόμβους σε κοντινή απόσταση (π.χ. ένα hop μακριά από το πακέτο) εντός του οπτικού πεδίου (FoV) του πακέτου.
- *Κανόνας 2:* Κάθε πακέτο έλκεται από γειτονικά πακέτα τα οποία βρίσκονται σε κόμβους σε μεσαία απόσταση (π.χ. δύο hops μακριά από το πακέτο) εντός του οπτικού πεδίου (FoV) του πακέτου.
- *Κανόνας 3:* Κάθε πακέτο προσανατολίζεται και έλκεται από τον καθολικό πόλο έλξης κάτω από την επίδραση του περιβαλλοντικού μαγνητικού πεδίου.
- *Κανόνας 4:* Κάθε πακέτο βιώνει κάποια διαταραχή η οποία μπορεί να βοηθήσει ένα πακέτο στο να επιλέξει μια τυχαία διαδρομή (δηλαδή εναλλαγή μεταξύ εξερεύνησης νέων διαδρομών και αξιοποίησης υπάρχον διαδρομών).

Με τη συμπερίληψη της ενέργειας στο πρωτόκολλο Flock-CC θα προστεθεί ένας επιπρόσθετος κανόνας:

- *Κανόνας 5:* Κάθε πακέτο έλκεται από γειτονικούς κόμβους, οι οποίοι βρίσκονται εντός του οπτικού πεδίου (FoV) του πακέτου, και έχουν μεγάλο ποσοστό υπολειπόμενης ενέργειας.

Ο τρόπος με τον οποίο καθορίζεται η έλξη του κάθε πακέτου προς τους γειτονικούς κόμβους με περισσότερη υπολειπόμενη ενέργεια καθορίζεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε μια από τις πέντε προσεγγίσεις, οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά στο επόμενο υποκεφάλαιο.

3.2 Προσεγγίσεις Τροποποίησης Πρωτοκόλλου

Για την τροποποίηση του πρωτοκόλλου Flock-CC λήφθηκαν υπόψη πέντε διαφορετικές προσεγγίσεις για τη συμπερίληψη της ενέργειας. Οι προσεγγίσεις αυτές περιγράφονται αναλυτικά πιο κάτω, ενώ εκτενής μελέτη και πειραματική αξιολόγηση της κάθε προσέγγισης θα γίνει στο κεφάλαιο 4.

Όλες οι προσεγγίσεις έγιναν έχοντας υπόψη το γεγονός ότι η συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) παίρνει τιμές οι οποίες κινούνται από -1 μέχρι 1 (λόγω της κανονικοποίησης των δυνάμεων έλξης και απώθησης) και φυσικά είχαν ως στόχο την αύξηση της διάρκειας ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

3.2.1 Προσέγγιση 1

Στην πρώτη προσέγγιση έγινε αλλαγή στον τρόπο υπολογισμού της συνάρτησης επιθυμητότητας (desirability function), έτσι ώστε οι κόμβοι με μεγαλύτερη υπολειπόμενη ενέργεια να αυξάνουν την επιθυμητότητα τους προς τους γειτονικούς κόμβους, σε σχέση με τους κόμβους με μικρότερη υπολειπόμενη ενέργεια. Για να γίνει αυτό εφικτό, έγινε αλλαγή στον υπολογισμό της συνάρτησης επιθυμητότητας (προηγούμενος υπολογισμός της συνάρτησης επιθυμητότητας βρίσκεται στο υποκεφάλαιο 2.3.2.4, εξίσωση 2.1).

Ο νέος τρόπος υπολογισμού της συνάρτησης επιθυμητότητας σε αυτή την προσέγγιση φαίνεται στην πιο κάτω εξίσωση (εξίσωση 3.1), όπου κάθε στοιχείο $D_{nm}(k)$ του διανύσματος $\vec{D}_n(k)$ αντιπροσωπεύει πόσο επιθυμητός είναι ο κάθε γειτονικός κόμβος m , $m \in \{1, \dots, M\}$, στον κόμβο n την k -ιστή περίοδο.

$$D_{nm}(k) = (s_{nm}^{norm}(k) - q_{nm}^{norm}(k)) * e_{nm}^{norm}(k), \quad (3.1)$$

όπου,

$$e_{nm}^{norm}(k) = \frac{e_{nm}(k)}{E_m}, \quad (3.2)$$

- $e_{nm}(k)$ είναι η υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου m σε Joules,
- E_m είναι η αρχική ενέργεια του κόμβου m σε Joules

Η νέα αυτή παράμετρος $e_{nm}^{norm}(k)$ που εισάγεται στη συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) αντιπροσωπεύει το ποσοστό της υπολειπόμενης ενέργειας του κόμβου m και κατ' επέκταση την κανονικοποιημένη δύναμη έλξης που εξασκείται στον κόμβο n από τον κόμβο m , λόγω της υπολειπόμενης ενέργειας του m . Οι υπόλοιπες παράμετροι της συνάρτησης επιθυμητότητας (desirability function) επεξηγούνται σε προηγούμενο υποκεφάλαιο (στο 2.3.2.4).

Η συνάρτηση $e_{nm}^{norm}(k)$ παίρνει τιμές οι οποίες κυμαίνονται από 0 έως 1. Όταν $e_{nm}^{norm}(k) \rightarrow 1$, σημαίνει ότι ο κόμβος m έχει καταναλώσει πολύ μικρό ποσοστό από την ενέργεια του, και κατά συνέπεια έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, σε σχέση με κόμβους όπου $e_{nm}^{norm}(k) \rightarrow 0$, το οποίο σημαίνει ότι η ενέργεια του κόμβου m έχει τελειώσει ή έχει σχεδόν τελειώσει. Το πακέτο i που την k -ιοστή χρονική στιγμή βρίσκεται στον κόμβο n , έλκεται περισσότερο από κόμβους με μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας απ' ότι σε κόμβους με μικρότερο ποσοστό ενέργειας.

Με τον νέο ορισμό της συνάρτησης επιθυμητότητας (desirability function) συμπεριλαμβάνεται και η κανονικοποιημένη υπολειπόμενη ενέργεια του κάθε κόμβου m , $e_{nm}^{norm}(k)$, για τον υπολογισμό της τιμής επιθυμητότητας του m στον κόμβο n . Πιο συγκεκριμένα, πολλαπλασιάζεται η παλιά τιμή επιθυμητότητας του κάθε γειτονικού κόμβου m με την κανονικοποιημένη υπολειπόμενη ενέργεια του m . Με την αλλαγή αυτή επωφελούνται οι κόμβοι ο οποίοι έχουν μεγαλύτερο ποσοστό υπολειπόμενης ενέργειας. Για παράδειγμα αν οι κόμβοι x και y είχαν την ίδια τιμή επιθυμητότητας στο Flock-CC, έστω 0.5, τότε θα είχαν την ίδια πιθανότητα να επιλεγούν για να αποσταλεί το πακέτο δεδομένων. Σε αυτή την προσέγγιση όμως, εάν ο κόμβος x είχε ποσοστό υπολειπόμενης ενέργειας 0.8 και ο y είχε 0.4, τότε ο κόμβος x (που έχει μεγαλύτερη υπολειπόμενη

ενέργειας από τον y) θα έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να επιλεγεί ως ο επόμενος κόμβος για αποστολή του πακέτου δεδομένων (data packet).

Η συνάρτηση επιθυμητότητας συνεχίζει να παίρνει τιμές στο πεδίο $-1 \leq D_{nm}(k) \leq 1$, όπως και στο πρωτόκολλο Flock-CC [1].

3.2.2 Προσέγγιση 2

Η δεύτερη προσέγγιση που λήφθηκε υπόψη για την συμπερίληψη της ενέργειας στο πρωτόκολλο Flock-CC δεν τροποποιεί την συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) που υπάρχει στο Flock-CC, αλλά χρησιμοποιεί την ίδια, όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.3.2.4. Η τροποποίηση του πρωτοκόλλου σε αυτή την προσέγγιση γίνεται στο πρώτο από τα τρία στάδια του πρωτοκόλλου, δηλαδή στην επιλογή κατεύθυνσης που θα αποσταλεί το πακέτο i .

Στο πρωτόκολλο Flock-CC, το κάθε πακέτο i επιλέγει προς ποια κατεύθυνση θα κινηθεί (μπροστά, πλάγια ή πίσω). Για να παρθεί η απόφαση επιλογής της κατεύθυνσης που θα ακολουθήσει το πακέτο, θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστο ένας κόμβος στην συγκεκριμένη κατεύθυνση που να έχει διαθέσιμο χώρο στην ουρά του (για να φιλοξενήσει το πακέτο i). Η σειρά προτίμησης κατεύθυνσης σε φθίνουσα σειρά να είναι: μπροστά, πλάγια, πίσω. Δηλαδή ένα πακέτο που βρίσκεται στον κόμβο n ελέγχει πρώτα αν υπάρχει τουλάχιστο ένας κόμβος μπροστά (σε μικρότερη απόσταση από το sink) με διαθέσιμο χώρο στην ουρά του. Αν υπάρχει, τότε το πακέτο κινείται προς τα εμπρός, διαφορετικά γίνεται έλεγχος αν υπάρχει τουλάχιστο ένας κόμβος στα πλάγια (σε ίση απόσταση από το sink) που να έχει διαθέσιμο χώρο στην ουρά του. Αν υπάρχει, τότε το πακέτο κινείται προς τα πλάγια. Διαφορετικά το πακέτο κινείται προς τα πίσω (σε μεγαλύτερη απόσταση από το sink) αν υπάρχει τουλάχιστο ένας κόμβος που να έχει διαθέσιμο χώρο στην ουρά του.

Στη δεύτερη προσέγγιση, η αλλαγή που έχει γίνει στο πρωτόκολλο είναι να εισαχθεί μια επιπλέον συνθήκη για την επιλογή κατεύθυνσης που θα ακολουθήσει το πακέτο. Η συνθήκη αυτή είναι το ποσοστό της υπολειπόμενης ενέργειας των κόμβων στην συγκεκριμένη κατεύθυνση να είναι μεγαλύτερη από κάποιο ποσοστό. Το ποσοστό της υπολειπόμενης ενέργειας όλων των κόμβων που βρίσκονται μπροστά (σε μικρότερη

απόσταση) θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από ένα ποσοστό a για να κινηθεί προς τα εμπρός, ενώ για να κινηθεί προς τα πλάγια θα πρέπει το ποσοστό την υπολειπόμενης ενέργειας να είναι μεγαλύτερο από b . Ο αλγόριθμος για επιλογή κατεύθυνσης είναι ο εξής:

- Εάν υπάρχει τουλάχιστο ένας κόμβος μπροστά με ελεύθερο χώρο στην ουρά του και το ποσοστό της υπολειπόμενης ενέργειας όλων των κόμβων που βρίσκονται μπροστά είναι μεγαλύτερο από a , τότε το πακέτο θα κινηθεί προς τα εμπρός,
- Διαφορετικά, εάν υπάρχει τουλάχιστο ένας κόμβος πλάγια με ελεύθερο χώρο στην ουρά του και το ποσοστό της υπολειπόμενης ενέργειας όλων των κόμβων που βρίσκονται πλάγια είναι μεγαλύτερο από b , τότε το πακέτο θα κινηθεί προς τα πλάγια,
- Διαφορετικά, το πακέτο θα κινηθεί προς τα πίσω.

Η λογική πίσω από αυτή την προσέγγιση, είναι να μην καταναλωθεί πλήρως η ενέργεια στους κόμβους που βρίσκονται στην κατεύθυνση της κοντινότερης απόστασης από τους κόμβους-πηγές προς τον κόμβο sink, αλλά να υπάρξει μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους.

3.2.3 Προσέγγιση 3

Η τρίτη προσέγγιση είναι ένας συνδυασμός των πρώτων δύο προσεγγίσεων. Δηλαδή χρησιμοποιείται η τροποποιημένη συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) όπως φαίνεται στην πιο κάτω εξίσωση 3.3 και περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.2.1. Χρησιμοποιείται επίσης και η τροποποίηση όσο αφορά την επιλογή κατεύθυνσης που θα αποσταλεί το πακέτο i , όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.2.2.

$$D_{nm}(k) = (s_{nm}^{norm}(k) - q_{nm}^{norm}(k)) * e_{nm}^{norm}(k), \quad (3.3)$$

Στη προσέγγιση αυτή ο παράγοντας ενέργεια λαμβάνεται υπόψη με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος μέσω της συνάρτησης επιθυμητότητας, όπου με τον πολλαπλασιασμό του ποσοστού της υπολειπόμενης ενέργειας του κόμβου, οι κόμβοι με μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας είναι πιο επιθυμητοί. Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η ενέργεια είναι μέσω της επιλογής του συνόλου των κόμβων που θα ληφθούν υπόψη για την

προώθηση του πακέτου i από τον κόμβο n . Όπως περιγράφεται και στο 3.2.2, το πακέτο i για να κινηθεί προς τα εμπρός θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστο ένας κόμβος που να βρίσκεται μπροστά από τον κόμβο n (σε μικρότερη απόσταση από το sink) και να έχει διαθέσιμο χώρο στην ουρά του, καθώς επίσης και το ποσοστό της υπολειπόμενης ενέργειας του συνόλου των κόμβων που βρίσκονται μπροστά να είναι μεγαλύτερο από a . Διαφορετικά, για να κινηθεί προς τα πλάγια θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστο ένας κόμβος που να βρίσκεται πλάγια από τον κόμβο n (σε ίση απόσταση από το sink) και να έχει διαθέσιμο χώρο στην ουρά του, καθώς επίσης και το ποσοστό της υπολειπόμενης ενέργειας του συνόλου των κόμβων που βρίσκονται μπροστά να είναι μεγαλύτερο από b . Διαφορετικά το πακέτο θα κινηθεί προς τα πίσω (σε μεγαλύτερη απόσταση από το sink).

Η τρίτη αυτή προσέγγιση, η οποία συνδυάζει τις προηγούμενες δύο προσεγγίσεις, έχει ως σκοπό την μελέτη του κατά πόσο ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνικών συμπερίληψης της ενέργειας στο πρωτόκολλο μπορεί να το βελτιώσει.

3.2.4 Προσέγγιση 4

Η τέταρτη προσέγγιση που λήφθηκε υπόψη τροποποιεί την τιμή της επιθυμητότητας του κάθε κόμβου. Η συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) αποτελείται από τρεις περιπτώσεις και ανάλογα με την περίπτωση προστίθεται επιπλέον ένα μικρό ποσοστό της επιθυμητότητας. Η συνάρτηση επιθυμητότητας σε αυτή την προσέγγιση υπολογίζεται ως εξής:

$$D_{nm}(k) = \begin{cases} D'_{nm}(k) + D'_{nm}(k) * x, & e_{nm}^{norm}(k) > a \\ D'_{nm}(k) + D'_{nm}(k) * y, & e_{nm}^{norm}(k) > b \\ D'_{nm}(k), & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.4)$$

όπου,

$$D'_{nm}(k) = S_{nm}^{norm}(k) - q_{nm}^{norm}(k), \quad (3.5)$$

Σε αυτή την προσέγγιση, όπως και στη προσέγγιση 1 (υποκεφάλαιο 3.2.1), υπάρχει μια

δύναμη έλξης προς κόμβους με μεγάλο ποσοστό υπολειπόμενης ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με την ποσοστιαία αύξηση της τιμής επιθυμητότητας του κόμβου, εάν το ποσοστό της υπολειπόμενης ενέργειας είναι μεγαλύτερο από ένα ποσοστό. Συγκεκριμένα, όταν το υπολειπόμενο ποσοστό ενέργειας του γειτονικού κόμβου m είναι μεγαλύτερο από a , τότε προστίθεται επιπλέον το x ποσοστό της επιθυμητότητας, ενώ όταν το υπολειπόμενο ποσοστό ενέργειας είναι μεγαλύτερο από b , τότε προστίθεται επιπλέον το y ποσοστό της επιθυμητότητας. Διαφορετικά η τιμή της επιθυμητότητας παραμένει όσο θα ήταν και στο πρωτόκολλο Flock-CC, μιας και δεν υπάρχει κάποια επιπλέον προσθήκη. Έτσι, κόμβοι που έχουν μεγαλύτερο ποσοστό υπολειπόμενης ενέργειας, είναι προφανές ότι θα έχουν μεγαλύτερη τιμή επιθυμητότητας και κατά συνέπεια μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν.

Στην περίπτωση όπου η τιμή της συνάρτησης είναι μεγαλύτερη από 1, τότε αφαιρείται όση επιθυμητότητα χρειάζεται ώστε να έχει επιθυμητότητα να είναι ίση με μονάδα (1). Αυτό γίνεται ώστε οι τιμές της συνάρτησης $D_{nm}(k)$ να κυμαίνονται από -1 μέχρι 1, $-1 \leq D_{nm}(k) \leq 1$, όπως και στο πρωτόκολλο Flock-CC [1]. Με αυτή την αποκοπή που γίνεται σε όλες τις τιμές που είναι μεγαλύτερες από 1, ουσιαστικά δίνεται σε όλους τους γειτονικούς κόμβους που θα είχαν επιθυμητότητα μεγαλύτερη ή ίση με 1, η ίδια πιθανότητα επιλογής. Ενώ κανονικά κόμβοι με μεγαλύτερη επιθυμητότητα από 1 θα έπρεπε να έχουν και περισσότερες πιθανότητες επιλογής από κάποιον άλλον που θα έχει τιμή ακριβώς ίση με 1. Καλό θα ήταν σε μελλοντική εργασία, να μην γίνεται αποκοπή αλλά κανονικοποίηση όλων τιμών επιθυμητότητας, ώστε η μείωση να είναι ανάλογη των τιμών επιθυμητότητας όλων των γειτονικών κόμβων. Με αυτό τον τρόπο η πιθανότητα επιλογής κάποιου κόμβου να είναι ανάλογη την πραγματική τιμή επιθυμητότητας.

3.2.5 Προσέγγιση 5

Η πέμπτη και τελευταία προσέγγιση που λήφθηκε υπόψη, εισάγει μια νέα παράμετρο, την α , και τροποποιεί τη συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) ώστε να γίνει συναρτήση του α . Η παράμετρος αυτή, όπως μπορούμε να δούμε από την Εξίσωση 3.6, είναι στην πραγματικότητα η παράμετρος η οποία αλλάζει το βάρος της σημαντικότητας της ενέργειας με τις άλλες παραμέτρους του πρωτοκόλλου Flock-CC.

(3.5)

$$D_{nm}(k) = \alpha * (s_{nm}^{norm}(k) - q_{nm}^{norm}(k)) + (1 - \alpha) * e_{nm}^{norm}(k),$$

όπου,

- α είναι η μεταβλητή απόδοσης σημαντικότητας, η οποία παίρνει τιμές στο διάστημα $0 \leq \alpha \leq 1$.

Η διαφορά της προσέγγισης αυτής είναι ότι η συνάρτηση επιθυμητότητας μας επιτρέπει να θέσουμε το βάρος που θέλουμε να δώσουμε στο κάθε κομμάτι της νέας αυτής συνάρτησης, και κατά συνέπεια την σημαντικότητα κάθε μέρους του αθροίσματος. Από την μια, στην παλιά συνάρτηση δίνεται βάρος/σημαντικότητα α , ενώ στον παράγοντα ενέργεια, τον οποίο μελετούμε, δίνεται βάρος/σημαντικότητα $(1 - \alpha)$, δηλαδή η υπολειπόμενη σημαντικότητα (ή διαφορετικά βάρος).

Όταν $\alpha=0$, τότε θα ληφθεί υπόψη μόνο το δεύτερο μέρος του αθροίσματος, δηλαδή η επιθυμητότητα του κάθε γειτονικού κόμβου θα υπολογίζεται βάση της κανονικοποιημένης υπολειπόμενης ενέργειας του, $e_{nm}^{norm}(k)$. Στην περίπτωση όπου $\alpha=1$, θα λαμβάνεται υπόψη μόνο το πρώτο μέρος του αθροίσματος, δηλαδή οι δυνάμεις έλξης και απώθησης του Flock-CC. Αυτή η περίπτωση είναι ουσιαστικά το πρωτόκολλο Flock-CC, χωρίς τροποποιήσεις, όπως ορίστηκε στο [1]. Με το να κινείται η μεταβλητή α από μηδέν μέχρι 1, $0 \leq \alpha \leq 1$, η τιμή της συνάρτησης επιθυμητότητας $D_{nm}(k)$, συνεχίζει να κυμαίνεται από -1 μέχρι 1, $-1 \leq D_{nm}(k) \leq 1$, όπως και στο πρωτόκολλο Flock-CC [1].

Η διαφορά αυτής της προσέγγισης με την προσέγγιση 1 (υποκεφάλαιο 3.2.1) είναι ότι εδώ η τιμή επιθυμητότητας προκύπτει από το άθροισμα του βάρους της συνάρτησης επιθυμητότητας όπως ορίστηκε στο Flock-CC και του βάρους της υπολειπόμενης ενέργειας του γειτονικού κόμβου. Τα βάρη ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπληρώνουν το 100% του βάρους. Στην προσέγγιση 1 όμως, η τιμή της επιθυμητότητας του γειτονικού κόμβου ορίζεται ως η τιμή της επιθυμητότητας (όπως ορίζεται στο Flock-CC) με βάρος το ποσοστό της υπολειπόμενης ενέργειας. Δηλαδή, στην προσέγγιση 1 η τιμή της συνάρτησης επιθυμητότητας είναι η τιμή επιθυμητότητας με βάρος όσο το υπολειπόμενο ποσοστό ενέργειας του γειτονικού κόμβου.

Κεφάλαιο 4

Πειραματική αξιολόγηση

4.1 Τοπολογία	51
4.2 Σενάρια	53
4.3 Παράμετροι Προσομοίωσης Σεναρίων	54
4.4 Μετρικές Αξιολόγησης	55
4.5 Πειραματική Αξιολόγηση	59

Οι πέντε προσεγγίσεις, οι οποίες περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, υλοποιήθηκαν στον προσομοιωτή ns2.31 [31], από όπου πάρθηκαν και οι μετρήσεις για την πειραματική αξιολόγηση. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί αρχικά η τοπολογία και στη συνέχεια τα σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των τεσσάρων προσεγγίσεων. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που δόθηκαν στο κάθε σενάριο και έπειτα παρουσιάζονται οι μετρικές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την αξιολόγηση των προσεγγίσεων όσο και για τη σύγκριση με το πρωτόκολλο Flock-CC, όπως αυτό

παρουσιάστηκε στο [1]. Στο υπόλοιπο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, οι συγκρίσεις και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων της πειραματικής αξιολόγησης.

4.1 Τοπολογία

Η τοπολογία του ασύρματου δικτύου αποτελείται από 300 κόμβους (nodes), τοποθετημένοι σε 2D πλέγμα, σε περιοχή που καλύπτει $400 \times 800 \text{ m}^2$. Η τοπολογία θα είναι όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια απόσταση με τους γειτονικούς τους κόμβους ($25 \cdot \sqrt{2} \text{m}$), και είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε ο κάθε κόμβος να έχει το πολύ 8 κόμβους που να απέχουν ένα άλμα (hop). Όλοι οι κόμβοι είναι ομογενείς και πανομοιότυποι σε υλικό και λογισμικό. Το φάσμα διάδοσης (radio propagation range) κάθε κόμβου είναι 50m. Τα πακέτα ελέγχου (control packets) έχουν μέγεθος 10 bytes ενώ τα πακέτα δεδομένων (data packet) 50 bytes.

Χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο CSMA-based IEEE 802.11 MAC protocol, με πολιτική εκθετικού χρόνου back-off, έχοντας την ανταλλαγή πακέτων RTS/CTS απενεργοποιημένη για σκοπούς εξοικονόμησης ενέργειας. Το transmission rate που χρησιμοποιήθηκε είναι 2Mbps.

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές τιμές κατανάλωσης ενέργειας που θα χρειαζόταν ένα κόμβος-αισθητήρας για την διεκπεραίωση των λειτουργιών του, ώστε τα αποτελέσματα να πλησιάζουν όσο περισσότερο γίνεται την πραγματικότητα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο εμπορικός αισθητήρας MICAz (Σχήμα 4.1) της εταιρείας MEMSIC [32]. Στα χαρακτηριστικά του αισθητήρα δίνεται η ένταση για την κάθε κατάσταση του κόμβου (idle mode, receiving mode, transmitting mode), όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Ο προσομοιωτής ns-2 όμως για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας για την κάθε μια από αυτές τις καταστάσεις χρειάζεται την τιμή για την ισχύ. Για την μετατροπή χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος, χρησιμοποιώντας ως τάση $V=3\text{Volts}$ που είναι η τυπική τάση για δύο μπαταρίες AA.

$$P(\text{Watt}) = I(\text{Ampere}) * V(\text{Volt})$$

Receive Mode	19.7 mA
Transmit Mode (για 0dBm)	17.4 mA
Idle Mode	20 μ A

Πίνακας 4.1: Ισχύ για κάθε κατάσταση του αισθητήρα MICAz της MEMSIC

Από τον τύπο μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια που ο κόμβος είναι αδρανής (idle mode) είναι 60 μ W, κατά τη διάρκεια που παραλαμβάνει (receiving mode) είναι 59,1mW, και κατά τη διάρκεια που αποστέλλει (transmitting mode) είναι 52,2mW. Ο αισθητήρας MICAz μπορεί να εξοπλιστεί με δύο μπαταρίες AA οι οποίες μπορούν να δώσουν 9360Joules η κάθε μια [33], αν είναι αλκαλικές. Λόγω όμως υπολογιστικών περιορισμών, έχει δοθεί λιγότερη ενέργεια για να μπορέσει να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του δικτύου όταν ξεκινήσουν να πεθαίνουν κόμβοι, αλλά και για να μελετηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Στον κάθε αισθητήρα στην αρχή του κάθε σεναρίου δίνεται αρχική ενέργεια 0,5 Joules, ενώ στο sink node δίνεται αρχική ενέργεια 10.000 Joules (δηλαδή περίπου όση η ενέργεια μιας αλκαλικής μπαταρίας AA).



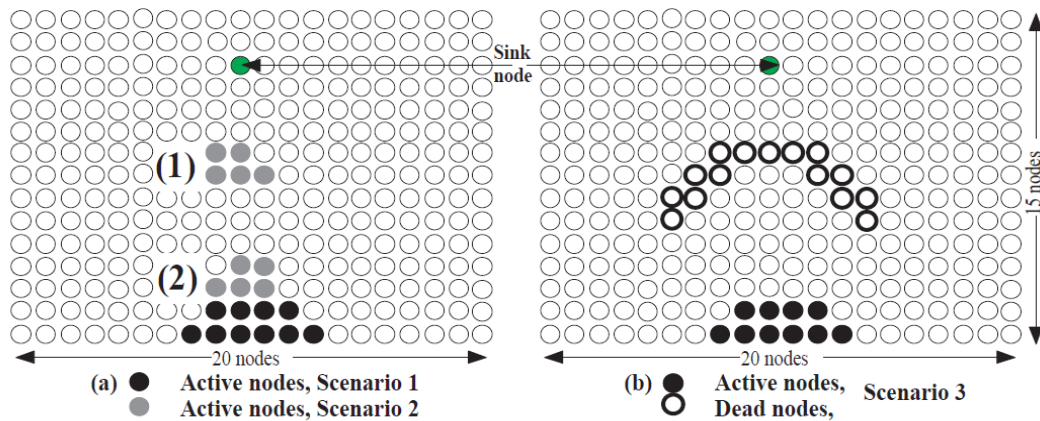
Σχήμα 4.1: Αισθητήρας MICAz

Σημείωση: Για την κατανάλωση ενέργειας υπόψη λήφθηκε μόνο η ενέργεια που καταναλώνει ο αισθητήρας για τον ραδιο-πομποδέκτη (radio frequency transceiver), λόγω της φύσης του προσομοιωτή ns2.

4.2 Σενάρια

Συνολικά θα ερευνηθούν τέσσερα σενάρια για να αξιολογηθούν οι προσεγγίσεις, των οποίων ο χρόνος προσομοίωσης καθορίστηκε στα 3500 δευτερόλεπτα. Πιο συγκεκριμένα τα σενάρια έχουν ως εξής:

Σενάριο 1: Προσομοιώνει το φαινόμενο της συμφόρησης και περιλαμβάνει 10 κόμβους που αποστέλλουν πακέτα (source nodes) οι οποίοι είναι κοντά ο ένας στον άλλο, και αναπαριστούνται ως οι μαυρισμένοι κύκλοι στο μέσο κάτω μέρος του Σχήματος 4.2(α). Οι κόμβοι αυτοί ξεκινούν να στέλλουν πακέτα σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή (περίπου στα 10 δευτερόλεπτα), προκαλώντας συμφόρηση λόγω και της κοντινής απόστασης μεταξύ τους.



Σχήμα 4.2: Τοπολογία με 300 κόμβους με τρία σενάρια: (α) Σενάριο 1 έχει ως ενεργούς κόμβους τους μαυρισμένους κύκλους, Σενάριο 2 έχει ως ενεργούς κόμβους τους γκριζούς κύκλους, αρχικά τους 5 κόμβους από το σετ 1 και αργότερα τους 5 κόμβους από το σετ 2, (β) Σενάριο 3 με 10 ενεργούς κόμβους (μαυρισμένοι) και ανενεργούς τους κόμβους με μαυρισμένο περίγραμμα.

Σενάριο 2: Το δεύτερο σενάριο προσομοιώνει περιοδικά φαινόμενα συμφόρησης. Αρχικά ξεκινούν να στέλλουν πακέτα οι 5 γκριζοί κόμβοι σετ 1 (κοντά στο sink node) στο Σχήμα 4.2(α) στα 10s, δημιουργώντας hotspot στην περιοχή μεταξύ αυτών των κόμβων και του sink. Σε κάποια μετέπειτα χρονική στιγμή ξεκινούν να στέλνουν πακέτα και το σετ 2 των γκριζών κόμβων τη χρονική στιγμή $t = 50s$. Στη χρονική στιγμή $t = 70s$, οι κόμβοι του σετ 1 σταματούν να στέλνουν πακέτα. Με αυτό το σενάριο μπορεί να προσομοιωθεί η ικανότητα των πακέτων να αποφεύγουν τα hotspots κάνοντας μανούβρες.

Σενάριο 3: Στο σενάριο αυτό προσομοιώνεται η περίπτωση όπου χάσουμε ένα σύνολο κόμβων. Αρχικά, στα 10s, οι μαυρισμένοι κόμβοι, στο κάτω μέρος του Σχήματος 4.2(β), ξεκινούν να στέλνουν πακέτα (όπως και στο πρώτο σενάριο). Στη χρονική στιγμή $t = 40s$ οι πιο κόμβοι με πιο έντονα μαυρισμένο περίγραμμα στο κέντρο του δικτύου “πέφτουν”, δηλαδή γίνονται ανενεργοί. Αυτό το σενάριο θα καταδείξει τη δυνατότητα των πακέτων να αποφεύγουν μια νεκρή ζώνη ακόμη και αν τα πακέτα θα μπορούσαν να παγιδευτούν μέσα σε αυτή.

4.3 Παράμετροι Προσομοίωσης Σεναρίων

Το κάθε ένα από τα πιο πάνω σενάρια παίρνουν πέντε παραμέτρους για την προσομοίωσή τους στο ns2.31. Οι παράμετροι είναι οι ακόλουθοι:

- η μεταβλητή διασποράς (spreading value) ξ ,
- ο ρυθμός μετάδοσης πακέτων δεδομένων (packet data rate)
- η περίοδος T , και
- το σενάριο που θα χρησιμοποιηθεί

Η μεταβλητή διασποράς ξ επιλέχθηκε να κυμαίνεται από 0 μέχρι 1, επιτρέποντας τον πειραματισμό από μηδενική εξάπλωση σε ευρεία εξάπλωση του σμήνους πακέτων και συγκεκριμένα οι τιμές που δόθηκαν για αυτή την παράμετροι είναι 0, 0.25, 0.5, 0.75 και 1.

Σε όλα τα σενάρια, εξετάστηκαν τρία διαφορετικά φορτία κυκλοφορίας (traffic loads): χαμηλό, υψηλό και ακραίο. Κάθε κόμβος αφήνεται να δημιουργεί σταθερού ρυθμού δεδομένα (CBR – Constant Bit Rate) με είτε 25 (χαμηλό φορτίο – low) ή 35 (υψηλό φορτίο - high) ή 45 (ακραίο φορτίο - extreme) πακέτα ανά δευτερόλεπτο (pkts/s) όταν ενεργοποιηθεί από ένα συμβάν (event). Σε κάθε σενάριο, όλοι οι κόμβοι έστελναν με τον ίδιο ρυθμό.

Ο χρόνος ανάμεσα στα διαδοχικά πακέτων ελέγχου (control packets), η περίοδος δειγματοληψίας T (sampling period), ορίστηκε να είναι 0.5, 1.0, 1.5 και 2.0 δευτερόλεπτα σε όλες τις προσεγγίσεις. Από την μια, η επιλογή του T να είναι μικρότερη ή ίση με 2 δευτερόλεπτα βασίστηκε στην επιθυμία να διατηρηθεί σε ψηλά επίπεδα η ανταπόκριση στις αλλαγές της κατάστασης του δικτύου. Από την άλλη, δεν θα ήταν επιθυμητό να γεμίσει το δίκτυο με πακέτα ελέγχου (control packets), οπότε το T επιλέχθηκε να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από 0.5 δευτερόλεπτα. Το T_{lost} ορίστηκε να είναι ίσο με $3T$.

Τέλος, σε κάθε προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ένα από τα τρία σενάρια που περιγράφηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο 4.2.

4.4 Μετρικές Αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση των προσεγγίσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες μετρικές (οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και στο Flock-CC protocol [1]) με σκοπό τον καθορισμό του πιο κατάλληλου πρωτοκόλλου:

Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio - PDR): είναι ο συνολικός αριθμός πακέτων δεδομένων που παραλήφθηκαν από τον κόμβο sink δια τον αριθμό των πακέτων που δημιουργήθηκαν από τους κόμβους πηγές (source nodes) κατά τη διάρκεια του σεναρίου.

Μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end delay): καθορίζεται από το μέσο χρόνο που χρειάζεται ένα πακέτο δεδομένων για να ταξιδέψει από τον κόμβο που το δημιούργησε στο sink node. Αν σε κάποιο σημείο του δικτύου το πακέτο σταλεί ξανά (retransmissions) η επιπλέον καθυστέρηση συμπεριλαμβάνεται σε αυτό στη μέση καθυστέρηση end-to-end. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται σε σχέση με όλα τα πακέτα που κατάφεραν να φτάσουν στο sink node κατά τη διάρκεια του σεναρίου, ενώ όσα πακέτα χάθηκαν είτε λόγω συγκρούσεων (wireless channel collisions) είτε λόγω buffer drops, ο χρόνος τους δεν συμπεριλαμβάνεται.

Η μέση καθυστέρηση end-to-end είναι:

$$MK = \frac{\sum_{i=1}^{Pr} (T_r^i - T_s^i)}{Pr} \quad (4.1)$$

όπου Pr είναι ο αριθμός των πακέτων που παραλήφθηκαν στο sink node, T_r^i είναι ο χρόνος που το κάθε πακέτο i παραλήφθηκε στο sink node και T_s^i είναι ο χρόνος που στάλθηκε από το source node.

Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy tax): η μετρική αυτή καθορίζει τη μέση κατανάλωση ενέργειας ανά κόμβο ανά παραδοτέο πακέτο δεδομένων και μετρείται σε mJoules/παραδοτέο πακέτο στο sink.

$$\text{Energy tax} = \frac{\sum_{i=1}^N (E_c^i)}{N \times Pr} \quad (4.2)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των κόμβων του δικτύου και E_c^i είναι η ενέργεια που καταναλώθηκε σε κάθε κόμβο i καθ' όλη τη διάρκεια του σεναρίου.

Διάρκεια ζωής δικτύου αισθητήρων (Lifetime of Sensor Network): η μετρική αυτή δεν ορίζεται στο [1], όμως είναι απαραίτητη σε αυτή την περίπτωση λόγω του ότι γίνεται μελέτη με σκοπό την αύξηση της διάρκειας ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Για τον καθορισμό της διάρκειας ζωής του δικτύου αισθητήρων θα χρησιμοποιηθεί η μετρική που χρησιμοποιείται και στο [34] για τη διάρκεια ζωής του ασύρματου δικτύου (Θα χρησιμοποιηθεί μόνο η πρώτη συνθήκη για τη διάρκεια ζωής του [34]).

Διάρκεια ζωή τους WSN καθορίζεται ως η μικρότερη χρονική στιγμή i κατά την οποία θα ισχύσει η πιο κάτω συνθήκη:

$$LFT = \min i \quad (4.3)$$

$$i = \mathcal{L}(i - 1) > L(i) \text{ \& and } \mathcal{L}(i + 1) = \mathcal{L}(i)$$

όπου,

- LFT , είναι η χρονική στιγμή η οποία καθορίζει τη διάρκεια ζωής του δικτύου (lifetime),
- $\mathcal{L}$, είναι η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής των αισθητήρων του δικτύου (RLSN – Remaining Lifetime Sensor Network)

και,

$$\mathcal{L} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{d_j^2} L(j) \quad (4.4)$$

όπου,

- d_j , είναι η απόσταση του κόμβου j από τον κόμβο sink σε άλματα (hops)
- $L(j)$, είναι η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του ανεξάρτητου κόμβου j (RLIS – Remaining Lifetime of Individual Sensor)
- N , είναι ο αριθμός των κόμβων του δικτύου

Η συνθήκη ικανοποιείται τη μικρότερη χρονική στιγμή κατά την οποία η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρων σταθεροποιηθεί. Για να υπολογιστεί η τιμή αυτή θα πρέπει να αθροίσουμε την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής L του κάθε ανεξάρτητου κόμβου j στο δίκτυο, επί το βάρος του κόμβου j , το οποίο είναι το $\frac{1}{d_j^2}$.

Η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής ενός ανεξάρτητου κόμβου (RLIS) j υπολογίζεται ως εξής:

$$L(j) = \frac{E(i-1) - E(i)}{E_{jinit}} \quad (4.5)$$

όπου,

- $E(i)$, είναι η υπολειπόμενη ενέργεια του κόμβου j τη χρονική στιγμή i ,
- E_{jinit} , είναι η αρχική ενέργεια του κόμβου j

Δηλαδή η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής ενός ανεξάρτητου κόμβου (RLIS) είναι το ποσοστό της ενέργειας που καταναλώθηκε μεταξύ των χρονικών στιγμών $i-1$ και i .

Κάλυψη Δικτύου: Κάλυψη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων υπάρχει όταν ένα ικανοποιητικό μέρος της τοπολογίας καλύπτεται από τουλάχιστο ένα κόμβο, ο οποίος μπορεί να παίρνει μετρήσεις από τον χώρο που καλύπτει η εμβέλεια του πομποδέκτη του.

Για τον καθορισμό αυτής της μετρικής, θα θεωρήσουμε ότι η κάλυψη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων σταματά να υφίσταται τη μικρότερη χρονική στιγμή κατά την οποία η κάλυψη θα πέσει κάτω από ένα ποσοστό θ , όπως φαίνεται στην εξίσωση 4.6

$$Cov(i-1) > \theta \text{ and } Cov(i) \leq \theta \quad (4.6)$$

- Cov , είναι η κάλυψη του δικτύου, η οποία ορίζεται ως το ποσοστό των ενεργών κόμβων (από τον συνολικό αρχικό αριθμό κόμβων του δικτύου)

Η συνθήκη της εξίσωσης 4.6 ικανοποιείται τη μικρότερη χρονική στιγμή κατά την οποία το ποσοστό των ενεργών κόμβων γίνει κάτω από θ , ή σε αντιστοιχία πεθαίνει το $1-\theta$ ποσοστό των κόμβων.

Στην παρούσα διπλωματική το θ έχει καθοριστεί στο 30% (άρα $1-\theta=70\%$), δηλαδή δεν υπάρχει κάλυψη του δικτύου όταν πεθαίνει το 70% του συνολικού αριθμού των κόμβων του δικτύου. Έχει καθοριστεί αυτό το ποσοστό γιατί αν σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων έχει πεθάνει περισσότερο από 70% των κόμβων, τότε θα μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις

από πολύ μικρό κομμάτι του δικτύου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις που θα έχουμε να μην αντικατοπτρίζουν την πραγματική κατάσταση του δικτύου καθιστώντας το δίκτυο μη επαρκές.

4.5 Πειραματική Αξιολόγηση

Στις γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται στα υποκεφάλαια που ακολουθούν δείχνουν τα αποτελέσματα κάθε προσέγγισης σύμφωνα με τις μετρικές οι οποίες λήφθηκαν υπόψη, και περιγράφηκαν πιο πριν. Όπου δεν διευκρινίζεται ρητώς, τα αποτελέσματα αφορούν ρυθμό αποστολής πακέτων δεδομένων (packet delivery ratio – PDR) 35 πακέτα το δευτερόλεπτο (35pkts/s), δηλαδή υψηλό φορτίο (high traffic load). Οι παρατηρήσεις για χαμηλό και ακραίο φορτίο είναι παρόμοιες και συνεπώς στις πλείστες των περιπτώσεων παραλείπονται.

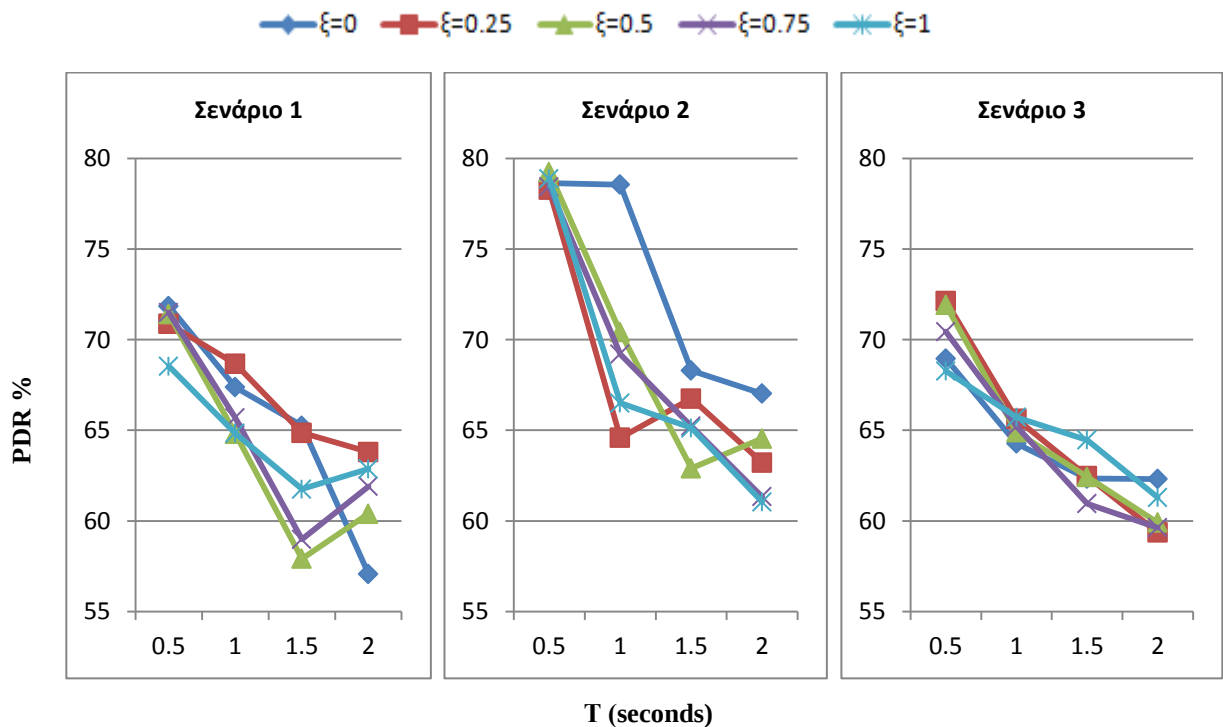
Να σημειωθεί ακόμη, ότι τα αποτελέσματα πάρθηκαν για χρόνο προσομοίωσης 3500 δευτερόλεπτα, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του δικτύου καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του δικτύου καθώς και τα αποτελέσματα της κάθε προσέγγισης.

4.5.1 Πρωτόκολλο Flock-CC

Ακολουθεί η πειραματική αξιολόγηση του πρωτοκόλλου Flock-CC, όπως αυτό προτάθηκε στο [1], ξεκινώντας από την παρατήρηση των γραφικών παραστάσεων για το Ποσοστό των Παράδοσης Πακέτων (PDR).

Η πρώτη παρατήρηση η οποία πρέπει να σημειωθεί είναι το μειωμένο Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) σε σχέση με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο [1] (αλλά και γενικά τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς χειρότερα). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι προσομοιώσεις εδώ έτρεχαν για περισσότερο χρονικό διάστημα και πολλοί από τους κόμβους πέθαιναν λόγω έλλειψης μπαταρίας, δημιουργώντας νεκρές ζώνες στην τοπολογία του δικτύου. Στις προσομοιώσεις στο [1], το PDR κυμαινόταν μεταξύ 65%-95% για όλα τα σενάρια, ενώ εδώ κυμαίνεται από 55% μέχρι 80%.

Στο σενάριο 2, τα φαινόμενα συμφόρησης είναι μειωμένα σε σχέση με τα σενάρια 1 και 3, μιας και υπάρχουν δύο περιοχές όπου ανιχνεύουν ένα γεγονός αλλά με μικρότερο αριθμό κόμβων η κάθε μια. Λόγω του ότι υπάρχουν κόμβοι που βρίσκονται πιο κοντά στον κόμβο sink από ότι στα άλλα δύο σενάρια, αναμένεται και ο μέσος χρόνος καθυστέρησης να είναι μειωμένος στο σενάριο 2. Από την άλλη, στα σενάρια 1 και 3 υπάρχει μια μεγαλύτερη περιοχή εντοπισμού του γεγονότος, και κατά συνέπεια παρατηρούνται πιο έντονα φαινόμενα συμφόρησης. Έτσι μπορούμε να δούμε ότι το PDR στο σενάριο 2 έχει μέχρι και 10% μεγαλύτερο ποσοστό σε σύγκριση με τις αντίστοιχες παραμέτρους των άλλων δύο σεναρίων.

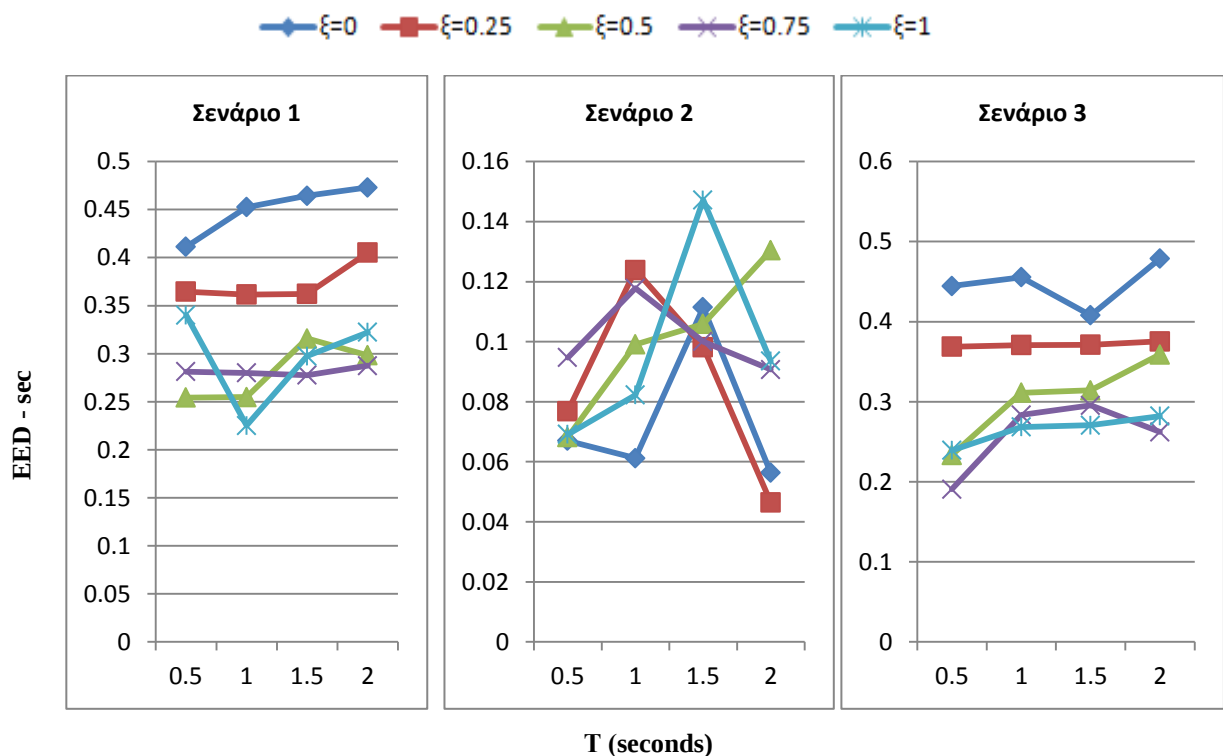


Σχήμα 4.3: Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio – PDR) για το Πρωτόκολλο Flock-CC με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Για όλες τις τιμές του ξ παρατηρείται μείωση στο ποσοστό παράδοσης πακέτων (PDR) όσο αυξάνεται ο χρόνος περιόδου T. Κατά κύριο λόγο αυτό οφείλεται στο ότι όταν η περίοδος T κρατείται σε μικρές τιμές, οι μηχανισμοί του πρωτοκόλλου λειτουργούν πιο αποδοτικά μιας και η κατάσταση του δικτύου ενημερώνεται συχνά. Σε αντίθετη περίπτωση, όσο το T

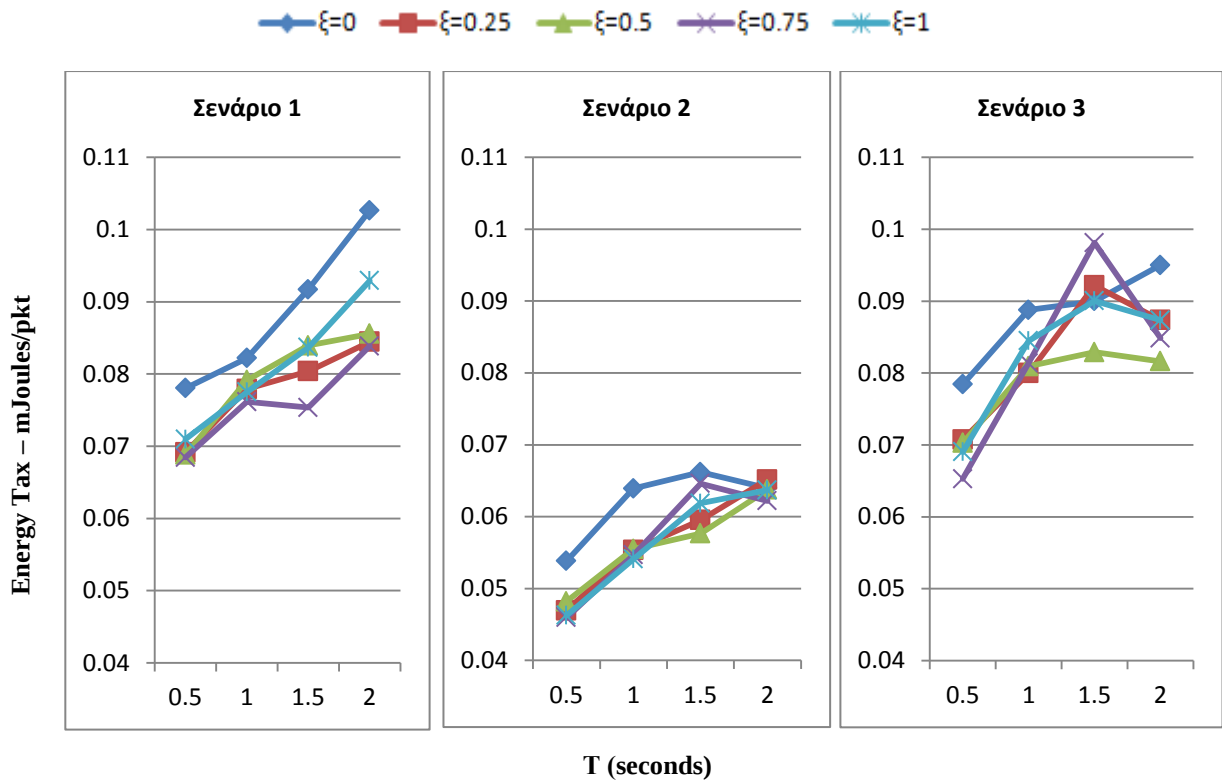
μεγαλώνει, οι κόμβοι στέλνουν τα πακέτα δεδομένων τους μέσα στο ίδιο T, με μεγάλη πιθανότητα στους ίδιους κόμβους (μιας και δεν αλλάζει η επιθυμητότητα των κόμβων), χωρίς να εξετάζεται η κατάσταση του δικτύου ή το ποσοστό πληρότητας των κόμβων. Έτσι γίνεται κατανοητή και η τάση μείωσης του PDR όσο το T μεγαλώνει στα σενάρια.

Από τις γραφικές παραστάσεις των τριών σεναρίων για την Μέση Καθυστέρηση από Άκρο-σε-Άκρο (End-to-End Delay – EED) για το πρωτόκολλο Flock-CC, μπορούμε να δούμε ότι η μέση καθυστέρηση για να φτάσει ένα πακέτο δεδομένων από τον κόμβο-πηγή (source node) στον κόμβο sink στο σενάριο 2 είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με τα σενάρια 1 και 3, όπως ήταν και αναμενόμενο. Ας μην ξεχνάμε πρώτο ότι στο σενάριο 2 υπήρχαν δύο μικρές περιοχές hotspots αποτελούμενες από 5 κόμβους η κάθε μια, δημιουργώντας μικρότερης έντασης συμφόρηση, και δεύτερο ότι υπάρχουν κόμβοι-πηγές σε πιο κοντινή απόσταση από ότι στα άλλα δύο σενάρια. Για όλες τις τιμές του ξ εκτός από $\xi=0.5$, παρατηρείται μια αυξομείωση στον μέσο χρόνο καθυστέρησης (EED) του σεναρίου 2.



Σχήμα 4.4: Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay – EED) για το Πρωτόκολλο Flock-CC με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

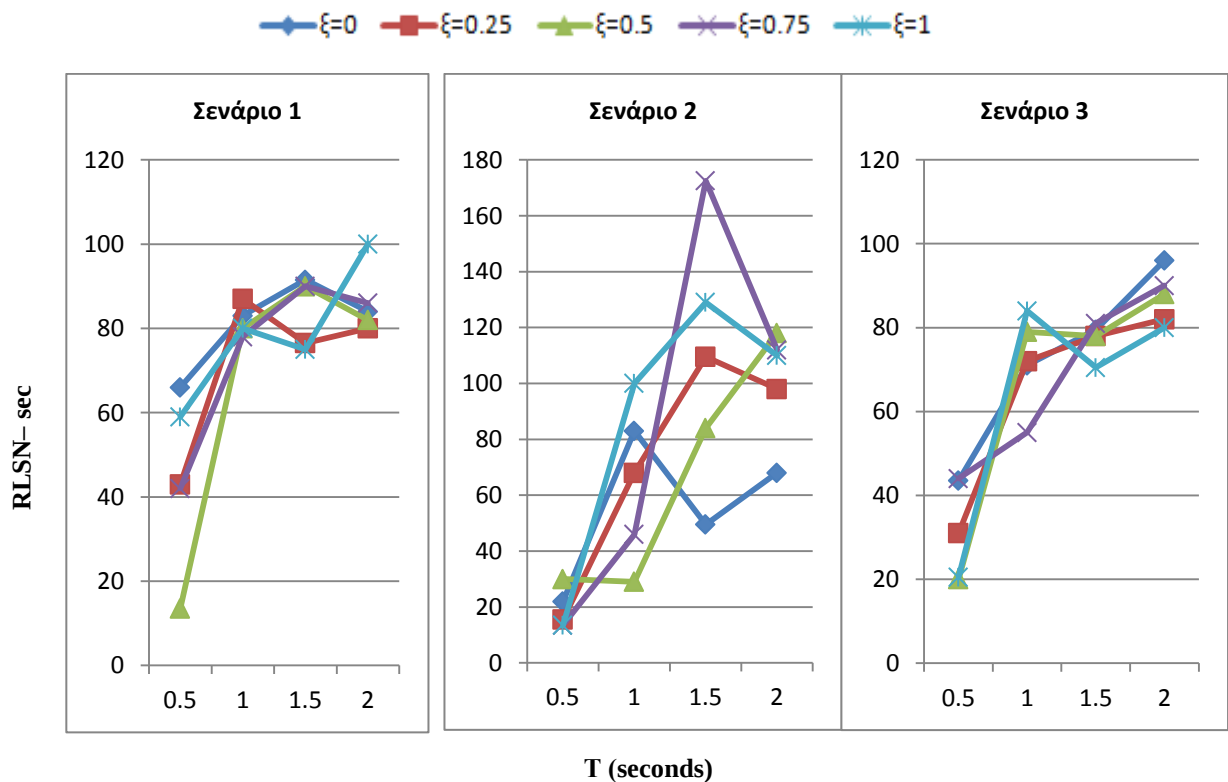
Αντίθετα, στα σενάρια 1 και 3, τα οποία έχουν παρόμοια συμπεριφορά στα αντίστοιχα ξ και T , παρατηρούμε μια πιο σταθερή συμπεριφορά όσο αφορά την καθυστέρηση. Τους χειρότερους χρόνους του πήραμε για αυτή την μετρική, σε αυτά τα δύο σενάρια, είναι για $\xi=0$ και $\xi=0.25$, με χειρότερο από τα δύο το πρώτο. Για τις άλλες δύο τιμές του T τα αποτελέσματα είναι παρόμοια.



Σχήμα 4.5: Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για το Πρωτόκολλο Flock-CC με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Στις πιο πάνω γραφικές παραστάσεις (Σχήμα 4.5) μπορούμε να παρατηρήσουμε τη Μέση Κατανάλωση Ενέργειας σε mJoules ($10^{-3} * Joules$) που χρειάζεται για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων στον κόμβο sink (από τον κόμβο-πηγή). Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι η μικρότερη μέση ενέργεια που χρειάζεται για την αποστολή πακέτου δεδομένων παρατηρείται στο σενάριο 2, για όλους τους συνδυασμούς τιμών των T και ξ , δεδομένου ότι οι μισοί κόμβοι-πηγές βρίσκονται πιο κοντά στο sink.

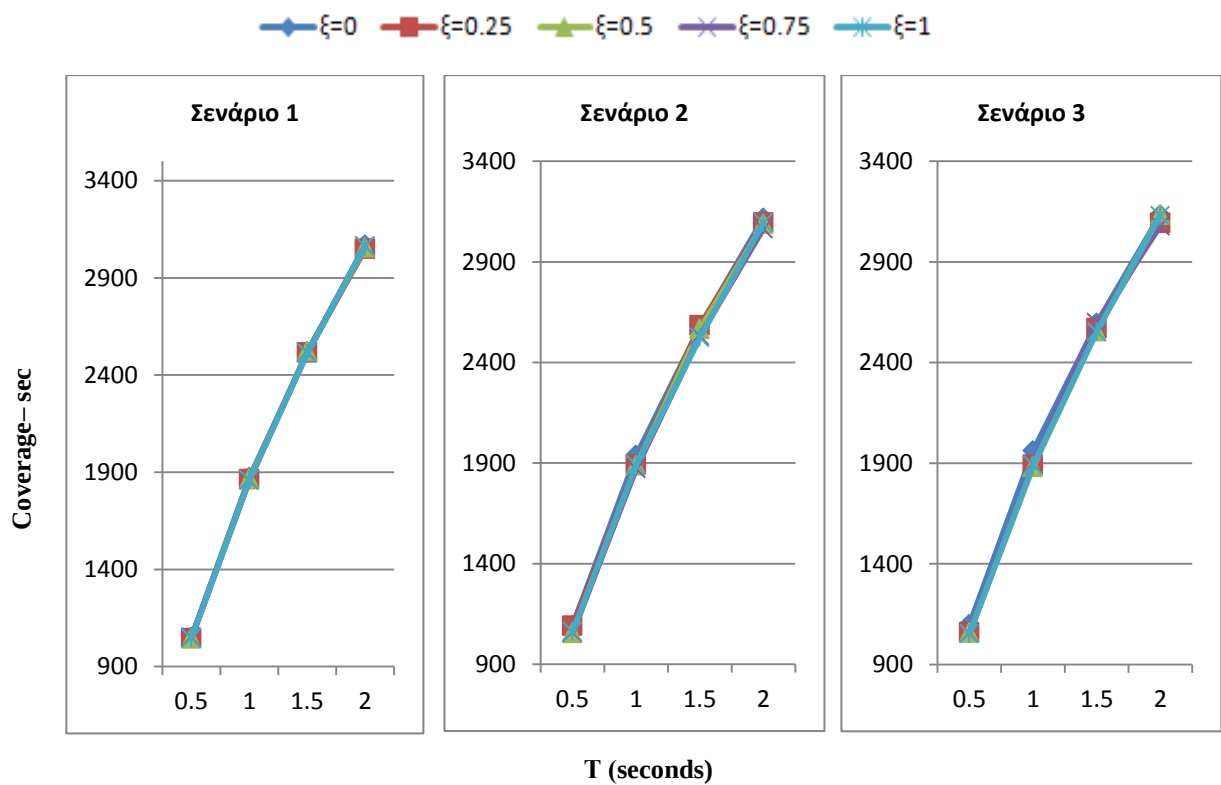
Στο σενάριο 1, μπορούμε να δούμε ότι η μέση ενέργεια που χρειάζεται για την αποστολή πακέτου δεδομένων στο sink για $\xi=0$, είναι μεγαλύτερη από ότι για τις υπόλοιπες τιμές του ξ . Η διαφορά αυτή δεν υπερβαίνει το 0,02 mJoules/pkt. Αυτή η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας παρατηρείται λόγω της συνεκτικής κίνησης των πακέτων δεδομένων προς το sink, χρησιμοποιώντας κατά κύριο λόγο το κοντινότερο μονοπάτι δημιουργώντας έτσι πολλές συγκρούσεις στο ασύρματο μέσο. Συνέπεια αυτής της κατάστασης είναι να γίνονται οι αποστολές των πακέτων ξανά (retransmissions), λόγω του ότι βασίζεται σε πρωτόκολλο CSMA (Carrier Sense Multiple Access protocol), αυξάνοντας την κατανάλωση ενέργειας των εμπλεκόμενων κόμβων.



Σχήμα 4.6: Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (Remaining Lifetime of Sensor Networks – RLSN) για το Πρωτόκολλο Flock-CC με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Στο Σχήμα 4.6 πιο πάνω, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου για το σενάριο 2 είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα δύο άλλα σενάρια, μιας και

είναι το σενάριο με τα πιο ήπια φαινόμενα συμφόρησης. Πιο συγκεκριμένα η μεγαλύτερη υπολειπόμενη διάρκεια ζωής για το σενάριο 2 τη συναντούμε για $T=1.5$ δευτερόλεπτα και $\xi=0.75$. Με αυτό τον συνδυασμό T και ξ φαίνεται να βελτιστοποιείται η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του ασύρματου δικτύου, δηλαδή το πόσο να έλκεται ένα πακέτο από ανενεργούς κόμβους (idle nodes), και την περίοδο T που θα πρέπει να έχει το δίκτυο. Τα άλλα δύο σενάρια, 1 και 3, έχουν πιο μικρές τιμές σε σχέση με το σενάριο 2, ενώ για $T=0.5$, η κατάσταση του δικτύου σταθεροποιείται πολύ σύντομα και στα τρία σενάρια.



Σχήμα 4.7: Κάλυψη Ασύρματου Δικτύων Αισθητήρων (Coverage) για το Πρωτόκολλο Flock-CC με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

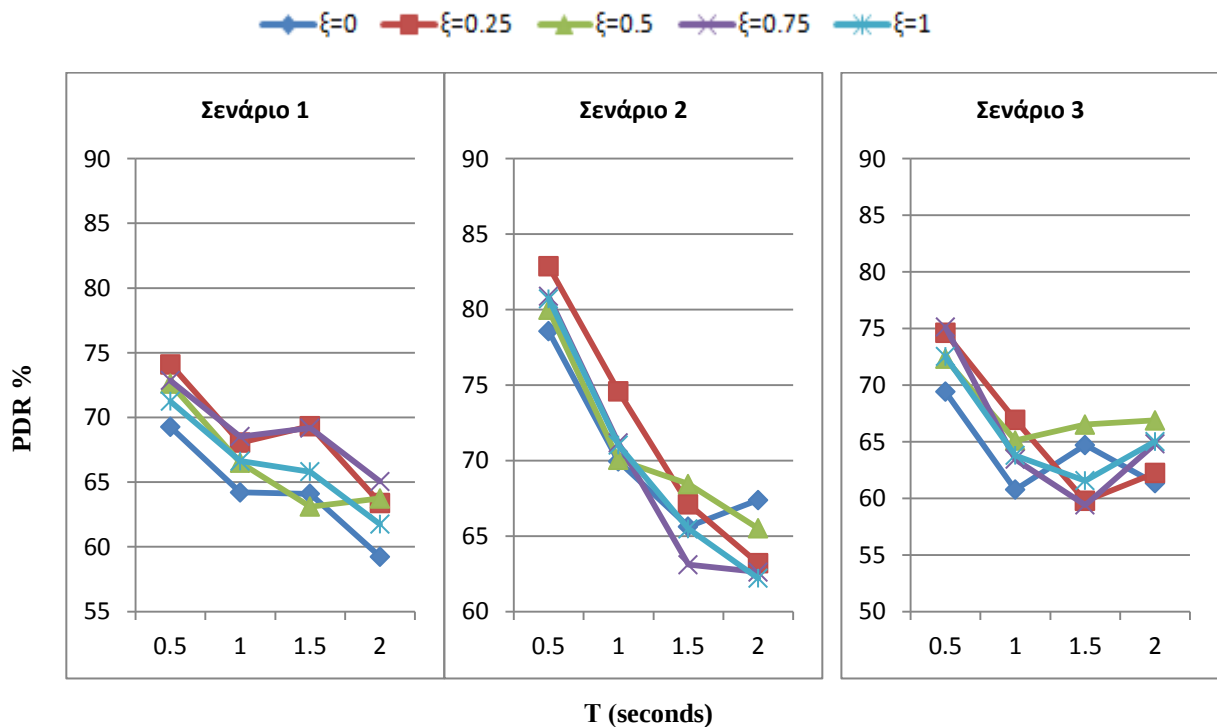
Στις γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 4.7, βλέπουμε την χρονική στιγμή κατά την οποία δεν υπάρχει επαρκής κάλυψη του δικτύου (πεθάνουν 70% των κόμβων). Μπορούμε να δούμε ξεκάθαρα ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις τιμές για τα διάφορα ξ (μέγιστο στα περίπου 50 δευτερόλεπτα διαφορά), στα διάφορα σενάρια. Αισθητή είναι όμως η διαφορά

όσο αφορά την αλλαγή της παραμέτρου T , και την στιγμή που χάνεται η κάλυψη του δικτύου. Αυτό καταδεικνύει τη μεγάλη κατανάλωση ενέργειας όσο αφορά την αποστολή πακέτων δεδομένων (data packet), και τη σημαντικότητα σωστής επιλογής του T , ώστε να μην στέλλονται περισσότερα πακέτα δεδομένων από όσα θα χρειαζόνταν για την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

4.5.2 Προσέγγιση 1

Στην προσέγγιση αυτή έχει τροποποιηθεί η συνάρτηση επιθυμητότητας του πρωτοκόλλου Flock-CC, όπως εξηγείται στο υποκεφάλαιο 3.2.1 και παρουσιάζεται στην εξίσωση 3.1.

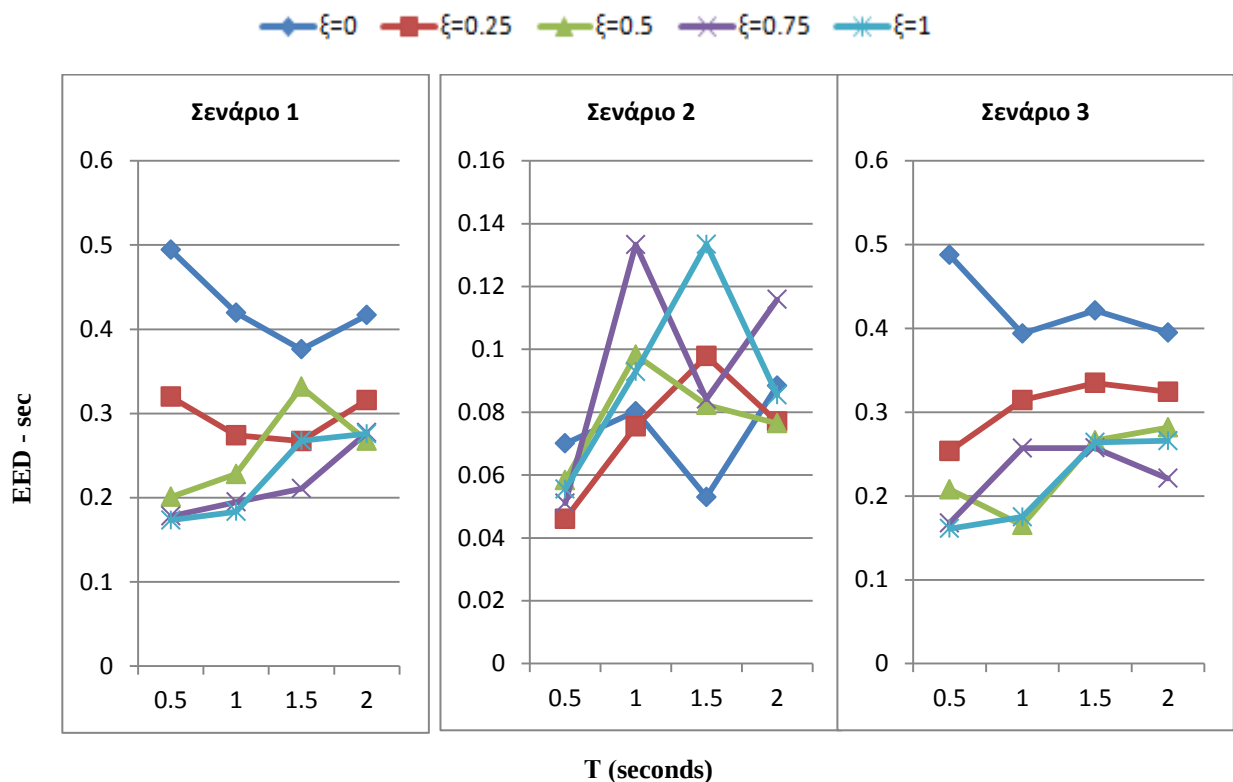
Στις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 4.8 βλέπουμε το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) που είχε κάθε ένα από τα 3 σενάρια, με πιο ψηλό ποσοστό για το σενάριο 1 το 74,1%, για το σενάριο 2 το 82,7% και για το σενάριο 3 το 74,6%. Στα πρώτα δύο σενάρια τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν για $\xi=0,25$, ενώ για το τρίτο σενάριο ήταν για $\xi=0,75$ και με πολύ μικρή διαφορά από την τιμή αυτή το δεύτερο καλύτερο ήταν για $\xi=0,25$.



Σχήμα 4.8: Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio – PDR) για την Προσέγγιση

1 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Παρομοίως με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις του πρωτοκόλλου Flock-CC, παρατηρείται μια γενική μείωση στο ποσοστό παράδοσης πακέτων (PDR) όσο αυξάνεται ο χρόνος περιόδου T , ανεξαρτήτως ξ . Όπως και προηγουμένως, έτσι και σε αυτή την περίπτωση, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν η περίοδος T κρατείται σε μικρές τιμές, οι μηχανισμοί του πρωτοκόλλου λειτουργούν πιο αποδοτικά μιας και η κατάσταση του δικτύου ενημερώνεται συχνά. Ενώ όταν το T είναι μεγάλο, οι κόμβοι στέλνουν τα πακέτα δεδομένων τους μέσα στο ίδιο T , με μεγάλη πιθανότητα στους ίδιους κόμβους, χωρίς να εξετάζεται η κατάσταση του δικτύου ή το ποσοστό πληρότητας των κόμβων.

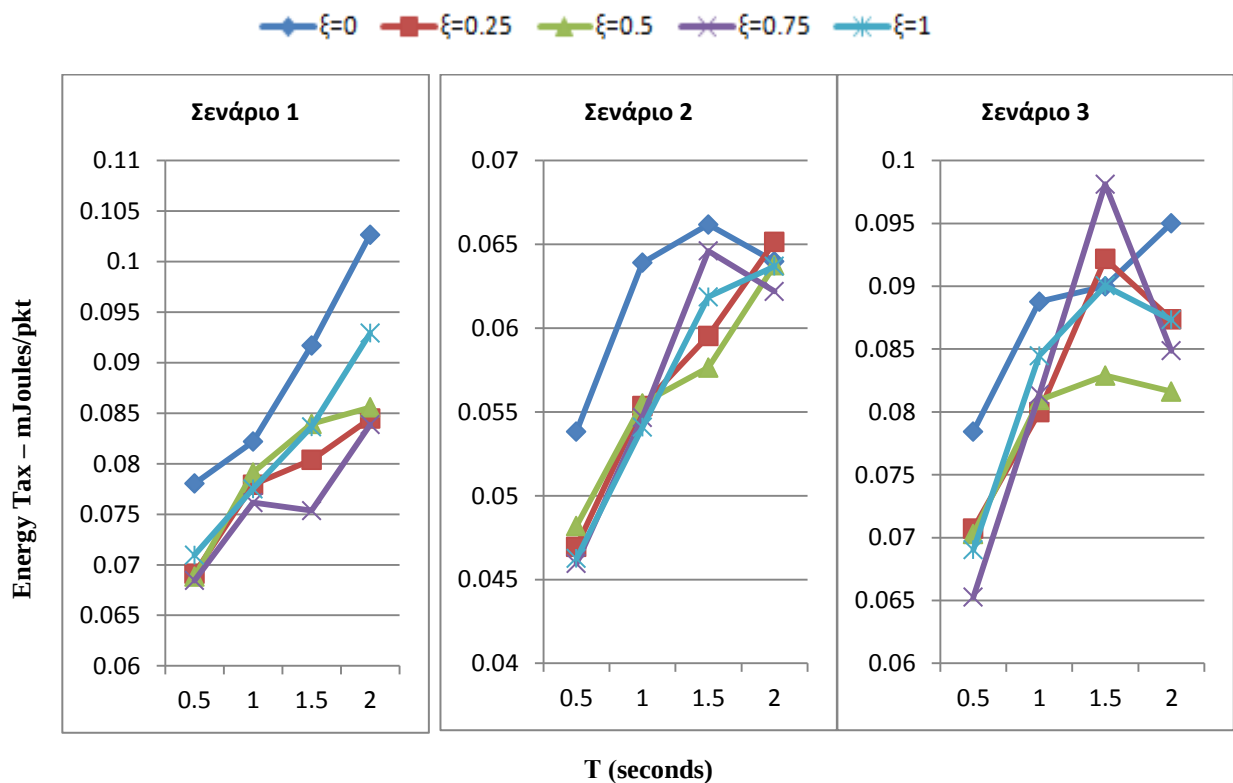


Σχήμα 4.9: Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay – EED) για την Προσέγγιση 1 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Από τις γραφικές παραστάσεις των τριών σεναρίων για την Μέση Καθυστέρηση από Άκρο-σε-Άκρο (End-to-End Delay – EED) για την Προσέγγιση 1 (Σχήμα 4.9), μπορούμε να δούμε ότι η μέση καθυστέρηση για να φτάσει ένα πακέτο δεδομένων από τον κόμβο-

πηγή (source node) στον κόμβο sink στο σενάριο 2 είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με τα σενάρια 1 και 3, όπως παρατηρείται και για το Flock-CC. (Σενάριο 2 δημιουργούνται δύο μικρές περιοχές hotspots αποτελούμενες από 5 κόμβους η κάθε μια, δημιουργώντας μικρότερης έντασης συμφόρηση, και υπάρχουν κόμβοι-πηγές σε πιο κοντινή απόσταση από ότι στα άλλα δύο σενάρια).

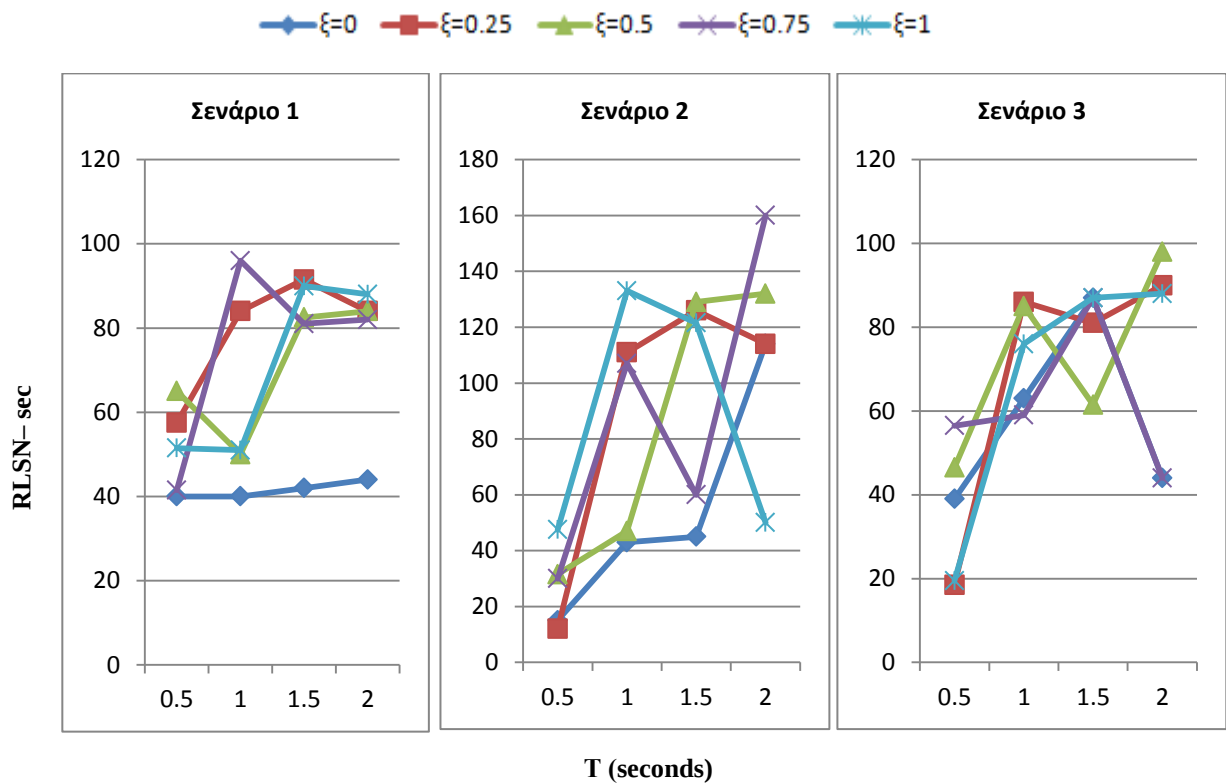
Στο σενάριο 1 για τις τιμές $\xi=0.25$ και 0.5 η μέση καθυστέρηση μειώνεται μέχρι το $T=1.5$ δευτερόλεπτα και για $T=2$ υπάρχει μια αύξηση. Παρόμοια μείωση παρατηρείται και στο 3^ο σενάριο για $\xi=0$ μέχρι $T=1.5$ δευτερόλεπτα. Ο λόγος για την αυξημένη καθυστέρηση είναι λόγω του αυξημένου αριθμού πακέτων ελέγχου που διακινούνται στο δίκτυο, αλλά και λόγω της αυξανόμενης συμφόρησης που παρατηρείται, η οποία επιδεινώνεται με τα πακέτα ελέγχου.



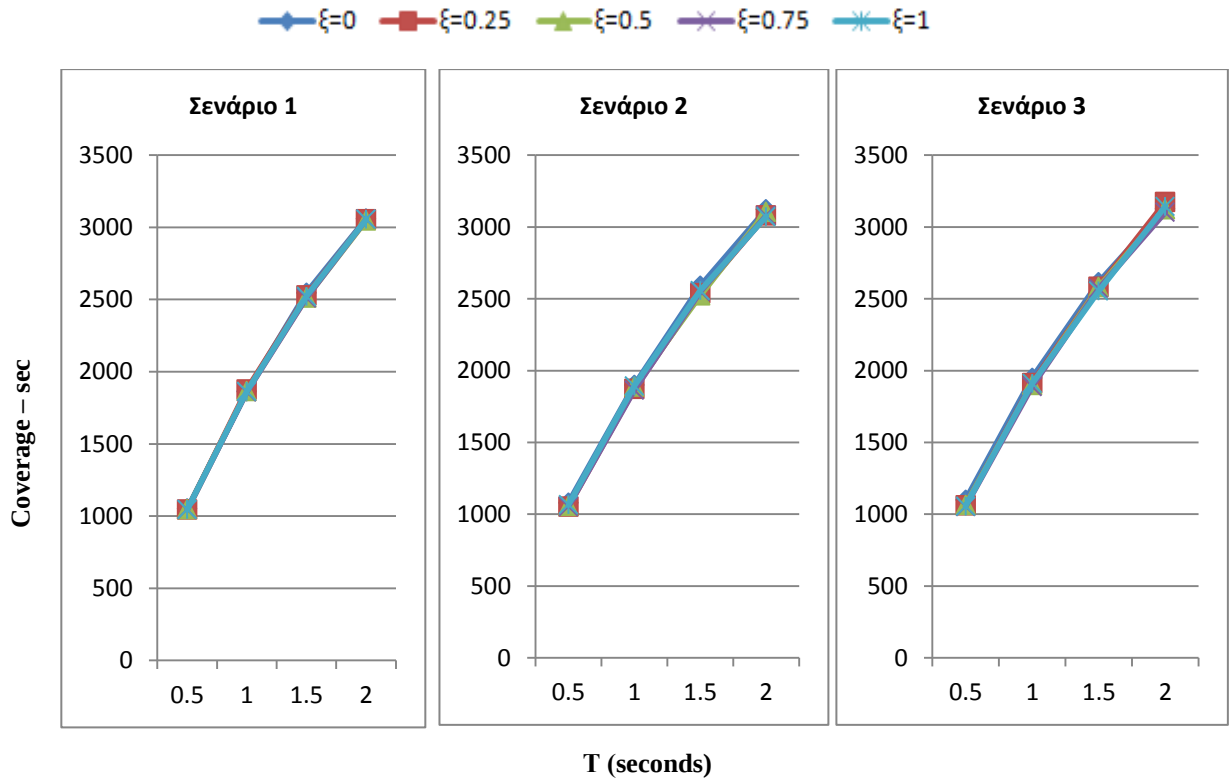
Σχήμα 4.10: Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για την Προσέγγιση 1 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Σε αυτή την πρώτη προσέγγιση που μελετήθηκε, τα αποτελέσματα, όπως δείχνουν οι γραφικές παραστάσεις (Σχήμα 4.10 και Σχήμα 4.5), είναι παρόμοια με το πρωτόκολλο Flock-CC. Φαίνεται δηλαδή ότι η προσέγγιση αυτή δεν κάνει κάποια αλλαγή στην τιμή της ενέργειας που καταναλώνεται για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων στο sink, παρόλο που έλκεται από κόμβους με μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας.

Όσο αφορά τη υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου και την κάλυψη δικτύου, τα αποτελέσματα (Σχήμα 4.11 και 4.12) είναι παρόμοια με εκείνα του πρωτοκόλλου Flock-CC, Σχήμα 4.6 και 4.7. Η μόνη βελτίωση που παρατηρήθηκε είναι αύξηση του ποσοστού παράδοσης πακέτων (δεδομένων) στον κόμβο sink, της τάξεως του 5% για όλα τα σενάρια.



Σχήμα 4.11: Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (Remaining Lifetime of Sensor Networks – RLSN) για την Προσέγγιση 1 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

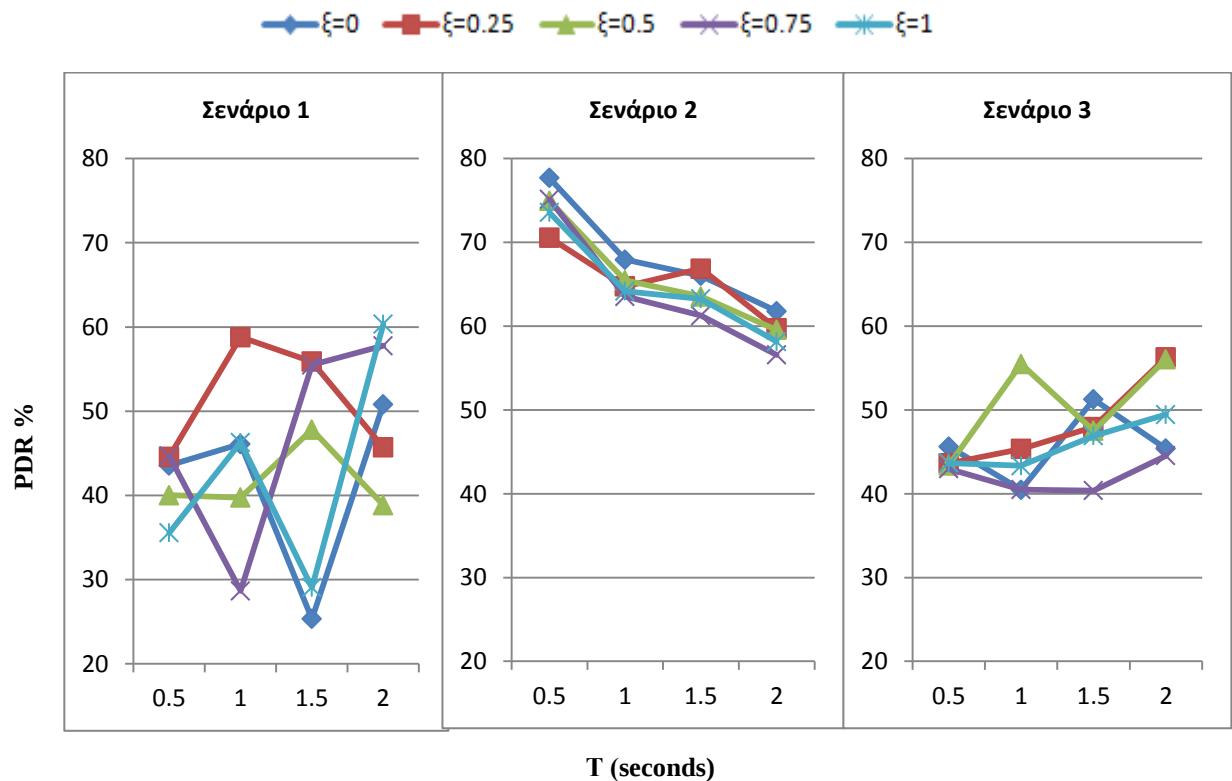


Σχήμα 4.12: Κάλυψη ασύρματου δικτύου αισθητήρων (Coverage) για την Προσέγγιση 1 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

4.5.3 Προσέγγιση 2

Η Προσέγγιση 2 περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.2.2, και χρησιμοποιεί την συνάρτηση επιθυμητότητας που χρησιμοποιείται και στο πρωτόκολλο Flock-CC. Η αλλαγή του πρωτοκόλλου που έγινε εδώ είναι να χρησιμοποιηθεί ένας επιπλέον έλεγχος πριν τον καθορισμό του υποσυνόλου κόμβων που πιθανόν να επισκεφτεί το πακέτο i . Για να κινηθεί σε κόμβο με μικρότερο αριθμό hop (μπροστά), εκτός των άλλων περιορισμών που θέτει το Flock-CC, θα πρέπει η μέση ενέργεια των κόμβων που βρίσκονται μπροστά να είναι μεγαλύτερο του a , ενώ για να κινηθεί προς κόμβο με ίση απόσταση hop (πλάγια) θα πρέπει η μέση ενέργεια των αντίστοιχων κόμβων να είναι μεγαλύτερη του b .

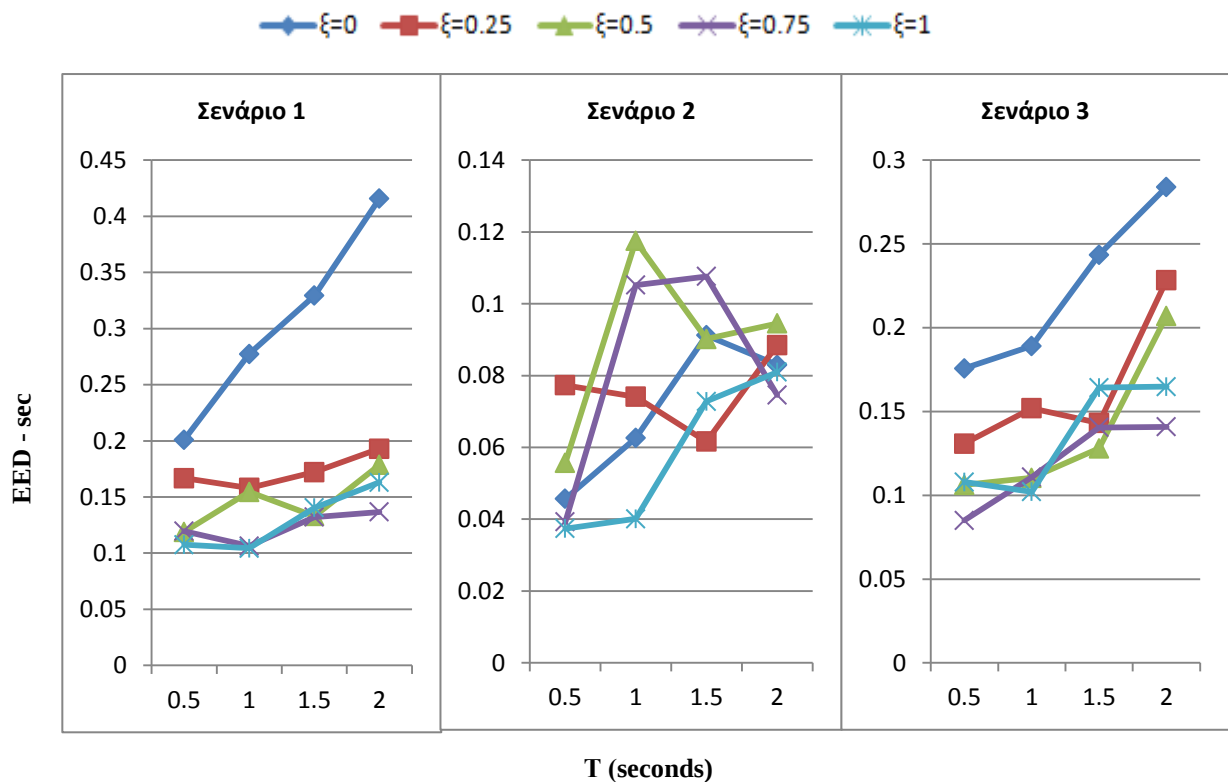
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις για τον σχολιασμό της καταλληλότητας της προσέγγισης. Για την πειραματική αξιολόγηση της προσέγγισης τέθηκε το ποσοστό a να είναι 30% και το ποσοστό b να είναι 50%. Οι τιμές για τα ποσοστά δεν είναι κατ' ανάγκη οι βέλτιστες για αυτή την προσέγγιση, αλλά τέθηκαν για την σύγκριση με τις υπόλοιπες προσεγγίσεις.



Σχήμα 4.13: Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio – PDR) για την Προσέγγιση 2 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Η πρώτη γραφική παράσταση για αυτή την προσέγγιση είναι η πιο πάνω στο Σχήμα 4.13, όπου φαίνεται στα σενάρια 1 και 3 μια αισθητή μείωση του ποσοστού παράδοσης πακέτων (PDR). Συγκεκριμένα στην πρώτη γραφική παράσταση, για το σενάριο 1 το PDR κυμαίνεται μεταξύ 25% και 60%, τα οποία ποσοστά είναι πολύ χαμηλά. Τα χαμηλότερα αποτελέσματα παρατηρούνται για $\xi=0$ και $\xi=1$, για $T=1.5$ δευτερόλεπτα. Οι τιμές αυτές είναι οι ακραίες για την μεταβλητή ξ . Όσο αφορά το σενάριο 2, υπάρχει μικρή μείωση του ποσοστού παράδοσης πακέτων, με την αντίστοιχη γραφική παράσταση Σχήμα 4.3. Ο λόγος

της μείωσης στο ποσοστό των παραδοτέων πακέτων οφείλεται και στους κανόνες που εισάχθηκαν, οι οποίοι δεν επιτρέπουν την αποστολή πακέτων στο σύνολο των κόμβων που βρίσκονται μπροστά (μικρότερη απόσταση σε hops από τον κόμβο sink) όταν η μέση ενέργεια των κόμβων μπροστά πέσει κάτω από 30%. Επιπλέον όταν το ποσοστό στους κόμβους στην ίδια απόσταση με τον κόμβο που φιλοξενεί κάποιο πακέτο, πέσει κάτω από 50%, τα πακέτα προωθούνται σε κόμβους με μεγαλύτερο αριθμό hop. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πακέτα να κινούνται σε κύκλους στο δίκτυο, ενώ ταυτόχρονα αναγκάζονται να ανοίγουν το σμήνος πακέτων έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συγκρούσεων των πακέτων όταν αυτά κινούνται διαγώνια προς τον sink (λόγω της έλξης από το μαγνητικό πεδίο).

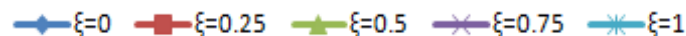


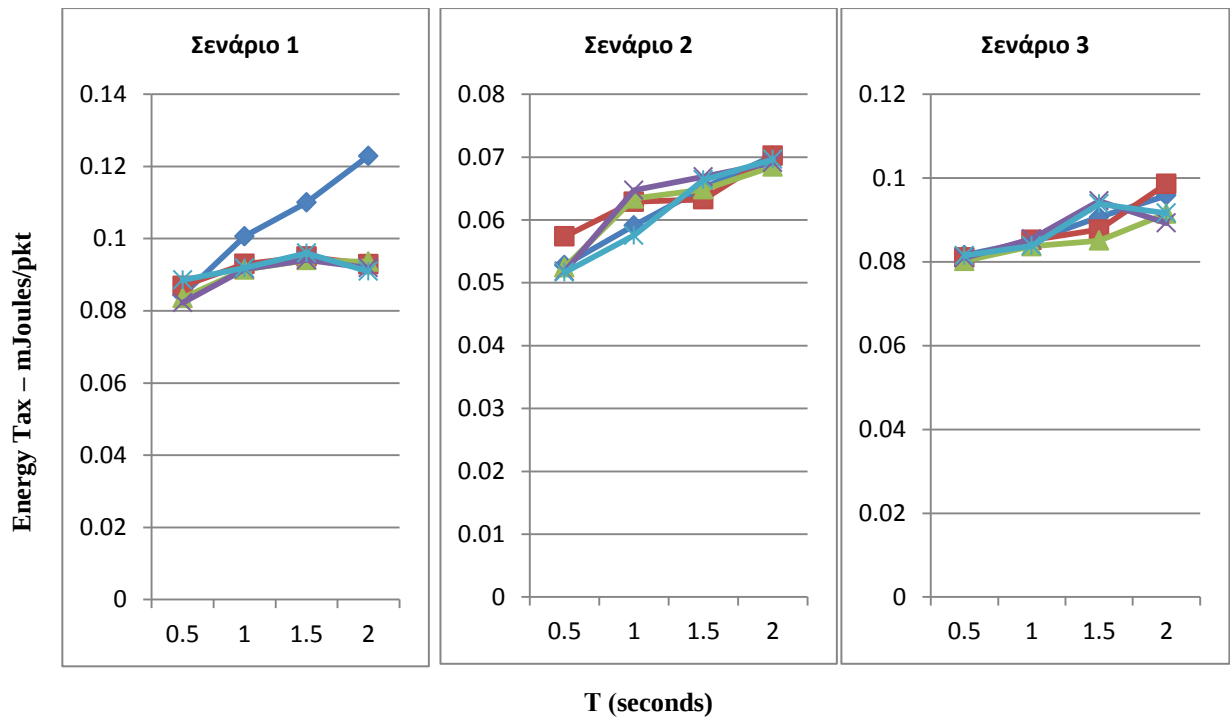
Σχήμα 4.14: Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay – EED) για την Προσέγγιση 2 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Στο Σχήμα 4.14 πιο πάνω, μπορούμε να δούμε ότι παρόλο που μικρό ποσοστό πακέτων καταφέρνουν να φτάσουν στον κόμβο sink, η μέση καθυστέρηση για κάθε πακέτο κινείται

στις ίδιες τιμές με εκείνες του πρωτοκόλλου Flock-CC, με μόνη εξαίρεση το σενάριο 3. Στο σενάριο 3 η καθυστέρηση μειώνεται μέχρι και 0.25 δευτερόλεπτα (για παράδειγμα για τιμές $\xi=0.25$ και $T=1.5$). Η μείωση στην καθυστέρηση οφείλεται στο γεγονός ότι μετά την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος, και αφού οι κόμβοι στην κοντινότερη διαδρομή (ή κοντά στην κοντινότερη) χάσουν ποσοστό της ενέργειας, λόγω των επιπλέον κανόνων της προσέγγισης, τα πακέτα δεν θα μπορούν να κινηθούν προς τα εμπρός (αν η μέση ενέργεια < 0.3) και πριν πέσουν οι κόμβοι στο ενδιαμέσο του δικτύου, τα πακέτα θα έχουν ήδηδρομολογηθεί από διαδρομές κοντινότερες στις άκρες του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουν να αποφύγουν την νεκρή ζώνη που δημιουργείται στο σενάριο, πριν ακόμη δημιουργηθεί.

Όπως θα ήταν αναμενόμενο από τα πολύ χαμηλά ποσοστά παράδοσης πακέτων (PDR) του σεναρίου 1 αυτής της προσέγγισης, υπάρχει αυξημένη κατανάλωση ενέργειας (Σχήμα 4.15) για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων, η οποία οφείλεται από την μια στον μεγάλο αριθμό retransmissions λόγω συγκρούσεων, αλλά και η ανάγκη τα πακέτα να ανοίγουν αρκετά το σμήνος, χωρίς να υπάρχει ουσιαστικά ανάγκη. Τα άλλα δύο σενάρια έχουν περίπου την ίδια κατανάλωση για κάθε πακέτο όπως και στο πρωτόκολλο Flock-CC.

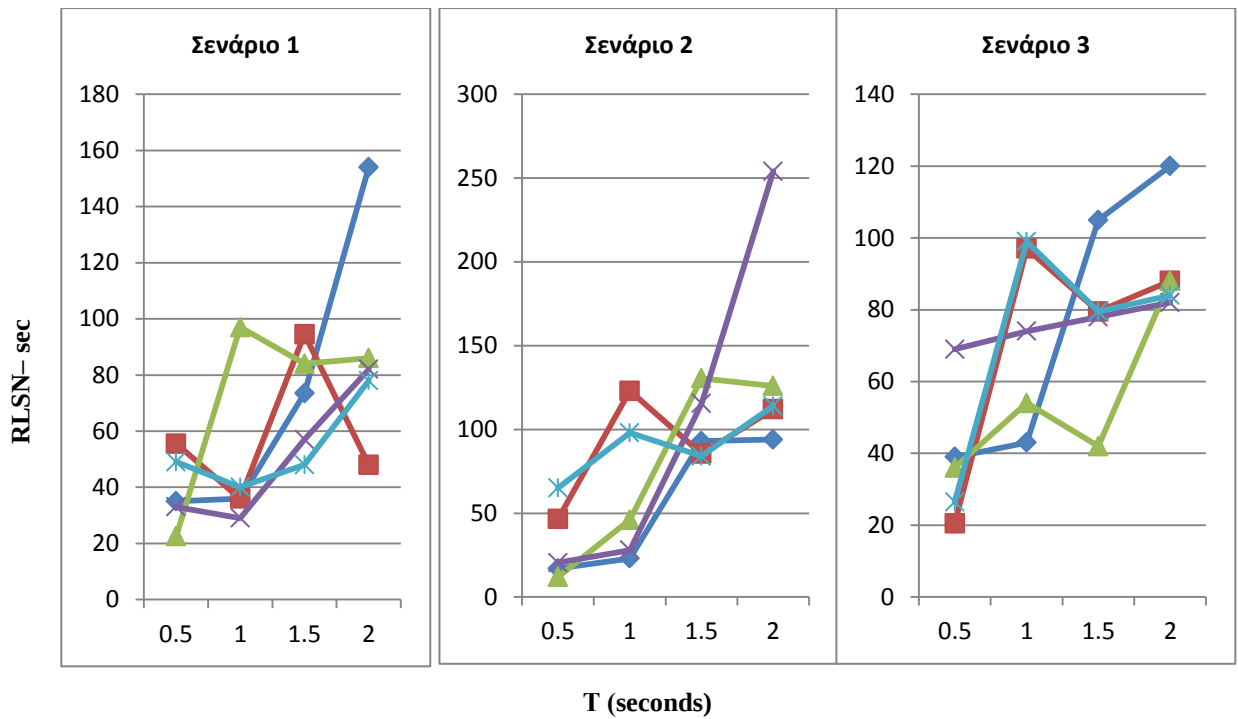

 $\xi=0$ $\xi=0.25$ $\xi=0.5$ $\xi=0.75$ $\xi=1$



Σχήμα 4.15: Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για την Προσέγγιση 2 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Όσο αφορά την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου (RLSN), μπορούμε να την δούμε στο Σχήμα 4.16. Εδώ αξίζει να παρατηρηθεί η μεγάλη διαφορά στην υπολειπόμενη διάρκεια ζωής για το σενάριο 2 για $\xi=0.75$ και $T=2$, αλλά και για την μεγάλη διαφορά στο σενάριο 1 και 3 για τιμές $\xi=0$ και $T=2$.

—◆— $\xi=0$ —■— $\xi=0.25$ —▲— $\xi=0.5$ —×— $\xi=0.75$ —*— $\xi=1$

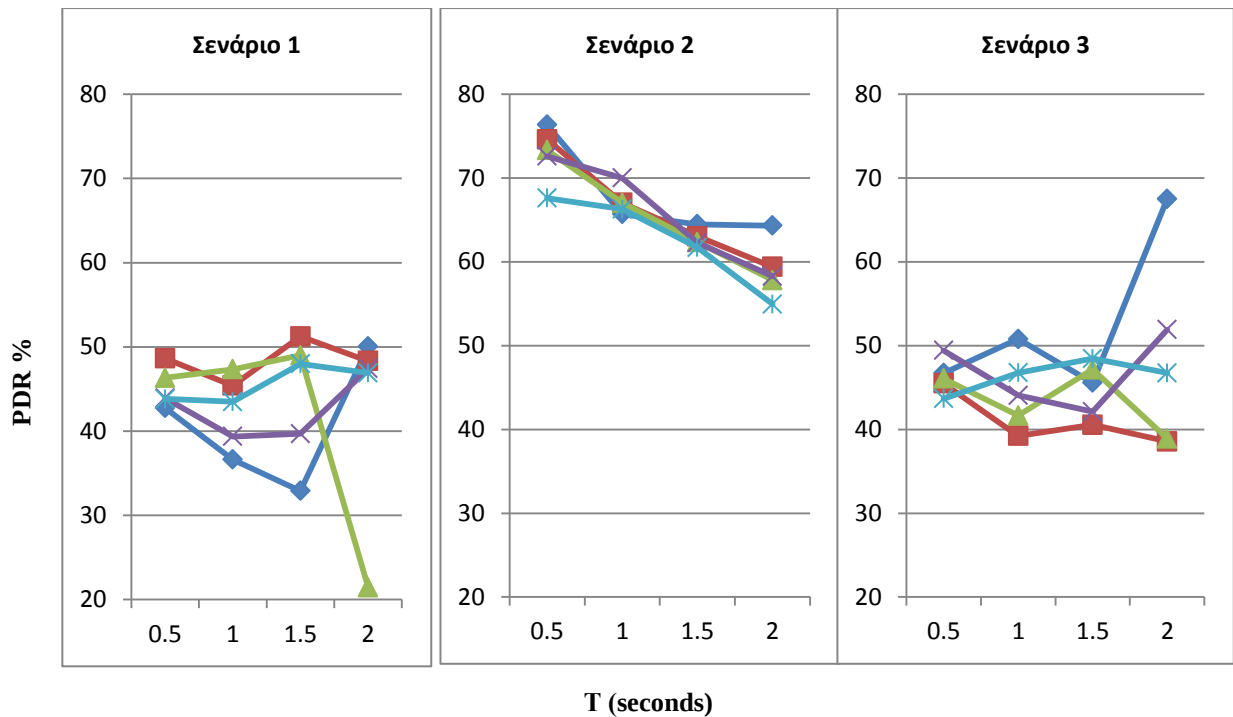


Σχήμα 4.16: Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (Remaining Lifetime of Sensor Networks – RLSN) για την Προσέγγιση 2 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

4.5.4 Προσέγγιση 3

Η τρίτη προσέγγιση που λήφθηκε υπόψη είναι ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων προσεγγίσεων και τα αποτελέσματα της φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων που ακολουθούν. Και πάλι τα ποσοστά για τις μεταβλητές a και b είναι τα ίδια με τις τιμές που καθορίστηκαν για την προσέγγιση 2, δηλαδή $a = 30\%$ και $b = 50\%$.

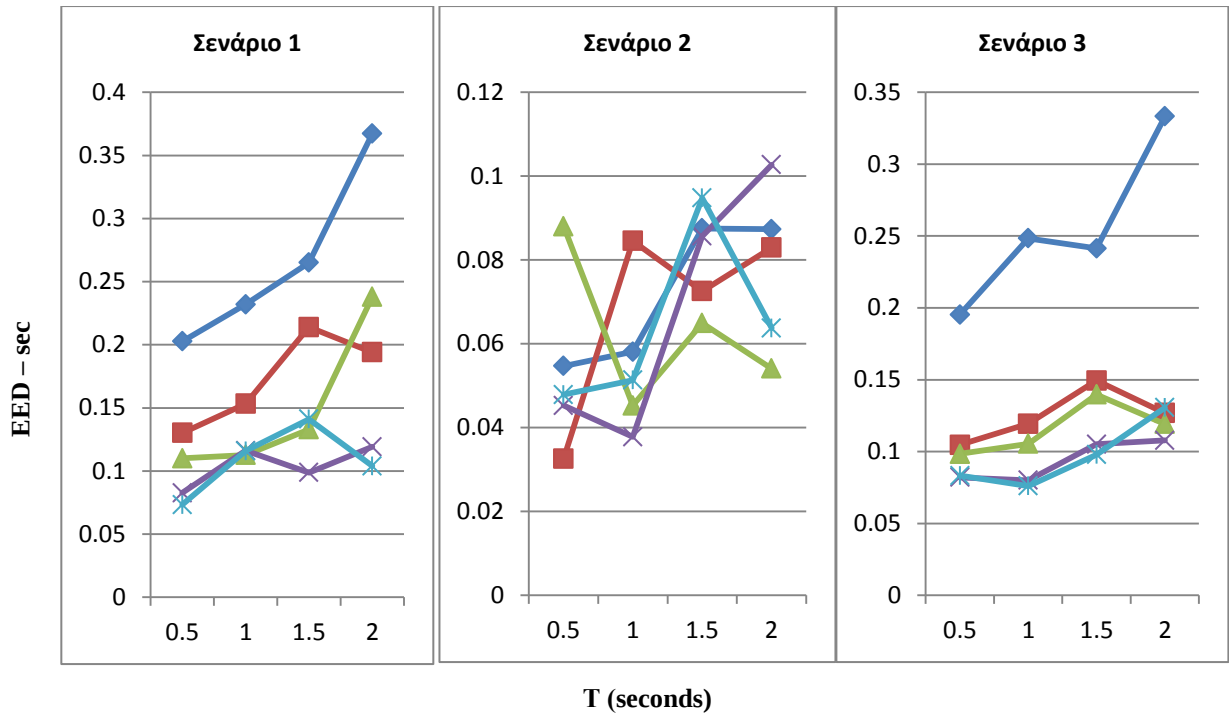
—◆— $\xi=0$ —■— $\xi=0.25$ —▲— $\xi=0.5$ —×— $\xi=0.75$ —*— $\xi=1$



Σχήμα 4.17: Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio – PDR) για την Προσέγγιση 3 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Στο σενάριο 2 φαίνεται και πάλι μια ξεκάθαρη φθίνουσα πορεία της γραφικής παράστασης για το ποσοστό παράδοσης πακέτων (PDR) για όλα τα διαφορετικά ξ , και όπως εξηγήθηκε και πιο πριν, αυτό οφείλεται κυρίως στο μεγάλο χρονικό διάστημα T στο οποίο οι κόμβοι δεν εξετάζουν την κατάσταση στους γειτονικούς κόμβους (συμφόρηση κοντά στους γειτονικούς κόμβους ή γεμάτες ουρές) και κατά συνέπεια δεν αλλάζουν την επιθυμητότητα των γειτονικών κόμβων. Έτσι μεγαλύτερος αριθμός πακέτων εμπλέκονται σε συγκρούσεις στο ασύρματο μέσο επικοινωνίας. Το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) για το σενάριο 2 κινείται μεταξύ 55%-87%, ενώ τα σενάρια 1 και 3 κατά κύριο λόγο μεταξύ 40% και 50%. Σε σχέση με το Flock-CC τα αποτελέσματα εδώ είναι κατά προσέγγιση 20% χειρότερα.

—◆— $\xi=0$ —■— $\xi=0.25$ —▲— $\xi=0.5$ —×— $\xi=0.75$ —*— $\xi=1$

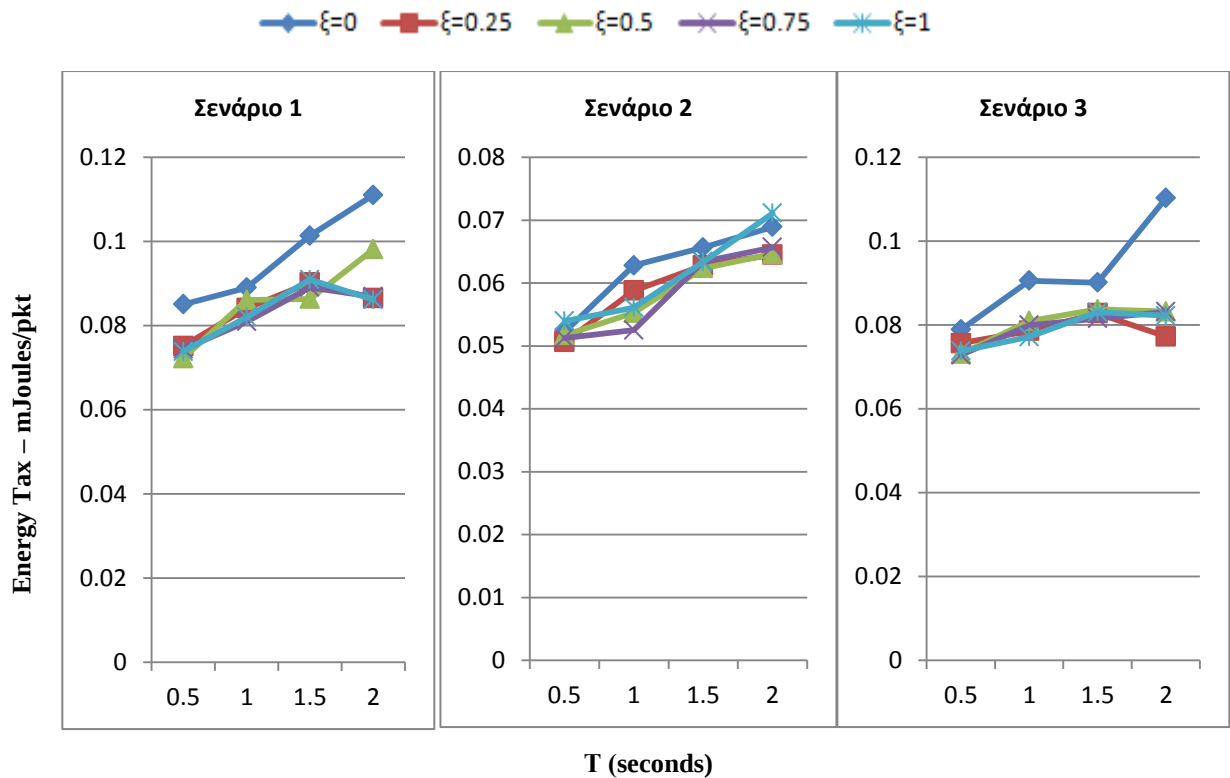


Σχήμα 4.18: Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay – EED) για την Προσέγγιση 3 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Σε γενικές γραμμές η Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένου αυξάνεται όσο αυξάνεται και η περίοδος T (όπως εξηγήθηκε και σε προηγούμενες γραφικές για το EED). Αυτό είναι πιο ξεκάθαρο στις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 4.18, για τα σενάρια 1 και 3. Όπως και στο πρωτόκολλο Flock-CC, έτσι και σε αυτή την προσέγγιση υπάρχει μεγαλύτερη καθυστέρηση (ειδικά στα σενάρια 1 και 3) για $\xi=0$ και έπειτα για το $\xi=0.25$. Γενικά όμως οι χρόνοι της μέσης καθυστέρησης και στα 3 σενάρια είναι πιο μικρή απ' ό τι στο πρωτόκολλο Flock-CC, και πιο ξεκάθαρο είναι για τα σενάρια 1 και 3 όπου συγκεκριμένα έχουν διαφορά μέχρι και 0.2 και 0.25 αντίστοιχα.

Όπως και στην γραφική παράσταση για το Flock-CC για την μέση κατανάλωση, έτσι και εδώ οι τιμές είναι πολύ παρόμοιες. Για αυτά τα αποτελέσματα συμβάλουν τόσο οι βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου Flock-CC, όσο και η έλξη σε κόμβους με μεγαλύτερο ποσοστό υπολειπόμενης ενέργειας. Η αποτελεσματικότητα του συνδυασμού φαίνεται περισσότερο στην γραφική παράσταση του σεναρίου 3, όπου κατά μέσο όρο χρησιμοποιείται 0.08 mJoules ενέργεια για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων από τον

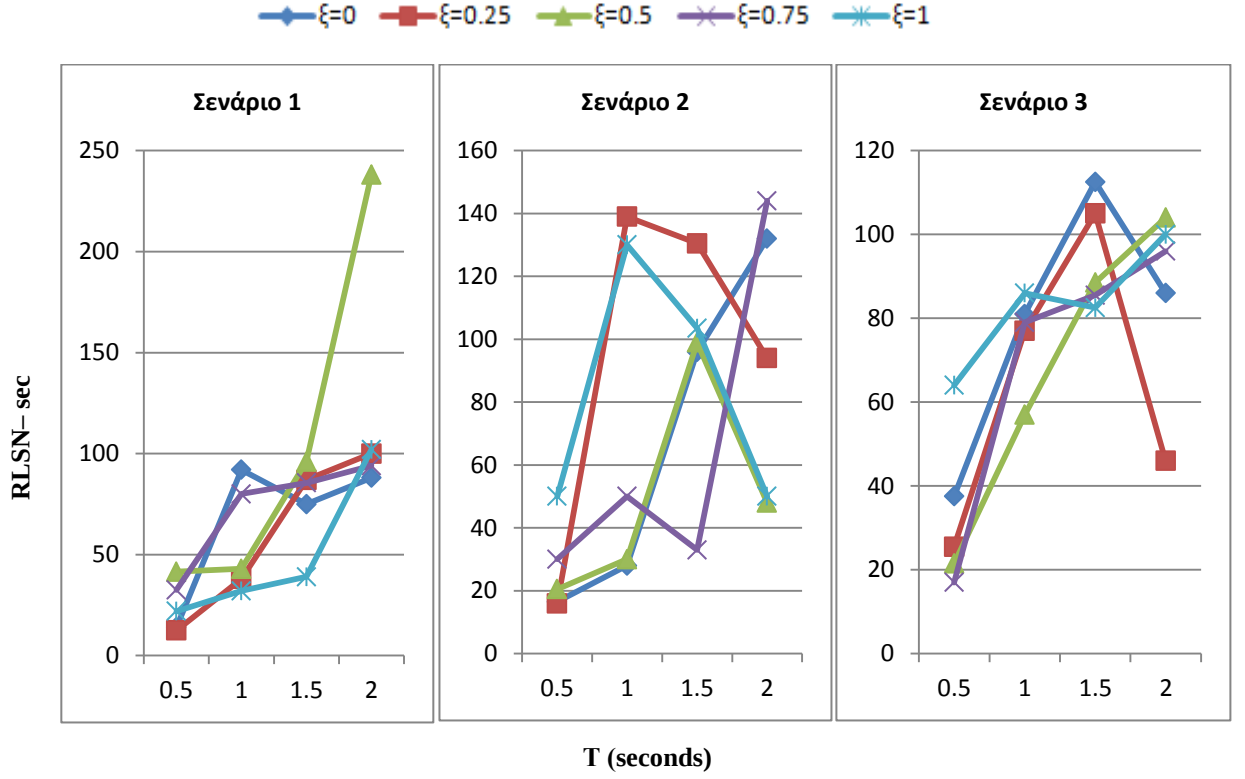
κόμβο-πηγή (source node) στον κόμβο sink, ενώ για το ίδιο σενάριο για το πρωτόκολλο Flock-CC χρησιμοποιείται περίπου 0.09 mJoules/pkt. Ακόμη και αυτή η μικρή διαφορά θα μπορούσε να κάνει τη διαφορά σε ένα WSN, μιας και στα σενάρια που έγινε η προσομοίωση οι κόμβοι χρησιμοποιούσαν μόλις 0.5Joules ενέργεια, ενώ ένας κόμβος μπορεί να εξοπλιστεί με 2 μπαταρίες AA, περίπου 10,000 joules η κάθε μια.



Σχήμα 4.19: Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για την Προσέγγιση 3 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Στο Σχήμα 4.20 πιο κάτω, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου για το σενάριο 2 είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα δύο άλλα σενάρια, μιας και είναι το σενάριο με τα πιο ήπια φαινόμενα συμφόρησης. Πιο συγκεκριμένα η μεγαλύτερη υπολειπόμενη διάρκεια ζωής για το σενάριο 2 τη συναντούμε για $T=1.5$ δευτερόλεπτα και $\xi=0.75$ (όπως και στο πρωτόκολλο Flock-CC). Με αυτό τον συνδυασμό T και ξ φαίνεται να βελτιστοποιείται η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του ασύρματου δικτύου, δηλαδή το πόσο να έλκεται ένα πακέτο από ανενεργούς κόμβους (idle nodes), και την περίοδο T που

θα πρέπει να έχει το δίκτυο. Μεγάλη αύξηση στην υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του δικτύου παρατηρείται στο σενάριο 1, με παραμέτρους $\xi=0.5$ και $T=2$.



Σχήμα 4.20: Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (Remaining Lifetime of Sensor Networks – RLSN) για την Προσέγγιση 3 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

4.5.5 Προσέγγιση 4

Στην Προσέγγιση 4 χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη συνάρτηση επιθυμητότητας όπως φαίνεται και πιο κάτω:

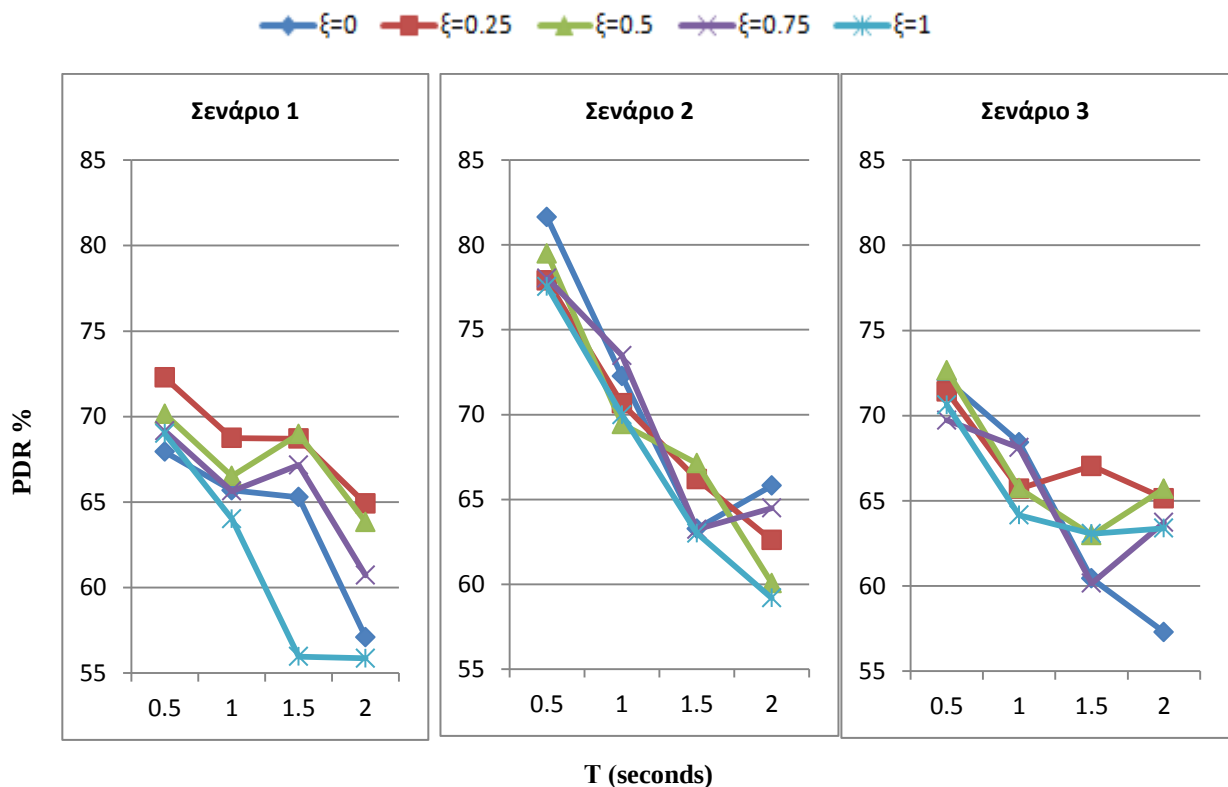
$$D_{nm}(k) = \begin{cases} D'_{nm}(k) + D'_{nm}(k) * x, & e_{nm}^{norm}(k) > \alpha \\ D'_{nm}(k) + D'_{nm}(k) * y, & e_{nm}^{norm}(k) > b \\ D'_{nm}(k), & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Στην προσέγγιση αυτή δίνεται κάποιο επιπλέον ποσοστό επιθυμητότητας σε κόμβους με υψηλό ποσοστό υπολειπόμενης ενέργειας, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο έλξη προς

κόμβους με ψηλότερη υπολειπόμενη ενέργεια. Αυτό γίνεται όμως χωρίς να επηρεάζει η επιλογή κατεύθυνσης κίνησης του πακέτου από το μέσο όρο της υπολειπόμενης ενέργειας του συνόλου των κόμβων (εμπρός, πλάγια ή πίσω), το οποίο όπως φάνηκε από τις γραφικές της Προσέγγισης 2 (υποκεφάλαιο 4.5.3).

Για σκοπούς μελέτης της προσέγγισης αυτής, για την πειραματική αξιολόγηση τέθηκαν οι ακόλουθες τιμές: $\alpha=0.7$, $b=0.5$, $x=15\%$, $y=10\%$.

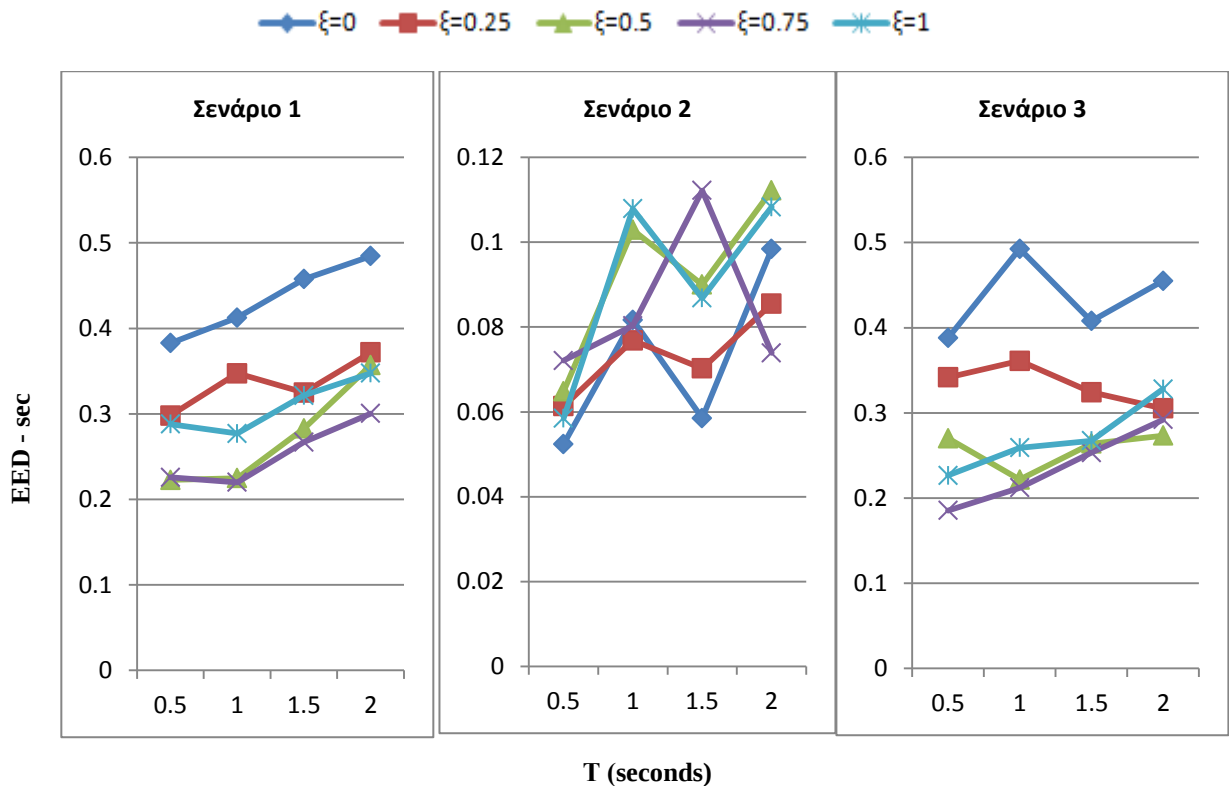
Ας πάρουμε τις μετρικές από την αρχή. Όπως και στις προηγούμενες γραφικές παραστάσεις για το Ποσοστό Παράδοσης πακέτων (PDR) (Σχήμα 4.21), τα ποσοστά είναι μικρότερα για τα σενάρια 1 και 3, σε σχέση με το σενάριο 2 λόγω του ότι στα σενάρια 1 και 3 υπάρχουν πιο έντονα φαινόμενα συμφόρησης απ' ό,τι στο σενάριο 2.



Σχήμα 4.21: Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio – PDR) για την Προσέγγιση 4 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε στην γραφική παράσταση, στο Σχήμα 4.22, αρχικά την αυξητική τάση που έχει η μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (EED). Σε σύγκριση με τις

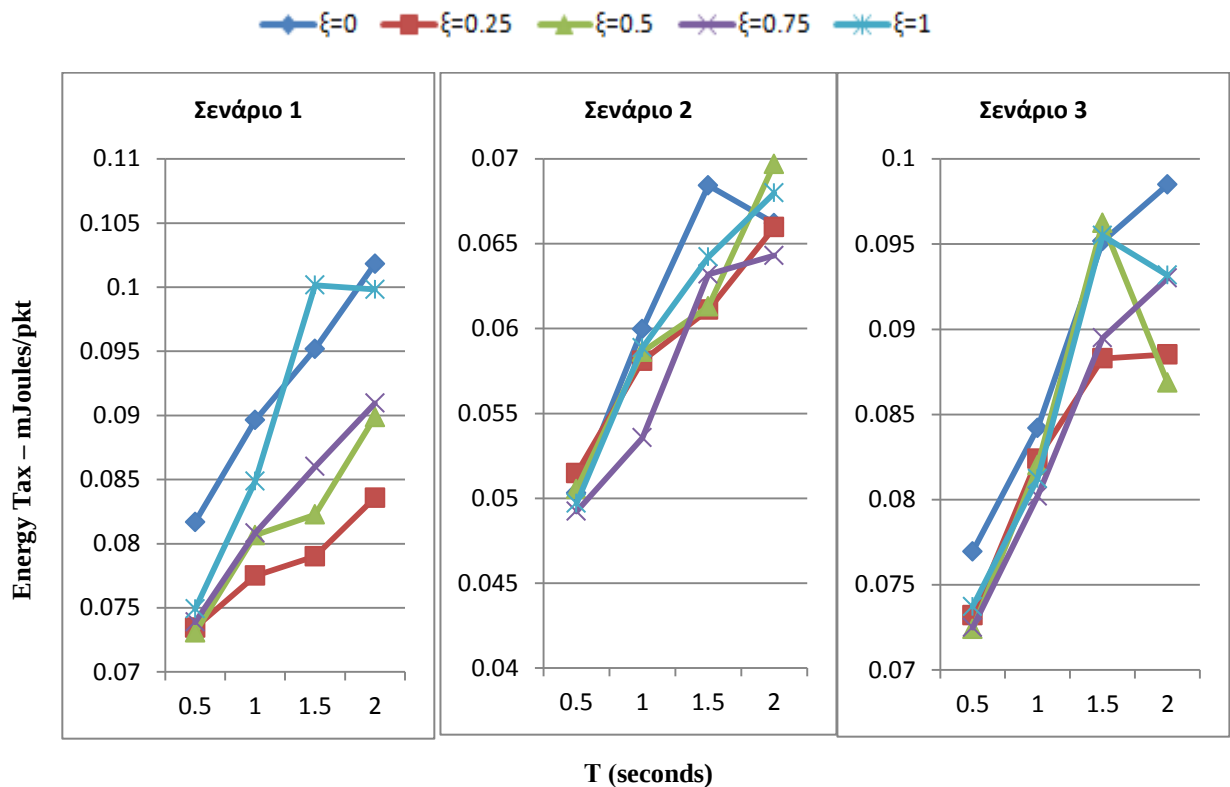
τιμές από το πρωτόκολλο Flock-CC, οι τιμές είναι πολύ κοντά για όλα τα σενάρια. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι σε αυτή την προσέγγιση, Προσέγγιση 4, στο σενάριο 1 οι τιμές για $T=0.5$ και 1 , για $\xi=0.5$ και 0.75 είναι πιο μικρές από ότι στην προσέγγιση του πρωτοκόλλου Flock-CC. Επίσης, για το σενάριο 2 στο Flock-CC υπήρχε μείωση για $T=2$, όμως εδώ υπάρχει αύξηση, στα πλαίσια όμως των υπολοίπων τιμών για τη Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο.



Σχήμα 4.22: Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay – EED) για την Προσέγγιση 4 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

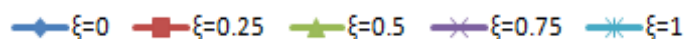
Για τα σενάρια 1 και 3 η μέση κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 0.07 και 0.1 mJoules ανά πακέτο, με αυξητική τάση όσο μεγαλώνει η περίοδος T . Για το σενάριο 2 χρειάζεται από 0.05 μέχρι περίπου 0.07 mJoules για κάθε πακέτο και παρατηρούμε και εδώ την ύπαρξη της αυξητικής τάσης. Όπως και στις προηγούμενες προσεγγίσεις η αύξηση στην μέση κατανάλωση ενέργειας οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι υπάρχουν συγκρούσεις στο ασύρματο δίκτυο (collisions) και πρέπει το πακέτο να σταλεί ξανά,

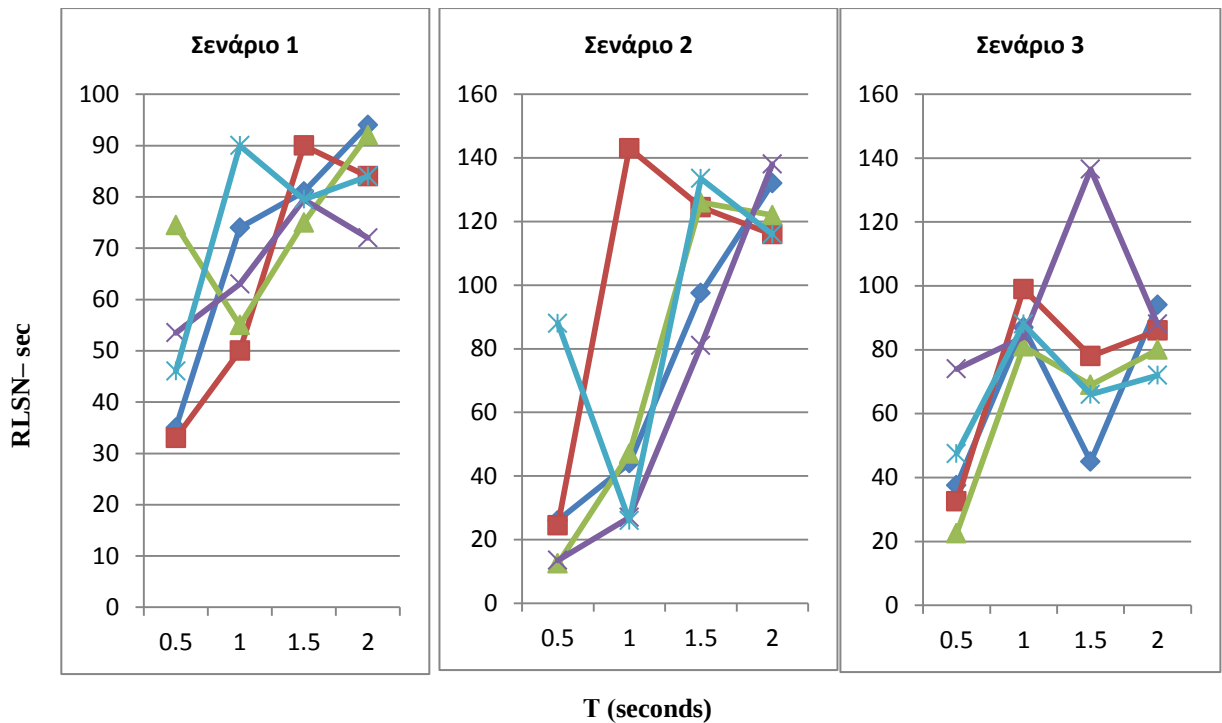
καταναλώνοντας έτσι περισσότερη ενέργεια όταν υπάρχουν retransmissions, σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το πακέτο σε κάθε βήμα (hop) σταλεί επιτυχώς από την πρώτη προσπάθεια του κάθε κόμβου.



Σχήμα 4.23: Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για την Προσέγγιση 4 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Η επόμενη γραφική παράσταση για την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (RLSN) στο Σχήμα 4.24, δείχνει την υπολογισμένη τιμή για το RLSN για το κάθε σενάριο. Γενικά υπάρχει μια αυξητική τάση σε αυτές τις γραφικές παραστάσεις, όσο αυξάνεται το T. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι τιμές κυμαίνονται περίπου στα ίδια πλαίσια όπως και το Flock-CC πρωτόκολλο. Μια διαφορά που μπορεί να παρατηρηθεί είναι η μείωση του RLSN στο σενάριο 3, για T=1.5, για όλα τα ξ εκτός για ξ=0.75 το οποίο αυξάνεται. Μετά την μείωση στο T=1.5 υπάρχει μια μικρή αύξηση.





Σχήμα 4.24: Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (Remaining Lifetime of Sensor Networks – RLSN) για την Προσέγγιση 4 με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

4.5.6 Προσέγγιση 5

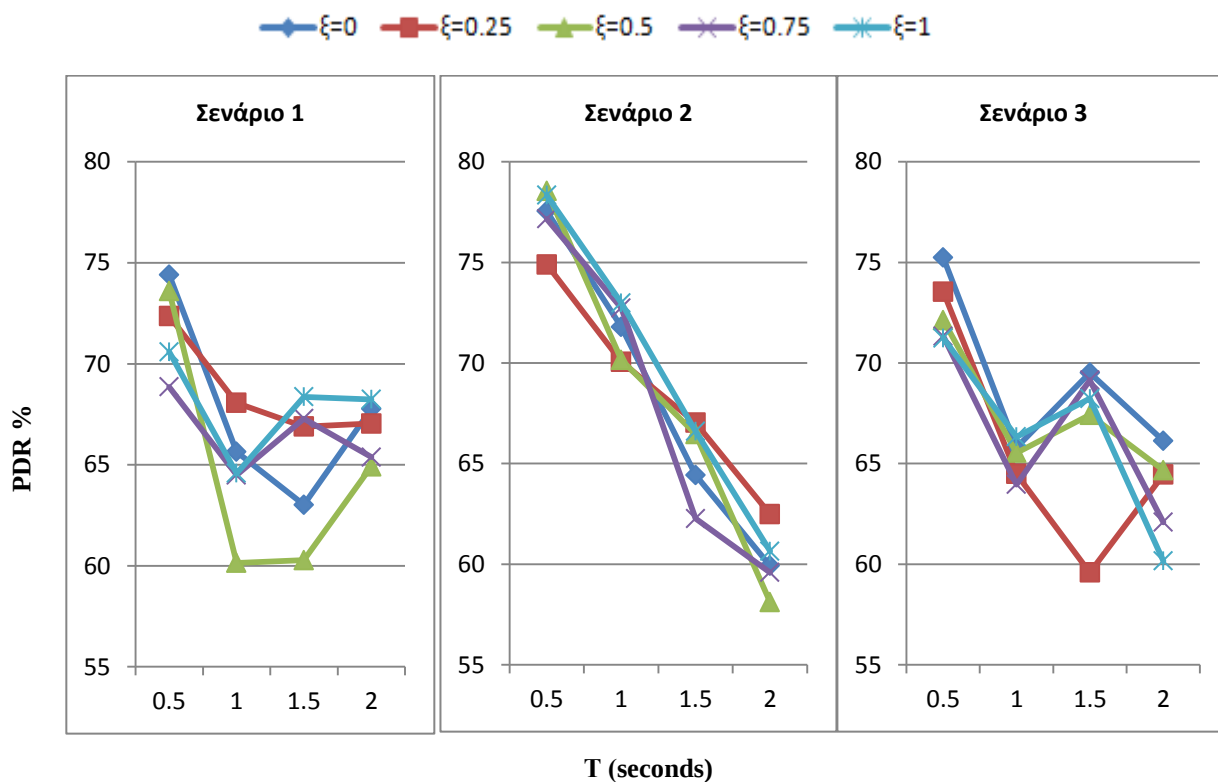
Η πέμπτη προσέγγιση που λήφθηκε υπόψη, χρησιμοποιεί επιπλέον τη νέα παράμετρο α (που εισήχθηκε ειδικά για αυτή την προσέγγιση) και τροποποιεί τη συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) ώστε να γίνει συναρτήσει του α . Η παράμετρος αυτή, όπως μπορούμε να δούμε από την Εξίσωση 3.6, είναι στην πραγματικότητα η παράμετρος η οποία αλλάζει το βάρος της σημαντικότητας της ενέργειας με τις άλλες παραμέτρους του πρωτοκόλλου Flock-CC.

Η μεταβλητή α είναι η μεταβλητή απόδοσης σημαντικότητας, η οποία παίρνει τιμές στο διάστημα $0 \leq \alpha \leq 1$. Για την πειραματική αξιολόγηση αυτής της προσέγγισης, η μεταβλητή α θα πάρει τις τιμές $\alpha = \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$, με την ίδια λογική που πήρε τις αντίστοιχες τιμές η παράμετρος ξ . Όταν $\alpha=1$, τότε λαμβάνεται υπόψη μόνο το πρώτο μέρος της συνάρτησης επιθυμητότητας (desirability function) και ουσιαστικά είναι το πρωτόκολλο Flock-CC [1], του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στο

υποκεφάλαιο 4.5.1, και για αυτό το λόγο δεν θα παρουσιαστούν εδώ. Για κάθε μια από τις υπόλοιπες τιμές για το alpha που θα μελετηθούν ακολουθεί ξεχωριστό υποκεφάλαιο.

4.5.6.1 Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.0$

Στην πρώτη αξιολόγηση της προσέγγισης αυτής, θέτουμε την μεταβλητή $\alpha=0$. Αυτό σημαίνει ότι η επιθυμητότητα κάθε γειτονικού κόμβου είναι ίση με την κανονικοποιημένη υπολειπόμενη ενέργεια εκείνου του κόμβου, και κατά συνέπεια το πακέτο έλκεται περισσότερο από κόμβους με μεγαλύτερη ενέργεια.

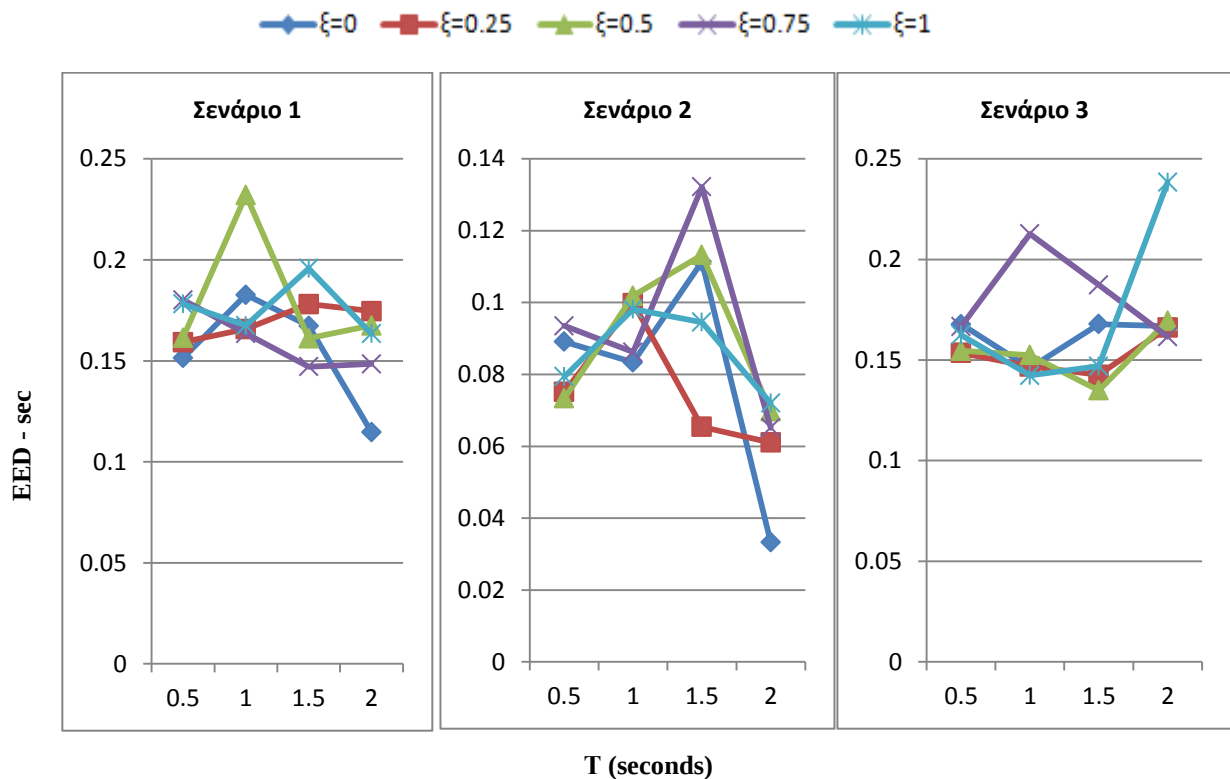


Σχήμα 4.25: Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio – PDR) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.0$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Όπως μπορούμε να δούμε από τις γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 4.25 της προηγούμενης σελίδας, το μεγαλύτερο Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων που έφτασαν στον

κόμβο sink είναι 74.4%, 71.8% και 75.2% για τα σενάρια 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Για όλα τα σενάρια, οι τιμές αυτές παρατηρήθηκαν για $T=0.5\text{sec}$, και για $\xi=0$ για τα σενάρια 1 και 3, ενώ για το σενάριο 2 ήταν για $\xi=0.25$. Η εξήγηση των καλών αποτελεσμάτων για αυτές τις τιμές για T και ξ , είναι ότι τα πακέτα μπορεί να κινούνται συνεκτικά, όμως το κάθε πακέτο i έλκεται από τον γειτονικό κόμβο με την μεγαλύτερη ενέργεια. Λόγω όμως του ότι η ενέργεια των κόμβων που παραλαμβάνουν και στέλνουν πακέτα συνεχώς μειώνεται, θα υπάρχει μια ομοιόμορφη διανομή των πακέτων ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους, μειώνοντας τις συγκρούσεις στο ασύρματο μέσο ενώ αυξάνεται το PDR.

Τα αποτελέσματα αυτής της προσέγγισης με $\alpha=0$, είναι κατά 5% καλύτερα απ' ότι το Flock-CC όσο αφορά το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR).

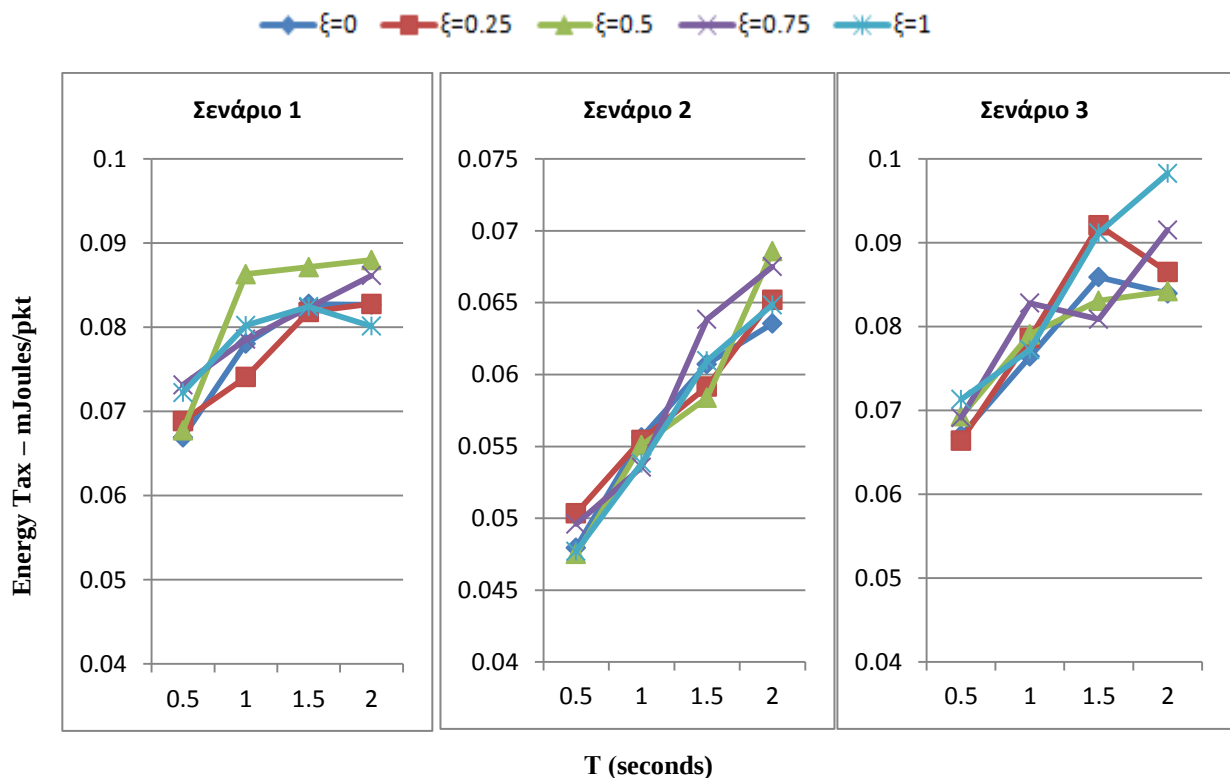


Σχήμα 4.26: Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay – EED) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.0$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

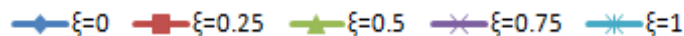
Και όπως είναι αναμενόμενο η προσέγγιση αυτή έχει και καλύτερη Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο από το πρωτόκολλο Flock-CC, μιας και το ποσοστό των πακέτων που φτάνουν στον κόμβο sink είναι μεγαλύτερο, και άρα δημιουργήθηκαν λιγότερες

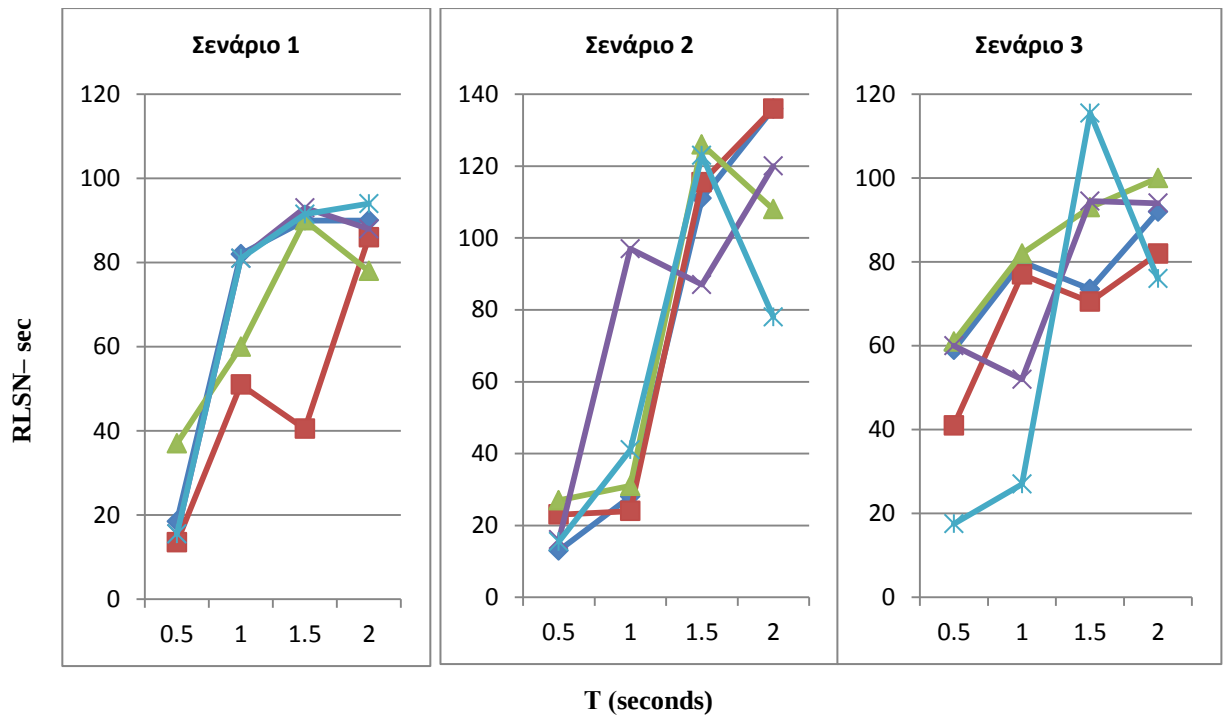
συγκρούσεις, οπότε η Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι μικρότερη εδώ. Πιο συγκεκριμένα αυτή η προσέγγιση έχει το μισό χρόνο Μέσης Καθυστέρησης από άκρο σε άκρο, από ότι στο πρωτόκολλο Flock-CC. Τα αποτελέσματα για τη Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (Σχήμα 4.27).

Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων γραφικών παραστάσεων είναι παρόμοια με εκείνα του Flock-CC πρωτοκόλλου.



Σχήμα 4.27: Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.0$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.



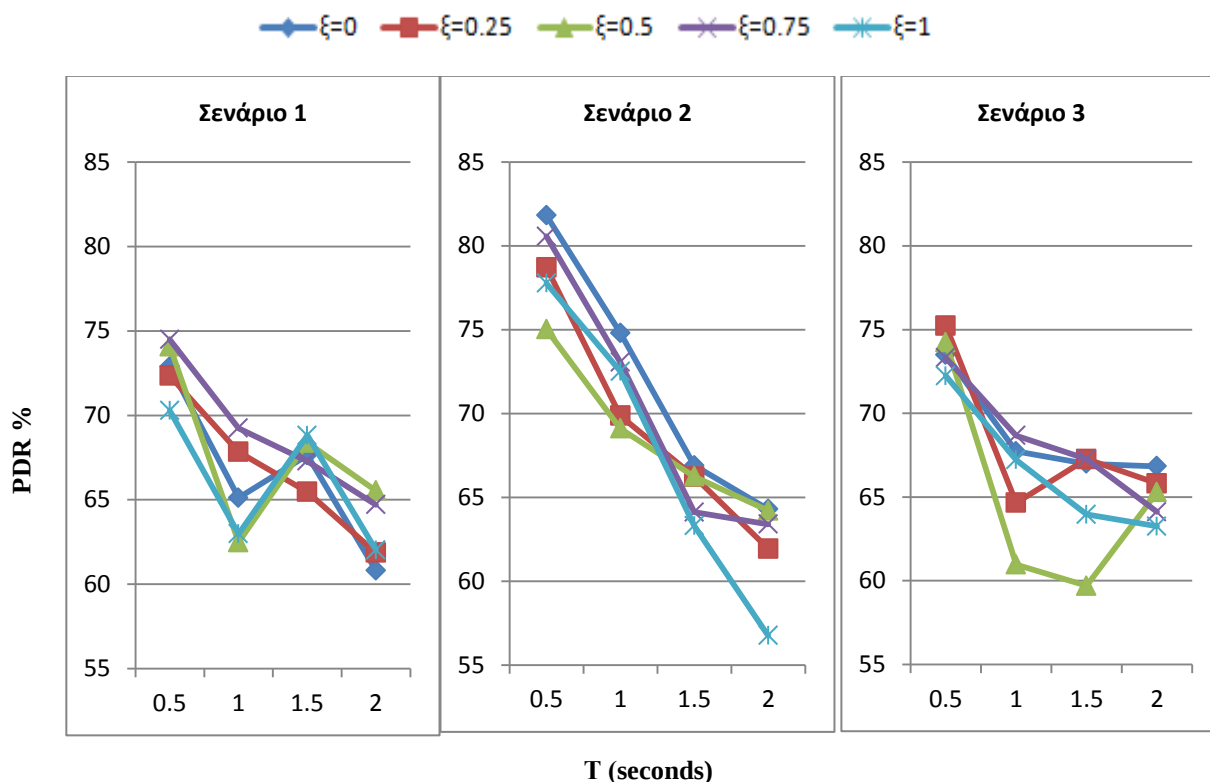


Σχήμα 4.28: Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (Remaining Lifetime of Sensor Networks – RLSN) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.0$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

4.5.6.2 Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.25$

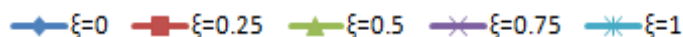
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για την προσέγγιση 5 και για την μεταβλητή $\alpha=0.25$. Αυτή η προσέγγιση κάνει συνδυασμό της έλξης της υπολειπόμενης ενέργειας προς κόμβους με υψηλή υπολειπόμενη κανονικοποιημένη ενέργεια και της επιθυμητότητας όπως ορίζεται από το Flock-CC, από τις δυνάμεις έλξης και απώθησης. Οι δυνάμεις έλξης και απώθησης αποτελούν το 25% της τιμής της συνάρτησης επιθυμητότητας, ενώ η έλξη της ενέργειας καθορίζει το υπόλοιπο 75%.

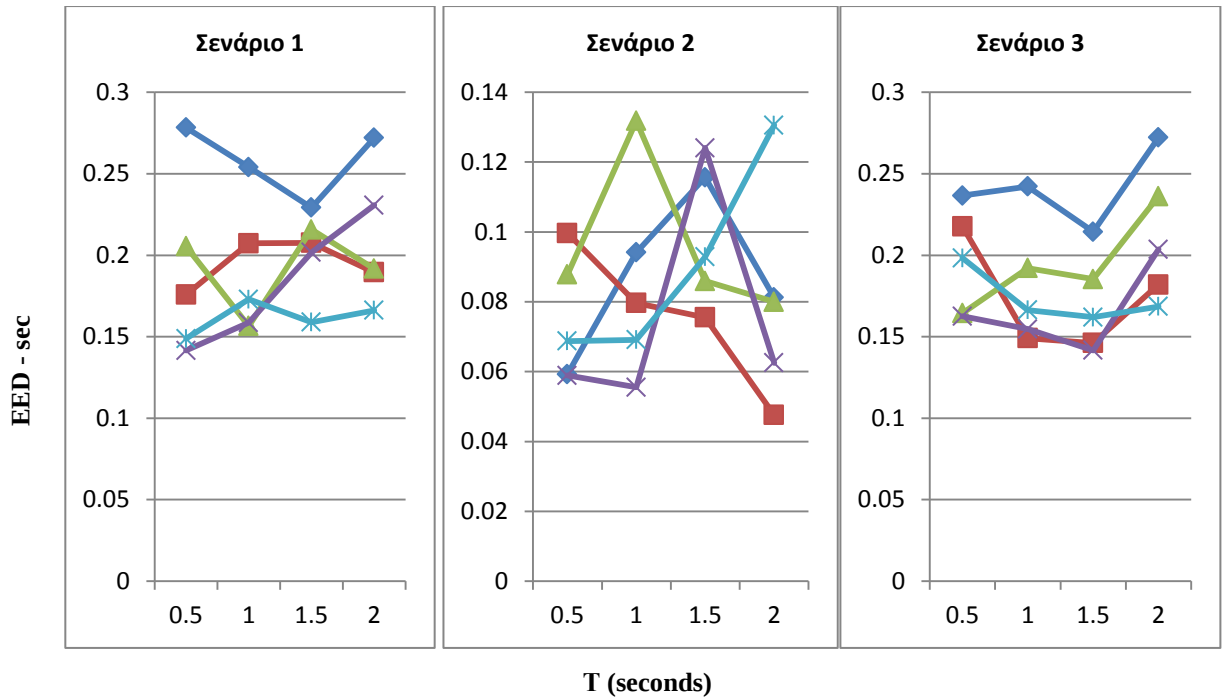
Στην πρώτη μετρική που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των διάφορων προσεγγίσεων, που είναι το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR), η προσέγγιση αυτή με $\alpha=0.25$ φαίνεται να υπερέχει στο πρώτο σενάριο με περίπου 5% καλύτερα αποτελέσματα. Η ίδια υπεροχή παρατηρείται και για το σενάριο 3. Στο σενάριο 2 όμως τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά με εκείνα του πρωτοκόλλου Flock-CC. (Σχήμα 4.29)



Σχήμα 4.29: Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio – PDR) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.25$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Η Μέση Καθυστέρηση από Άκρο-σε-Άκρο (Σχήμα 4.30) στο σενάριο 2 μένει σχεδόν η ίδια, ενώ μειώνεται στο ήμισυ στα σενάρια 1 και 3 (μέχρι και 0.25 δευτερόλεπτα). Στα σενάρια 1 και 3, τα χειρότερα αποτελέσματα που έδωσαν τα διαφορετικά ξ είναι για $\xi=0$. Για το σενάριο 1, τα χειρότερα αποτελέσματα ήταν για $T=0.5$ και $\xi=0$, με την καθυστέρηση να φτάνει τα 0.28 δευτερόλεπτα. Για το σενάριο 2 ήταν για $T=2$ και $\xi=0.25$ με καθυστέρηση 0.13 δευτερόλεπτα και για το σενάριο 3 για $T=0.5$ και $\xi=0$ η μέγιστη μέση καθυστέρηση να φτάνει στα 0.27 δευτερόλεπτα.

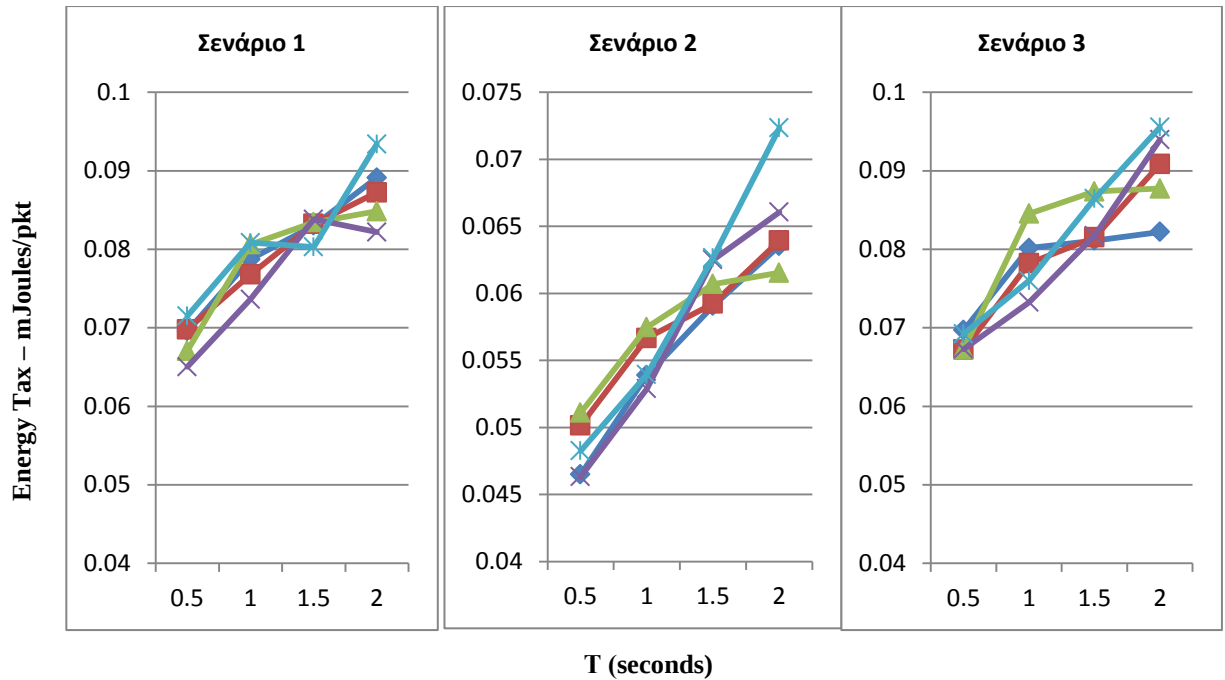




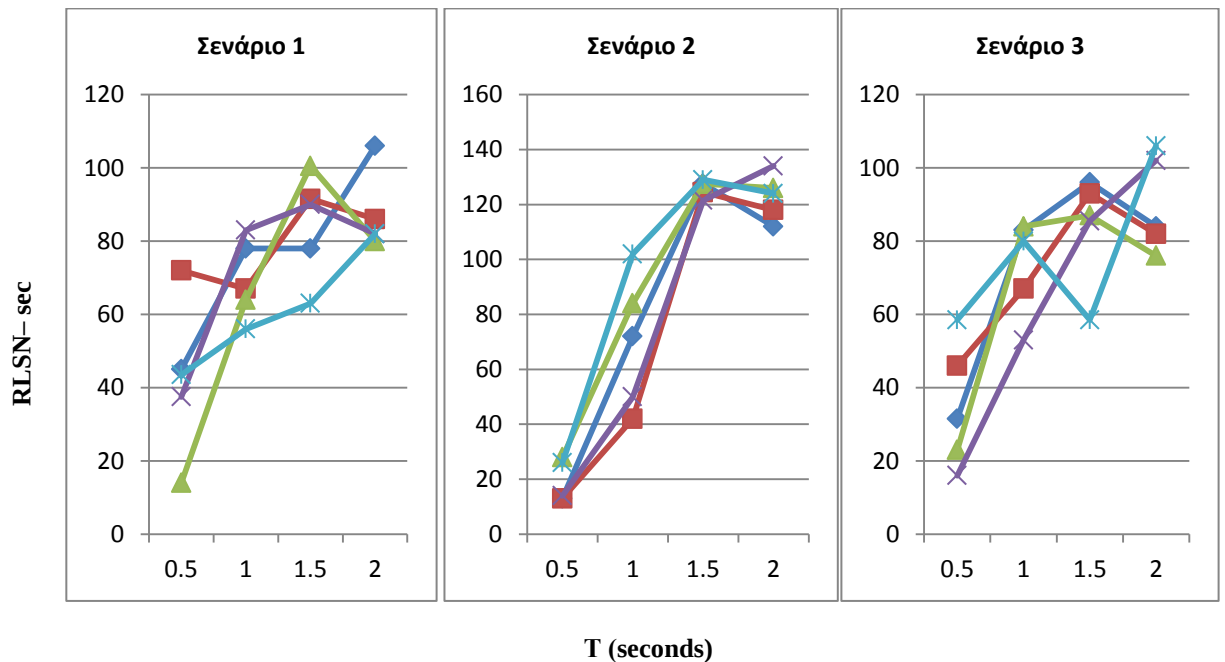
Σχήμα 4.30: Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay – EED) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.25$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Όσο αφορά τα αποτελέσματα για την Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax), τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.31 που ακολουθεί, παρουσιάζονται μειωμένα κατά περίπου 0.01 mJoules/pkt, ενώ για την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής οι διαφορές επίσης δεν είναι πολύ μεγάλες. Βελτίωση βλέπουμε για $\xi=0.25$ και $T=1.5$ στο σενάριο 1 κατά 10 δευτερόλεπτα, αλλά και για $\xi=0.5$ και $T=1.5$. Αύξηση παρατηρείται και για $T=0.5$ και $\xi=0.25$ για περίπου 30 δευτερόλεπτα. Αντίθετα για $\xi=1$, υπάρχει μια γενική μείωση στην Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων. Για το σενάριο 3, μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει μια αύξηση σε σχέση με το αρχικό Flock-CC πρωτόκολλο που μπορεί να φτάσει και τα 20 δευτερόλεπτα.

—◆— $\xi=0$ —■— $\xi=0.25$ —▲— $\xi=0.5$ —×— $\xi=0.75$ —*— $\xi=1$



Σχήμα 4.31: Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.25$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

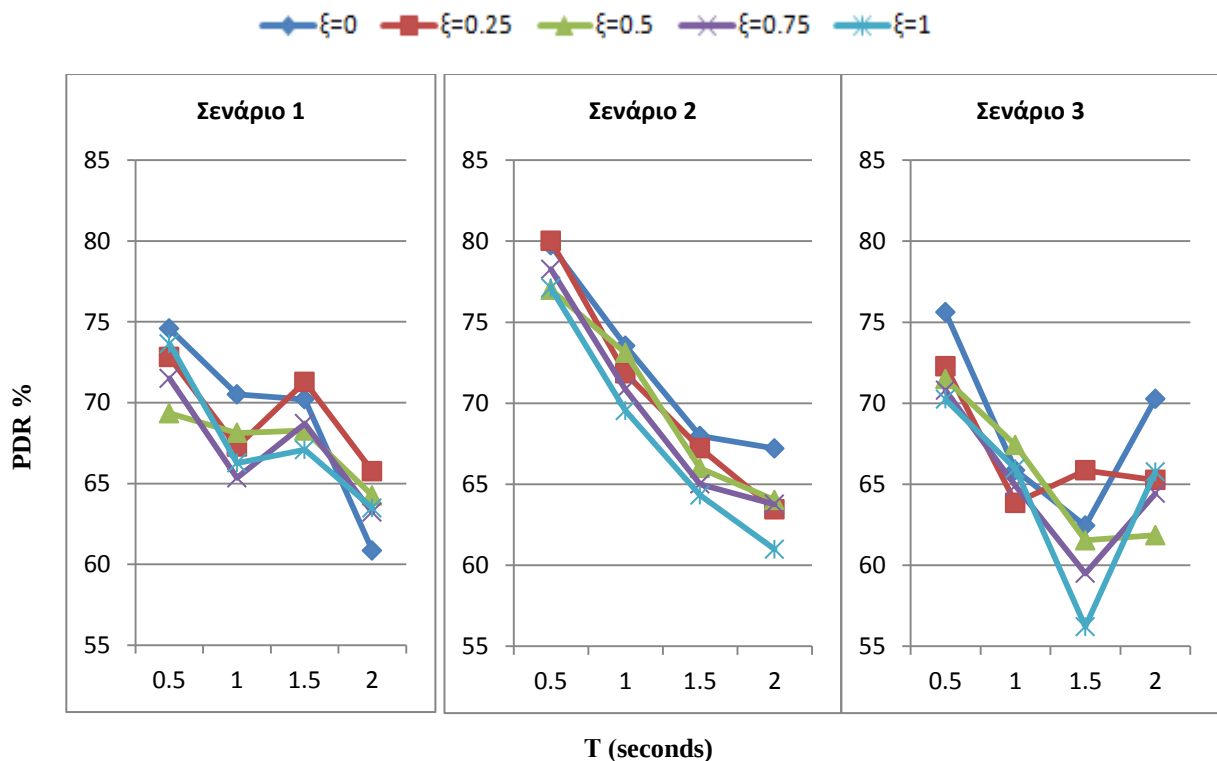


Σχήμα 4.32: Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (Remaining Lifetime of Sensor Networks – RLSN) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.25$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

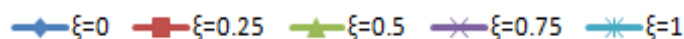
4.5.6.3 Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.5$

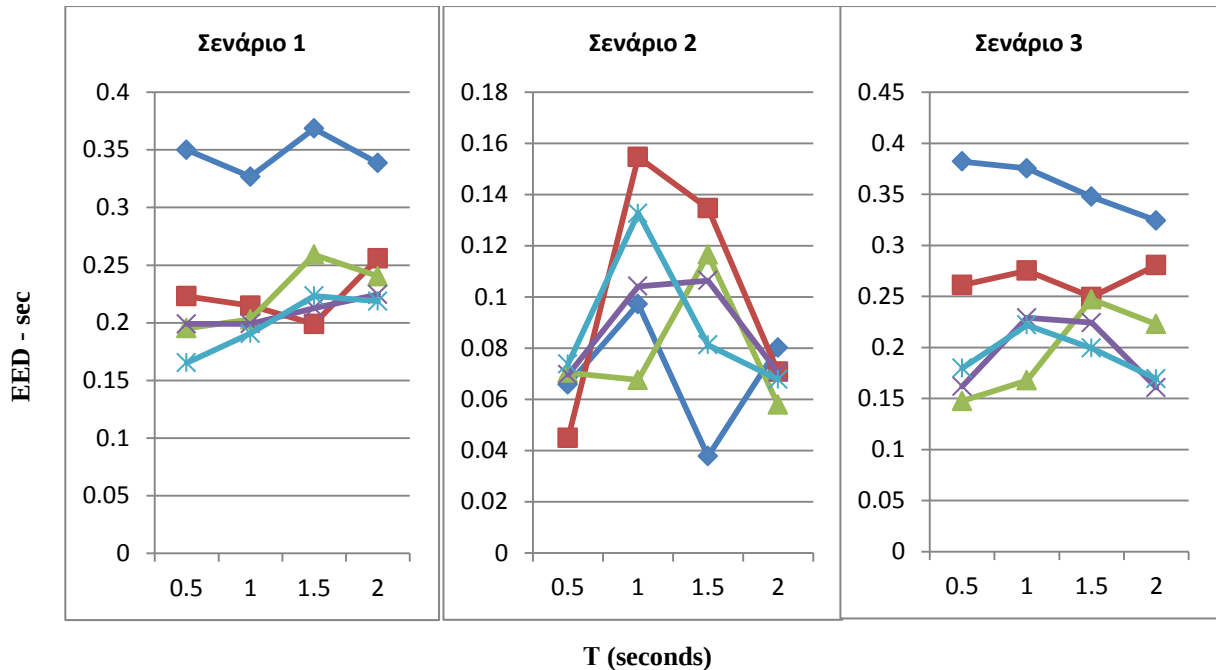
Σε αυτή την προσέγγιση έχουμε θέση την τιμή της μεταβλητή $\alpha=0.5$. Οπότε ο συνδυασμό της έλξης ενέργειας προς κόμβους με υψηλή υπολειπόμενη κανονικοποιημένη ενέργεια και της επιθυμητότητας όπως ορίζεται από το Flock-CC, από τις δυνάμεις έλξης και απόθησης, μοιράζεται στα ίσα. Δηλαδή η τιμή της συνάρτησης επιθυμητότητας αποτελείται κατά 50% από την έλξη της υπολειπόμενης ενέργειας του γειτονικού κόμβου, και κατά 50% από τις δυνάμεις έλξης και απόθησης όπως ορίζεται από το Flock-CC.

Τα αποτελέσματα που πήραμε για το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR), σε αυτή την προσέγγιση με $\alpha=0.5$, είναι και πάλι καλύτερα σε σχέση με εκείνα του Flock-CC περίπου κατά 5%. Εδώ, όπως και στις υπόλοιπες προσεγγίσεις υπάρχει μείωση στο Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων όσο το T μεγαλώνει.



Σχήμα 4.33: Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio – PDR) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.5$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

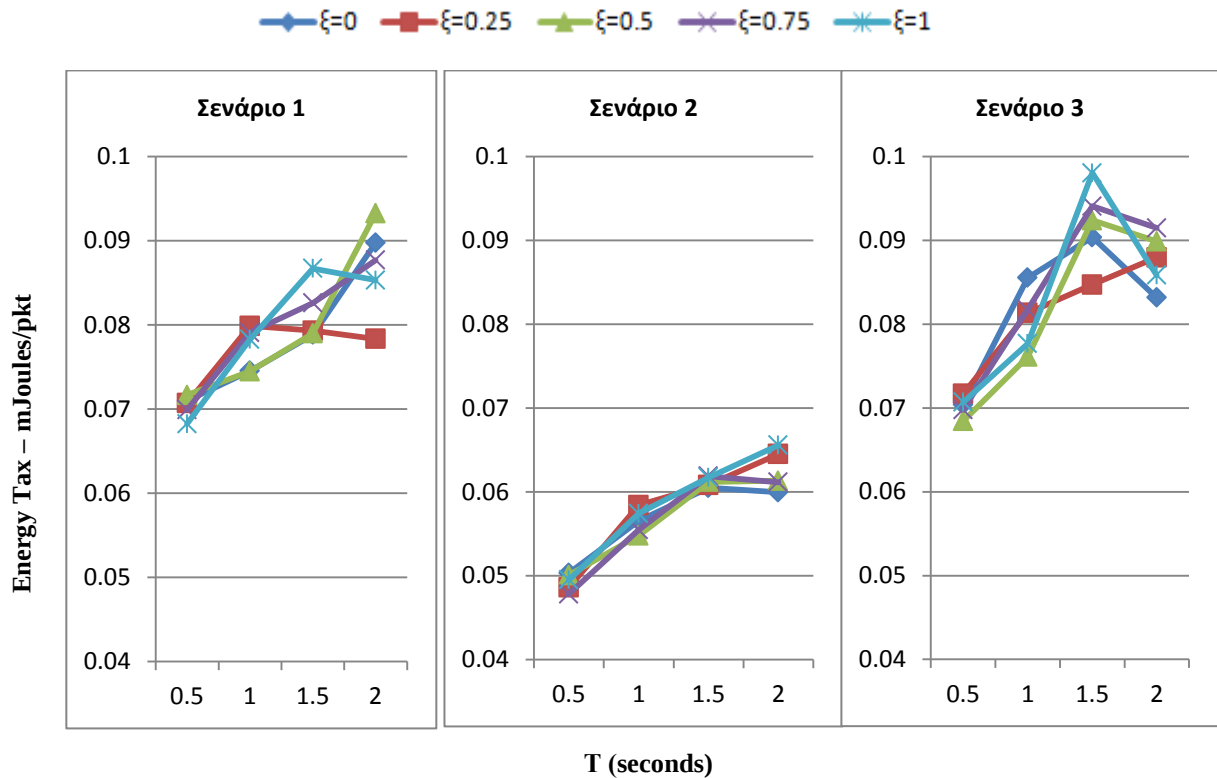




Σχήμα 4.34: Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay – EED) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.5$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Στο σενάριο 1, όπως μπορούμε να δούμε στη γραφική παράσταση, Σχήμα 4.33, υπάρχει μια αύξηση για όλα τα ξ όταν $T=1.5$ δευτερόλεπτα. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στην προηγούμενη προσέγγιση όπου $\alpha=0.25$. Αντίθετα, στο πρωτόκολλο Flock-CC δεν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο, αλλά μια συνεχής μείωση στο ποσοστό όσο το T μεγαλώνει. Έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε ότι υπάρχει βελτιστοποίηση με την εισαγωγή της μεταβλητής στο $\alpha=0.5$, και ειδικά για το συνδυασμό των ξ με την περίοδο να είναι $T=1.5$.

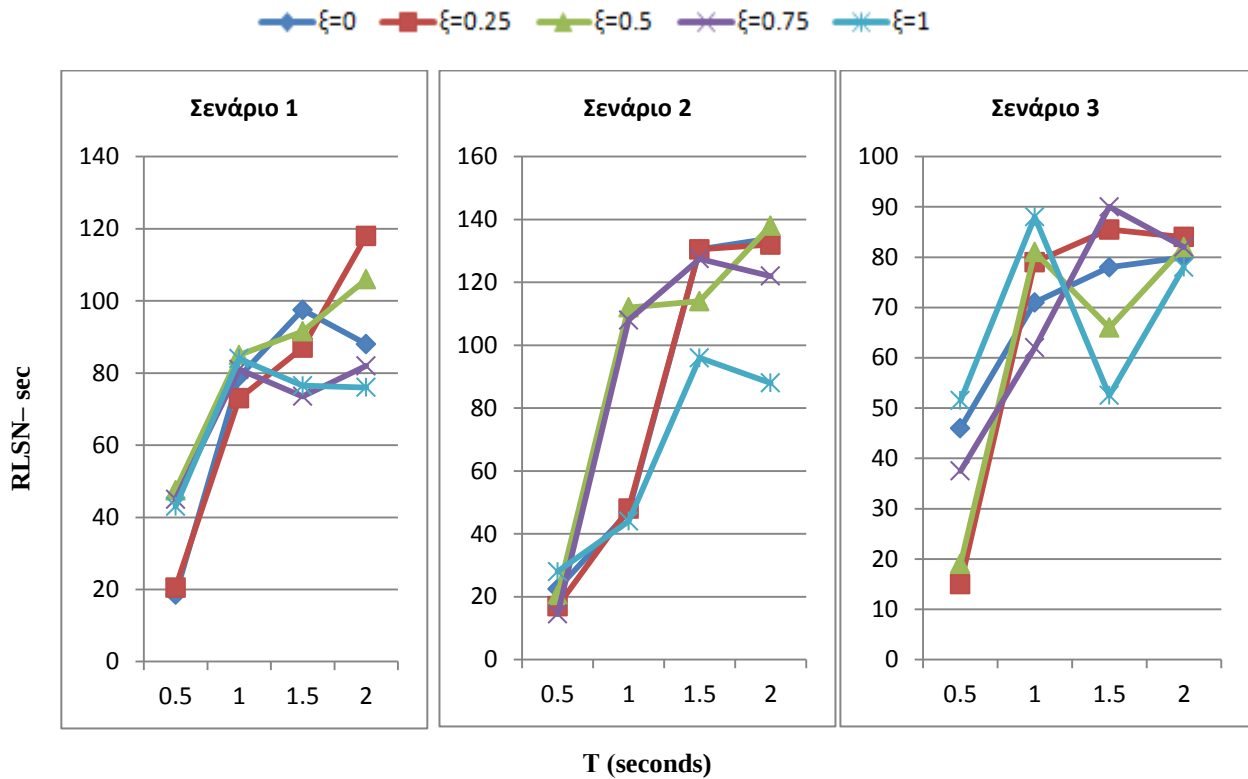
Μείωση παρατηρούμε και στην Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (EED), Σχήμα 4.34. Στα σενάρια 1 και 3 μπορούμε να δούμε ξεκάθαρα ότι τα χειρότερα αποτελέσματα για αυτή την μετρική τα έχουμε για $\xi=0$, όπως και στο Flock-CC, με τη διαφορά ότι οι τιμές εδώ είναι μέχρι και 0.1 δευτερόλεπτο πιο μικρές σε σχέση με εκείνες στο Flock-CC.



Σχήμα 4.35: Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.5$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Στην προηγούμενη γραφική παράσταση (Σχήμα 4.35) των τριών σεναρίων για την Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.5$, μπορούμε να δούμε ότι η Μέση Κατανάλωση Ενέργειας για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων στο sink κυμαίνεται μεταξύ 0.07 και 0.1 mJoules/pkt. Όπως ήταν αναμενόμενο οι τιμές είναι μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες για το πρωτόκολλο Flock-CC, μιας και το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) εδώ είναι μεγαλύτερο και κατά συνέπεια δημιουργήθηκε μικρότερος αριθμός συγκρούσεων (collisions) ή/και γεμίσματα ουράς (buffer overflow), οπότε χρειάστηκε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας για να φτάσει στον προορισμό του το πακέτο. Αξίζει να σημειωθεί η μείωση στην μέση ενέργεια που χρειάστηκε ένα πακέτο όταν είχαμε $T=2$, και αυτό είναι λογικό αν προσέχουμε την αντίστοιχη γραφική στο Σχήμα 4.33 όπου μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει αύξηση στο Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων. Πιο

κάτω, στο Σχήμα 4.36 μπορούμε να δούμε την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (RLSN) η οποία δεν διαφέρει κατά πολύ από την αντίστοιχη για το Flock-CC.



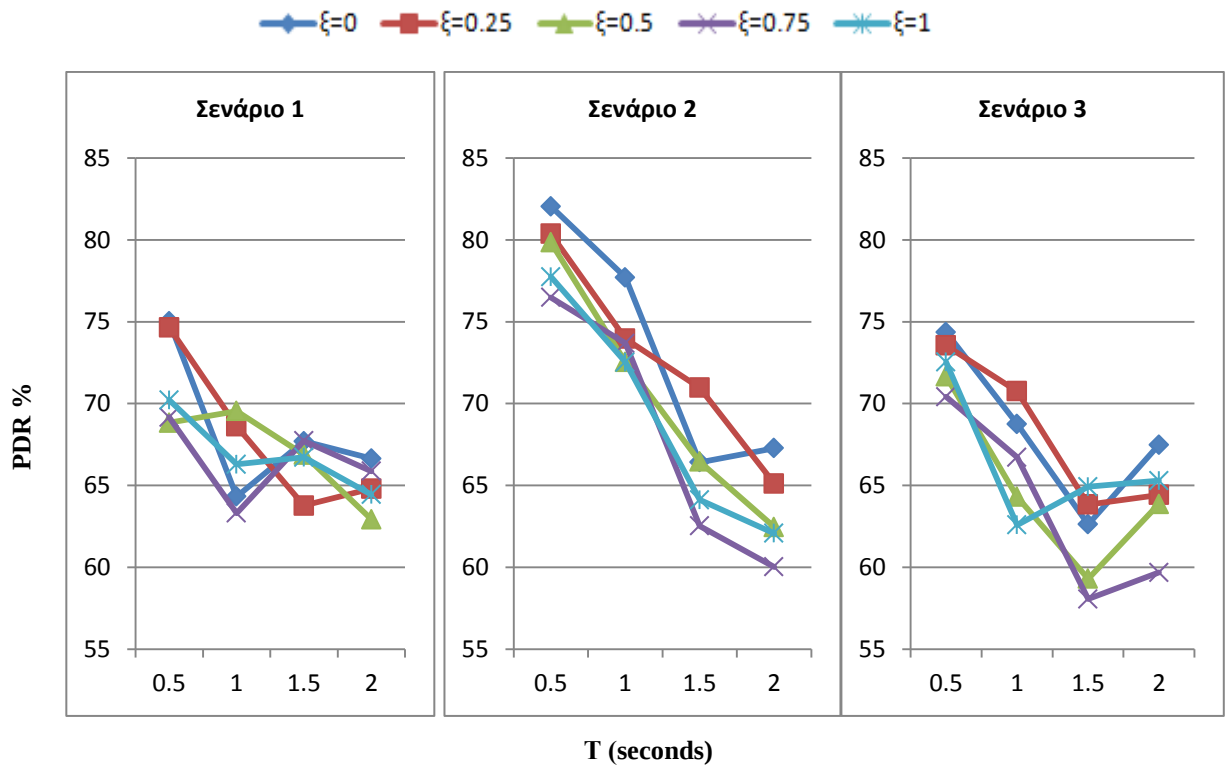
Σχήμα 4.36: Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (Remaining Lifetime of Sensor Networks – RLSN) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.5$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

4.5.6.4 Προσέγγιση $\alpha = 0.75$

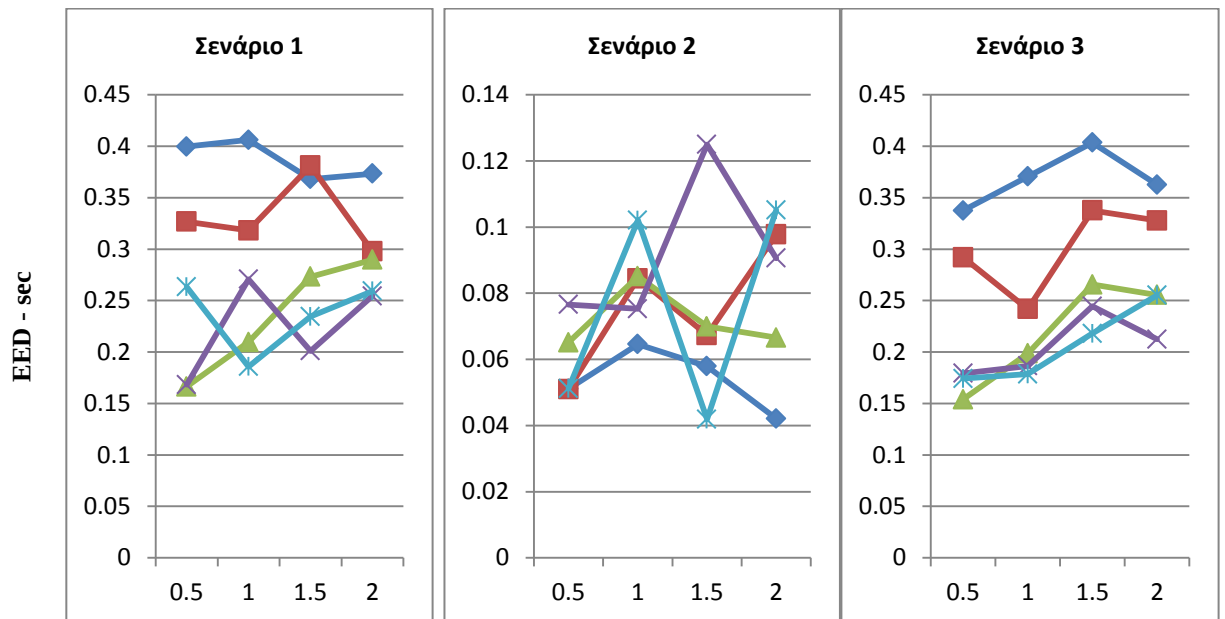
Η προσέγγιση 5 εδώ αξιολογείται με την τιμή της μεταβλητής α να είναι 0.75. Και εδώ γίνεται συνδυασμός της έλξης ενέργειας προς κόμβους με υψηλή υπολειπόμενη κανονικοποιημένη ενέργεια και της επιθυμητότητας όπως ορίζεται από το Flock-CC, από τις δυνάμεις έλξης και απόθησης. Οι δυνάμεις έλξης και απόθησης αποτελούν το 75% της τιμής της συνάρτησης επιθυμητότητας, ενώ η έλξη της ενέργειας καθορίζει το υπόλοιπο 25%.

Λόγω της μεγάλης ομοιότητας που έχει η προσέγγιση αυτή με το πρωτόκολλο Flock-CC (75% της τιμής της επιθυμητότητας είναι το ίδιο), τα αποτελέσματα για όλες τις μετρικές

είναι πολύ κοντά. Υπάρχει μια μικρή βελτίωση στα αποτελέσματα αυτής της προσέγγισης, όπως φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν, Σχήμα 4.37 - 4.40.

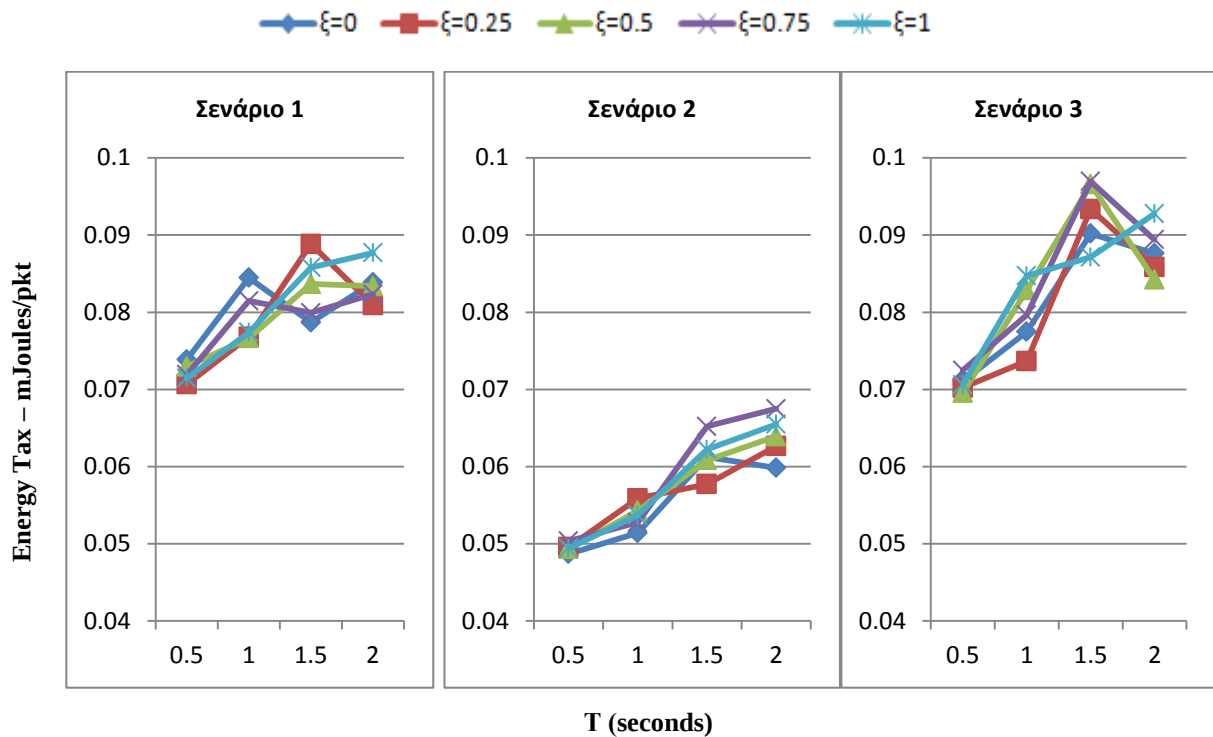


Σχήμα 4.37: Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (Packet delivery ratio – PDR) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.75$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

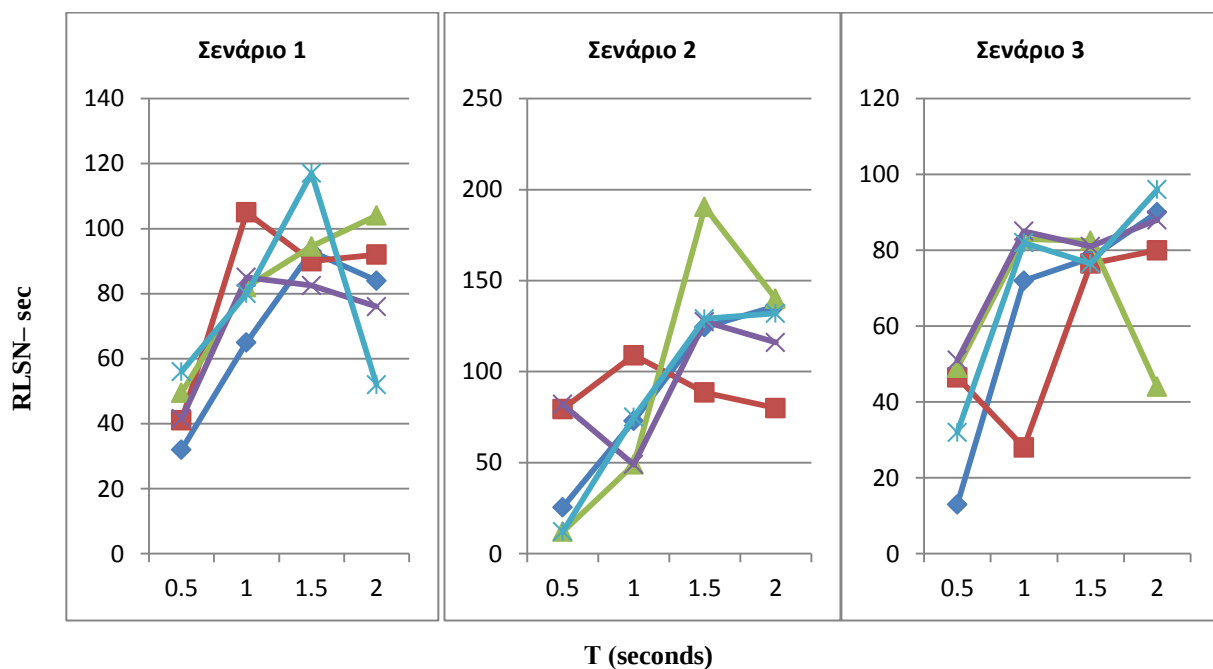


T (seconds)

Σχήμα 4.38: Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay – EED) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.75$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.



Σχήμα 4.39: Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.75$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.



Σχήμα 4.40: Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (Remaining Lifetime of Sensor Networks – RLSN) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.75$ με όλα τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου.

Στα πιο κάτω υποκεφάλαια παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις διάφορες προσεγγίσεις, ξεκινώντας από το πρωτόκολλο Flock-CC όπως ορίστηκε στο [1]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις πέντε προσεγγίσεις που μελετήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική.

4.6 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για Flock-CC και Προσεγγίσεις

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα αρχικά του πρωτοκόλλου Flock-CC και στην συνέχεια της κάθε μιας από τις πέντε (5) προσεγγίσεις που μελετήθηκαν στην πειραματική αξιολόγηση (υποκεφάλαιο 4.5).

4.6.1 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Flock-CC

Τα αποτελέσματα του πρωτοκόλλου Flock-CC στο [1], είναι καλύτερα σε σχέση με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 4.5.1 λόγω του ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα σενάρια έτρεχαν για πολύ περισσότερο χρόνο εδώ, έχοντας ως αποτέλεσμα πολλοί ή και όλοι οι κόμβοι να πεθάνουν πριν το τέλος του σεναρίου. Το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) κυμαίνεται από 57% μέχρι 79,2% για το Flock-CC πρωτόκολλο χωρίς τροποποιήσεις (Σχήμα 4.3).

Από τις γραφικές παραστάσεις των τριών σεναρίων για την Μέση Καθυστέρηση από Άκρο-σε-Άκρο (End-to-End Delay – EED), Σχήμα 4.4, για το πρωτόκολλο Flock-CC, στα τρία σενάρια η Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι από 0.04 μέχρι 0.48 δευτερόλεπτα. Από τις γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 4.5 μπορούμε να παρατηρήσουμε τη Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax), η οποία είναι από 0.05 μέχρι 0.1 mJoules για το κάθε πακέτο που φτάνει στον κόμβο sink. Η Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (RLSN) κυμαίνεται από 13,5 μέχρι 172,5 δευτερόλεπτα. Οι μικρές τιμές για το RLSN, οι οποίες παρατηρούνται και στα σενάρια των επόμενων προσεγγίσεων, είναι για $T=0.5$ δευτερόλεπτα και αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι

η κατάσταση του δικτύου (κατανάλωση ενέργειας και αποστάσεις hop) σταθεροποιούνται πολύ γρήγορα λόγω το ότι στέλλονται πακέτα ελέγχου ανά τακτά χρονικά διαστήματα και γίνονται οι ανάλογες ενημερώσεις για την απόσταση hop του κάθε κόμβου από το sink πολύ γρήγορα.

Στις γραφικές παραστάσεις για την χρονική στιγμή κατά την οποία δεν υπάρχει επαρκής κάλυψη του δικτύου (πεθάνουν 70% των κόμβων), μπορούμε να δούμε ξεκάθαρα ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις τιμές για τα διάφορα ξ (μέγιστο στα περίπου 50 δευτερόλεπτα διαφορά), στα διάφορα σενάρια. Συγκεκριμένα κινούνται μεταξύ 1045,5 μέχρι 3134 δευτερόλεπτα. Αισθητή είναι όμως η διαφορά όσο αφορά την αλλαγή της παραμέτρου T , και την στιγμή που χάνεται η κάλυψη του δικτύου. Όσο η παράμετρος T αυξάνεται, αυξάνεται και η χρονική στιγμή κατά την οποία χάνεται η κάλυψη του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να δούμε ότι για $T=0.5$ δευτερόλεπτα η Κάλυψη Δικτύου χάνεται περίπου στα 1000 δευτερόλεπτα, ενώ για $T=2$ δευτερόλεπτα χάνεται στα 3000 δευτερόλεπτα. Αυτό καταδεικνύει τη μεγάλη κατανάλωση ενέργειας που χρειάζεται για την αποστολή πακέτων ελέγχου (control packets), και τη σημαντικότητα σωστής επιλογής του T , ώστε να μην στέλλονται περισσότερα πακέτα ελέγχου από όσα θα χρειαζόνταν για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Οι χρόνοι που φαίνονται σε αυτές τις γραφικές παραστάσεις, Κάλυψης Δικτύου έχουν πολύ κοντινές τιμές για όλες τις προσεγγίσεις που μελετήθηκαν. Ο λόγος είναι η πολύ μικρή αρχική ενέργεια που δόθηκε σε κάθε κόμβο, και δεν δόθηκε η ευκαιρία στην προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά να τροποποιήσει κατά πολύ τα αποτελέσματα αυτής της μετρικής.

4.6.2 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 1

Στην Προσέγγιση 1, όπου έχει τροποποιηθεί η συνάρτηση επιθυμητότητας του πρωτοκόλλου Flock-CC, όπως εξηγείται στο υποκεφάλαιο 3.2.1 και παρουσιάζεται στην εξίσωση 3.1, μπορούμε να δούμε ότι το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) κυμαίνεται μεταξύ 59.4% και 82.9%. Η Μέση Καθυστέρηση από Άκρο-σε-Άκρο (End-to-End Delay – EED) είναι μεταξύ 0.05 και 0.49 δευτερόλεπτα, ενώ η Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) κυμαίνεται μεταξύ 0,04 και 0,1 mJoules/pkt.

Όσο αφορά τη Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Δικτύου και την κάλυψη δικτύου, τα αποτελέσματα (Σχήμα 4.11 και 4.12) είναι παρόμοια με εκείνα του πρωτοκόλλου Flock-CC, Σχήμα 4.6 και 4.7. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές είναι από 13,5 μέχρι 160 δευτερόλεπτα για την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Δικτύου, και για την Κάλυψη Δικτύου οι τιμές είναι 1045 με 3174 δευτερόλεπτα.

Η μόνη βελτίωση που παρατηρήθηκε είναι αύξηση του Ποσοστού Παράδοσης Πακέτων (δεδομένων) στον κόμβο sink, της τάξεως του 5% για όλα τα σενάρια. Βελτιώθηκε και η χρονική στιγμή κατά την οποία χάνεται η Κάλυψη του δικτύου. Κατά τα άλλα δε φαίνεται η προσέγγιση αυτή να κάνει κάποια σημαντική αλλαγή στην τιμή της ενέργειας που καταναλώνεται για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων στο sink, παρόλο που έλκεται από κόμβους με μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας.

4.6.3 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 2

Εδώ χρησιμοποιείται η συνάρτηση επιθυμητότητας που χρησιμοποιείται και στο πρωτόκολλο Flock-CC (και περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.2.2), και η τροποποίηση που έγινε εδώ είναι να χρησιμοποιηθεί ένας επιπλέον έλεγχος πριν τον καθορισμό του υποσυνόλου κόμβων που πιθανόν να επισκεφτεί το πακέτο i .

Το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) έχει μειωθεί σε σχέση με το Flock-CC και είναι από 29%-77.7%. Ο λόγος της μείωσης αυτής οφείλεται στους κανόνες που εισάχθηκαν, οι οποίοι δεν επιτρέπουν την αποστολή πακέτων στο σύνολο των κόμβων που βρίσκονται μπροστά (μικρότερη απόσταση σε hops από τον κόμβο sink) όταν η μέση ενέργεια των κόμβων μπροστά πέσει κάτω από 30%. Επιπλέον όταν το ποσοστό στους κόμβους στην ίδια απόσταση με τον κόμβο που φιλοξενεί κάποιο πακέτο, πέσει κάτω από 50%, τα πακέτα προωθούνται σε κόμβους με μεγαλύτερο αριθμό hop. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πακέτα να κινούνται σε κύκλους στο δίκτυο, ενώ ταυτόχρονα αναγκάζονται να ανοίγουν το σμήνος πακέτων έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συγκρούσεων των πακέτων όταν αυτά κινούνται διαγώνια προς τον sink (λόγω της έλξης από το μαγνητικό πεδίο).

Όσο αφορά την Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (EED) βρίσκεται μεταξύ 0,04 και 0,42 δευτερόλεπτα. Η μικρή μείωση στην καθυστέρηση ουσιαστικά παρατηρείται στο

σενάριο 3 και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος, και αφού οι κόμβοι στην κοντινότερη διαδρομή (ή κοντά στην κοντινότερη) χάσουν ποσοστό της ενέργειας, λόγω των επιπλέον κανόνων της προσέγγισης, τα πακέτα δεν θα μπορούν να κινηθούν προς τα εμπρός (αν η μέση ενέργεια < 0.3) και πριν πέσουν οι κόμβοι στο ενδιάμεσο του δικτύου, τα πακέτα θα έχουν ήδη δρομολογηθεί από διαδρομές κοντινότερες στις άκρες του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουν να αποφύγουν την νεκρή ζώνη που δημιουργείται στο σενάριο, πριν ακόμη δημιουργηθεί.

Όπως θα ήταν αναμενόμενο από τα πολύ χαμηλά ποσοστά παράδοσης πακέτων (PDR) του σεναρίου 1 αυτής της προσέγγισης, υπάρχει αυξημένη κατανάλωση ενέργειας (Σχήμα 4.15) η οποία είναι μεταξύ 0,05 και 0,12 mJoules/pkt. Για την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Δικτύου (RLSN), οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 22,5 και 254 δευτερόλεπτα. Η αύξηση αυτή σε σχέση με το πρωτόκολλο Flock-CC βασίζεται στο γεγονός ότι μόλις η ενέργεια στους μπροστινούς κόμβους (και στη συνέχεια τους κόμβους στα πλάγια) πέσει κάτω από ένα ποσοστό θα ξεκινήσουν τα πακέτα να ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές και άρα δεν θα σταθεροποιηθεί η κατάσταση του δικτύου. Η Κάλυψη του δικτύου χάνετε μεταξύ 1046 και 3156 δευτερολέπτων.

4.6.4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 3

Η παρούσα προσέγγιση είναι ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων προσεγγίσεων και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν για τα σενάρια και τον συνδυασμό των παραμέτρων βρίσκονται πιο κάτω.

Αρχικά, από τις γραφικές για το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) παρατηρούμε ότι κινείται μεταξύ 21,4% και 76,3%, τα οποία είναι αρκετά χαμηλά ποσοστά, ειδικά το 21,4% είναι πολύ μικρό ποσοστό. Η Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (EED) δεν διαφέρει κατά πολύ μιας και κινείται μεταξύ 0,05 και 0,37 δευτερόλεπτα. Οι διαφορές και για την Μέση Κατανάλωση Ενέργειας είναι σχεδόν ανύπαρκτες με το Flock-CC, μιας και είναι μεταξύ 0,05 και 0,11 mJoules/pkt. Στις γραφικές παραστάσεις όπου παρατηρείται η Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Δικτύου μπορούμε να δούμε ότι αυξάνεται μέχρι τα 238 δευτερόλεπτα, ενώ η Κάλυψη Δικτύου χάνεται στα 3192,5 δευτερόλεπτα.

4.6.5 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 4

Στην προσέγγιση αυτή δίνεται κάποιο επιπλέον ποσοστό επιθυμητότητας σε κόμβους με ψηλό ποσοστό υπολειπόμενης ενέργειας, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο έλξη προς κόμβους με ψηλότερη υπολειπόμενη ενέργεια.

Στην γραφική παράσταση που αφορά το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) (Σχήμα 4.21), τα ποσοστά κυμαίνονται μεταξύ 55,8% και 81,6%, ενώ στο Σχήμα 4.22, όπου μπορούμε να δούμε την Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (EED), οι τιμές κυμαίνονται από 0,05 μέχρι 0,49 δευτερόλεπτα. Σε σύγκριση με τις τιμές από το πρωτόκολλο Flock-CC, οι τιμές είναι πολύ κοντά για όλα τα σενάρια. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι σε αυτή την προσέγγιση, Προσέγγιση 4, στο σενάριο 1 οι τιμές για $T=0.5$ και 1, για $\xi=0.5$ και 0.75 είναι πιο μικρές από ότι στην προσέγγιση του πρωτοκόλλου Flock-CC. Επίσης, για το σενάριο 2 στο Flock-CC υπήρχε μείωση για $T=2$, όμως εδώ υπάρχει αύξηση, στα πλαίσια όμως των υπολοίπων τιμών για τη Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο.

Η Μέση Κατανάλωση Ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 0.05 και 0.1 mJoules ανά πακέτο, με αυξητική τάση όσο μεγαλώνει η περίοδος T (όπως και στις υπόλοιπες προσεγγίσεις). Στη συνέχεια παρατηρήθηκε η Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (RLSN) στο Σχήμα 4.24, η οποία είχε μικρότερη τιμή τα 12,5 δευτερόλεπτα και μεγαλύτερη τα 143 δευτερόλεπτα. Γενικά και εδώ τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια με εκείνα του Flock-CC. Αξίζει να παρατηρηθεί η μείωση του RLSN στο σενάριο 3, για $T=1.5$, για όλα τα ξ εκτός για $\xi=0.75$ το οποίο αυξάνεται. Μετά την μείωση στο $T=1.5$ υπάρχει μια μικρή αύξηση. Τέλος, η Κάλυψη Δικτύου σταματά να υφίσταται μεταξύ 1046 και 3132 δευτερόλεπτα.

4.6.6 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 5

Η πέμπτη προσέγγιση που λήφθηκε υπόψη, χρησιμοποιεί επιπλέον τη νέα παράμετρο α (που εισήχθηκε ειδικά για αυτή την προσέγγιση) και τροποποιεί τη συνάρτηση επιθυμητότητας (desirability function) ώστε να γίνει συναρτήσει του α . Η παράμετρος

αυτή, φαίνεται στην Εξίσωση 3.6, και ουσιαστικά αλλάζει το βάρος της σημαντικότητας της ενέργειας με τις άλλες παραμέτρους του πρωτοκόλλου Flock-CC.

Η μεταβλητή α είναι η μεταβλητή απόδοσης σημαντικότητας, η οποία παίρνει τιμές στο διάστημα $0 \leq \alpha \leq 1$. Η πειραματική αξιολόγηση έγινε για τις τιμές $\alpha = \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$. Όταν $\alpha=1$, τότε λαμβάνεται υπόψη μόνο το πρώτο μέρος της συνάρτησης επιθυμητότητας (desirability function) και ουσιαστικά είναι το πρωτόκολλο Flock-CC [1], του οποίου τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 4.6.1, και για αυτό το λόγο δεν θα παρουσιαστούν εδώ. Για κάθε μια από τις υπόλοιπες τιμές για το α που μελετήθηκαν ακολουθούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του καθ' ενός.

4.6.6.1 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.0$

Σε αυτή την προσέγγιση, με $\alpha=0$, η επιθυμητότητα κάθε γειτονικού κόμβου είναι ίση με την κανονικοποιημένη υπολειπόμενη ενέργεια εκείνου του κόμβου, και κατά συνέπεια το πακέτο έλκεται περισσότερο από κόμβους με μεγαλύτερη ενέργεια.

Σε αυτή την προσέγγιση το μεγαλύτερο Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) που έφτασαν στον κόμβο sink είναι 58,1% και το μεγαλύτερο 78,54%. Τα αποτελέσματα εδώ γενικά όμως είναι κατά 5% καλύτερα απ' ότι το Flock-CC όσο αφορά το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR). Λόγω των καλύτερων αποτελεσμάτων όσο αφορά το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR), έχουμε και καλύτερα αποτελέσματα για την Μέση Καθυστερήση από άκρο σε άκρο από το πρωτόκολλο Flock-CC, η οποία εδώ κυμαίνεται μεταξύ 0,03 και 0,21 δευτερόλεπτα. Δηλαδή η Μέση Καθυστερήση είναι η μισή από όση στο σενάριο Flock-C

Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων γραφικών παραστάσεων είναι παρόμοια με εκείνα του Flock-CC πρωτοκόλλου. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές για την Μέση Κατανάλωση Ενέργειας είναι από 0.01 μέχρι 0.09 mJoules για το κάθε πακέτο δεδομένων, για την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Δικτύου Αισθητήρων είναι από 13 μέχρι 136 και τέλος η Κάλυψη Δικτύου σταματά να υφίσταται μεταξύ 1046 και 3144 δευτερολέπτων.

4.6.6.2 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.25$

Εδώ θα παρουσιαστούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την προσέγγιση 5 και για την μεταβλητή $\alpha=0.25$. Δηλαδή οι δυνάμεις έλξης και απώθησης αποτελούν το 25% της τιμής της συνάρτησης επιθυμητότητας, ενώ η έλξη της ενέργειας καθορίζει το υπόλοιπο 75%.

Αρχικά, το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) κυμαίνεται μεταξύ 56,76% και 81,8%, δηλαδή είναι καλύτερα τα αποτελέσματα εδώ, από ότι στο πρωτόκολλο Flock-CC. Με πιο προσεκτική παρατήρηση μπορούμε να δούμε ότι σε αρκετές μετρήσεις υπάρχει αύξηση της τάξης του 5%.

Η Μέση Καθυστέρηση από Άκρο-σε-Άκρο (Σχήμα 4.30) στο σενάριο 2 μένει σχεδόν η ίδια, ενώ μειώνεται στο ήμισυ στα σενάρια 1 και 3 (μέχρι και 0.25 δευτερόλεπτα). Γενικά οι τιμές της μετρικής αυτής κινούνται μεταξύ 0,048 και 0,28 δευτερόλεπτα και είναι πολύ κοντά με την προσέγγιση για $\alpha 0.25$.

Για τα αποτελέσματα της Μέσης Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax), παρουσιάζονται μειωμένα κατά περίπου 0.01 mJoules/pkt, πιο συγκεκριμένα είναι από 0,04 μέχρι 0,095 mJoules/pkt. Για την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής οι διαφορές επίσης δεν είναι πολύ μεγάλες, είναι μεταξύ 13-134 δευτερόλεπτα. Οι τιμές όσο αφορά την Κάλυψη Δικτύου κυμαίνονται από 1046 μέχρι 3144 δευτερόλεπτα.

4.6.6.3 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.5$

Σε αυτή την προσέγγιση έχουμε θέσει την τιμή της μεταβλητή $\alpha=0.5$. Οπότε ο συνδυασμό της έλξης ενέργειας προς κόμβους με υψηλή υπολειπόμενη κανονικοποιημένη ενέργεια και της επιθυμητότητας όπως ορίζεται από το Flock-CC, από τις δυνάμεις έλξης και απώθησης, μοιράζεται στα ίσα. Δηλαδή η τιμή της συνάρτησης επιθυμητότητας αποτελείται κατά 50% από την έλξη της υπολειπόμενης ενέργειας του γειτονικού κόμβου, και κατά 50% από τις δυνάμεις έλξης και απώθησης όπως ορίζεται από το Flock-CC.

Τα αποτελέσματα που πήραμε για το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR), σε αυτή την προσέγγιση με $\alpha = 0.5$, είναι και πάλι καλύτερα σε σχέση με εκείνα του Flock-CC

περίπου κατά 5%. Συγκεκριμένα, οι τιμές είναι από 60,85% μέχρι 80% για το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR), και για την Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (EED) οι τιμές είναι από 0.037 μέχρι 0.382 δευτερόλεπτα, δηλαδή παρατηρούμε και πάλι μείωση.

Οι τιμές για την Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Tax) κυμαίνεται μεταξύ 0.047 και 0.096 mJoules/pkt. Όπως ήταν αναμενόμενο οι τιμές είναι λίγο μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες για το πρωτόκολλο Flock-CC, μιας και το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR) εδώ είναι μεγαλύτερο και κατά συνέπεια δημιουργήθηκε μικρότερος αριθμός συγκρούσεων(collisions) ή/και γεμίσματα ουράς (buffer overflow), οπότε χρειάστηκε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας για να φτάσει στον προορισμό του το πακέτο. Όσο αφορά την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής Δικτύου Αισθητήρων (RLSN) η οποία δεν διαφέρει κατά πολύ από την αντίστοιχη για το Flock-CC, είναι μεταξύ 12 και 134 δευτερολέπτων. Τέλος η Κάλυψη Δικτύου σταματά να υπάρχει μεταξύ των χρονικών στιγμών 1045,5 και 3174 δευτερόλεπτα.

4.6.6.4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.75$

Η τιμή της μεταβλητής α είναι 0.75 εδώ. Οι δυνάμεις έλξης και απώθησης αποτελούν το 75% της τιμής της συνάρτησης επιθυμητότητας, ενώ η έλξη της ενέργειας καθορίζει το υπόλοιπο 25%.

Λόγω της μεγάλης ομοιότητας που έχει η προσέγγιση αυτή με το πρωτόκολλο Flock-CC (75% της τιμής της επιθυμητότητας είναι η ίδια), τα αποτελέσματα για όλες τις μετρικές είναι πολύ κοντά. Υπάρχει μια μικρή βελτίωση στα αποτελέσματα αυτής της προσέγγισης, όπως φαίνονται στις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις στο υποκεφάλαιο 4.5.6.4. Πιο συγκεκριμένα για το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων είναι μεταξύ 58% και 82%, η Μέση Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι από 0,04 και 0,4 δευτερόλεπτα και η Μέση Κατανάλωση Ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 0,048 και 0,096 mJoules ανά πακέτο. Όσο αφορά την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Δικτύου Αισθητήρων κυμαίνεται από 12 μέχρι 190 δευτερόλεπτα, ενώ η Κάλυψη Δικτύου είναι από 1045,5 δευτερόλεπτα μέχρι 3154 δευτερόλεπτα.

4.6.6.5 Ρύθμιση παραμέτρου α

Στον Πίνακα 4.2, μπορούμε να δούμε τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές των μετρήσεων για τις διαφορετικές τιμές της μεταβλητής α που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική αξιολόγηση της προσέγγισης 5. Με κόκκινο χρώμα είναι οι καλύτερες τιμές μετρήσεων που προέκυψαν για κάθε μετρική, ενώ με γαλάζιο χρώμα είναι οι δεύτερες καλύτερες μετρήσεις που πάρθηκαν για την κάθε μετρική.

Μπορούμε να δούμε ότι κάθε προσέγγιση υπάρχει τουλάχιστο μια μετρική στην οποία να υπερέχει από τις άλλες. Η προσέγγιση με $\alpha=0$ έχει τα καλύτερα αποτελέσματα όσο αφορά την Μέση Καθυστέρηση από Άκρο σε Άκρο και τα καλύτερα αποτελέσματα για την Μέση Κατανάλωση Ενέργειας ανά παραδοτέο πακέτο. Τα δεύτερα καλύτερα αποτελέσματα σε αυτές τις δύο μετρικές έχει η προσέγγιση με $\alpha=0.25$. Η προσέγγιση με $\alpha=0.25$ έχει και τα δεύτερα καλύτερα για το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων. Με $\alpha=0.75$ έχουμε τα καλύτερα αποτελέσματα για το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων και για την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων. Έχει επίσης τα δεύτερα καλύτερα αποτελέσματα για τη χρονική στιγμή που χάνεται η Κάλυψη Δικτύου, ενώ τα καλύτερα αποτελέσματα για αυτή την προσέγγιση έχει η προσέγγιση με $\alpha=0.5$. Τέλος, η προσέγγιση με $\alpha=1$, δηλαδή το πρωτόκολλο Flock-CC [1], έχει τα δεύτερα καλύτερα αποτελέσματα για την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων.

Σημαντικό είναι να παρατηρήσουμε ότι καμία από τις περιπτώσεις με τα διαφορετικά α δεν μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη. Υπάρχουν trade-off όσο αφορά την κάθε μια. Για παράδειγμα η προσέγγιση με $\alpha=0$ έχει τα καλύτερα αποτελέσματα για την Μέση Καθυστέρηση από Άκρο σε Άκρο και για την Μέση Κατανάλωση Ενέργειας ανά Παραδοτέο Πακέτο, αλλά μπορούμε να δούμε ότι τα αποτελέσματα που έχει για το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων είναι το πιο χαμηλό. Αντίθετα, η προσέγγιση με $\alpha=0.75$ έχει τα καλύτερα αποτελέσματα για το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων, για την Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων και τα δεύτερα καλύτερα για την στιγμή που χάνεται η Κάλυψη Δικτύου. Οπότε ανάλογα με το τι θεωρούμε ως πιο σημαντικό στο δίκτυο που έχουμε, θα επιλέξουμε την ανάλογη τιμή για την μεταβλητή α . Μια καλή επιλογή, για ένα οποιοδήποτε δίκτυο χωρίς ιδιαίτερες

απαιτήσεις ως προς μια συγκεκριμένη μετρική, θα ήταν για $\alpha=0.25$, μιας και έχει τα δεύτερα καλύτερα αποτελέσματα για τις τρεις από τις πέντε μετρικές που λήφθηκαν υπόψη και η διαφορά που έχουν οι τιμές αυτές από τα καλύτερα αποτελέσματα δεν είναι πολύ μεγάλη.

Προσέγγιση	Energy Tax			RLSN	
	PDR %	EED (sec)	(mJoules/pkt)	(sec)	Coverage (sec)
Προσέγγιση 5 [alpha = 0]	58.11-78.54	0.03-0.21	0.01-0.098	13-136	1046.5-3150
Προσέγγιση 5 [alpha = 0.25]	56.76-81.81	0.047-0.278	0.046-0.095	13-134	1046-3144
Προσέγγιση 5 [alpha = 0.5]	60.85-80.02	0.037-0.382	0.047-0.098	15-138	1046-3174
Προσέγγιση 5 [alpha = 0.75]	58.05-82.04	0.041-0.406	0.048-0.0969	12-190.5	1045.5-3154
Προσέγγιση 5 [alpha = 1] (Flock-CC)	57-79.2	0.04-0.48	0.049-0.1	13.5-172.5	1045.5-3134

Πίνακας 4.2: Παρουσίαση μέγιστης και ελάχιστης τιμής για κάθε μετρική που λήφθηκε υπόψη, για την κάθε προσέγγιση.

4.7 Συγκριτική Αξιολόγηση

Στον πιο κάτω πίνακα, Πίνακας 4.3, παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές για κάθε μετρική που λήφθηκε υπόψη, για την κάθε μια από τις προσεγγίσεις που μελετήθηκαν. Όπως και στον Πίνακα 4.2, οι καλύτερες τιμές χρωματίστηκαν με κόκκινο, και οι δεύτερες καλύτερες με γαλάζιο χρώμα.

Από τον συγκεντρωτικό πίνακα όλων των προσεγγίσεων, όπως παρουσιάζεται πιο κάτω, μπορούμε εύκολα να αντιληφθούμε ότι υπήρξαν βελτιώσεις σε σχέση με το πρωτόκολλο Flock-CC [1], στις διάφορες μετρικές που λήφθηκαν υπόψη και κατά συνέπεια η εισαγωγή της ενέργειας στο πρωτόκολλο μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερευση του πρωτοκόλλου.

Οι βελτιώσεις που γίνονται όμως είναι εις βάρος κάποιας άλλης παραμέτρου (trade-off). Για παράδειγμα, η καλυτέρευση της Μέσης Καθυστέρησης από Άκρο σε Άκρο (EED) στην Προσέγγιση 5 με $\alpha=0$ βελτίωσε και την Μέση Κατανάλωση ανά Παραδοτέο Πακέτο (Energy Tax), αλλά χειροτέρεψε το Ποσοστό Παράδοσης Πακέτων (PDR). Αντίθετα, στην Προσέγγιση 1, η καλυτέρευση του Ποσοστού Παράδοσης Πακέτων (PDR) χειροτέρεψε της Μέση Καθυστέρηση από Άκρο σε Άκρο (EED).

Προσέγγιση	Energy Tax				
	PDR %	EED (sec)	(mJoules/pkt)	RLSN (sec)	Coverage (sec)
Flock CC	57-79.2	0.04-0.48	0.049-0.1	13.5-172.5	1045.5-3134
Προσέγγιση 1	59.4-82.9	0.05-0.49	0.045-0.102	40-160	1045-3174
Προσέγγιση 2	29-77.7	0.04-0.42	0.052-0.122	22.5-254	1046-3156
Προσέγγιση 3	21.4-76.3	0.05-0.37	0.051-0.111	12.5-23.8	1047.7-3192
Προσέγγιση 4	55.8-81.6	0.05-0.49	0.049-0.101	12.5-143	1046-3132
Προσέγγιση 5 [alpha = 0]	58.11-78.54	0.03-0.21	0.01-0.098	13-136	1046.5-3150
Προσέγγιση 5 [alpha = 0.25]	56.76-81.81	0.047-0.278	0.046-0.095	13-134	1046-3144
Προσέγγιση 5 [alpha = 0.5]	60.85-80.02	0.037-0.382	0.047-0.098	15-138	1046-3174
Προσέγγιση 5 [alpha = 0.75]	58.05-82.04	0.041-0.406	0.048-0.0969	12-190.5	1045.5-3154

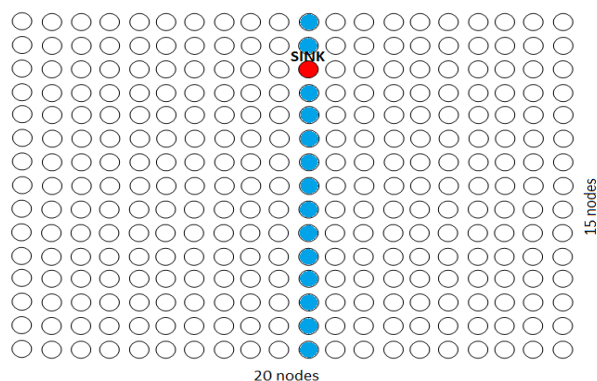
Πίνακας 4.3: Παρουσίαση μέγιστης και ελάχιστης τιμής για κάθε μετρική που λήφθηκε υπόψη, για την κάθε προσέγγιση.

Μια καλή επιλογή, για ένα οποιοδήποτε δίκτυο χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς μια συγκεκριμένη μετρική, θα ήταν η Προσέγγιση 5 με $\alpha=0.25$, μιας και έχει τα δεύτερα καλύτερα αποτελέσματα για τις τρεις από τις πέντε μετρικές που λήφθηκαν υπόψη και η διαφορά που έχουν οι τιμές αυτές από τα καλύτερα αποτελέσματα όλων των υπόλοιπων προσεγγίσεων δεν είναι πολύ μεγάλη.

Για την ολοκλήρωση της μελέτης των προσεγγίσεων που προτάθηκαν, στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων (εκτός από τον κόμβο sink) σε διάφορες χρονικές στιγμές. Με αυτό τον τρόπο θα μπορέσουμε να καθορίσουμε τον τρόπο με τον οποίο διαμοιράζεται η κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους, και πόσο γρήγορα καταναλώνεται η ενέργειά τους σε κάθε προσέγγιση. Αυτές οι γραφικές παραστάσεις έγιναν με το πρόγραμμα gnuplot, λόγω αδυναμίας του προγράμματος excel να διαχειριστεί ένα τόσο μεγάλο όγκο δεδομένων. Στην κάθε γραφική παράσταση σημειώνεται η ενέργεια του κάθε κόμβου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, για όλες τις προσεγγίσεις που προτάθηκαν. Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε μόνο το σενάριο 1. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το σενάριο 1, είναι πρώτο γιατί σε αυτό υπάρχουν σοβαρά προβλήματα συμφόρησης λόγω του ότι οι κόμβοι-πηγές (source nodes) είναι πολύ κοντά ο ένας στον άλλο, ενώ το σενάριο 2 δεν έχει τόσο έντονο πρόβλημα συμφόρησης, και δεύτερο το σενάριο 1 και 3 δεν διαφέρουν κατά πολύ. Για ρυθμό μετάδοσης πακέτων δεδομένων (packet data rate) χρησιμοποιήθηκαν 35 πακέτα/δευτερόλεπτο. Για την περεταίρω μελέτη θα χρησιμοποιηθούν οι Προσέγγιση 1, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0$, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0.25$ και το πρωτόκολλο Flock-CC για να γίνει η σύγκριση. Το Flock-CC χρησιμοποιήθηκε για $\xi=0.75$, το οποίο είχε κατά γενική εικόνα τα καλύτερα αποτελέσματα. Όλες οι προσεγγίσεις προσομοιώθηκαν με περίοδο $T = 1.5$ δευτερόλεπτα.

Στις γραφικές παραστάσεις, Σχήμα 4.42 μέχρι Σχήμα 4.46, υπάρχει εμφανής μείωση της ενέργειας στους κόμβους που βρίσκονται στην κάθετη ευθεία με τον κόμβο sink (γαλάζιοι κόμβοι Σχήμα 4.41), και των κοντινών τους. Ειδικότερα επηρεάζονται οι κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται από την κάτω πλευρά του δικτύου, όπου δημιουργούνται έντονα προβλήματα συμφόρησης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πρώτη γραφική παράσταση κάθε σχήματος (Σχήμα 4.42 – 4.46) δείχνει την ενέργεια του κάθε κόμβου σε Joules, ενώ στη δεύτερη ενώνεται κάθε σημείο με το επόμενο του για να δοθεί μια γενική ιδέα της διαφοράς της ενέργειας σε κάθε προσέγγιση. Οι χρονικές στιγμές που θα μελετηθούν είναι για $t = \{500, 1000, 1500, 2500, 3000\}$.



Σχήμα 4.41: Κόμβοι των οποίων η ενέργεια επηρεάζεται περισσότερο είναι οι κόμβοι που βρίσκονται στην κάθετη ευθεία με τον κόμβο sink, και είναι χρωματισμένοι με γαλάζιο.

Στην πρώτη γραφική παράσταση, σημειώνεται η υπολειπόμενη ενέργεια των ζωντανών κόμβων την χρονική στιγμή $t=500$ δευτερόλεπτα, Σχήμα 4.42, μεγάλη διαφορά μείωσης ενέργειας παρατηρείται στο πρωτόκολλο Flock-CC στους κόμβους 253 και 273. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.25$, οι κόμβοι έχουν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, ειδικά οι κόμβοι μεταξύ 70 και 130. Όσο αφορά τους κόμβους κοντά στο 180, η Προσέγγιση 1 έχει την μικρότερη μείωση ενέργειας, ενώ οι κόμβοι κοντά στο 250 και 280 έχουν καταναλώσει την μεγαλύτερη ενέργεια στην προσέγγιση Flock-CC. Γενικά φαίνεται ότι η μικρότερη κατανάλωση ενέργειας παρατηρείται για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.25$.

Στη δεύτερη γραφική παράσταση, η οποία αναπαριστά την υπολειπόμενη ενέργεια των ζωντανών κόμβων τη χρονική στιγμή $t=1000$ δευτερόλεπτα, μπορούμε να δούμε ότι δεν υπάρχουν τόσο μεγάλες διαφορές για τους περισσότερους κόμβους που είναι ακόμη ζωντανοί. Όλοι οι κόμβοι μεταξύ 0 και 90 έχουν την ίδια υπολειπόμενη ενέργεια για όλες τις προσεγγίσεις που μελετούνται. Το ίδιο συμβαίνει και με τους τελευταίους κόμβους 280-299. Διαφορές στην υπολειπόμενη ενέργεια μπορούμε να παρατηρήσουμε για τους κόμβους μεταξύ 90 και 160 όπου η μικρότερη υπολειπόμενη ενέργεια είναι για το πρωτόκολλο Flock-CC, ενώ η μεγαλύτερη είναι για την Προσέγγιση 1 για τους περισσότερους κόμβους σε αυτή την περιοχή. Συγκεκριμένα για τους κόμβους κοντά στο 130 την μεγαλύτερη υπολειπόμενη την παρατηρούμε για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0$.

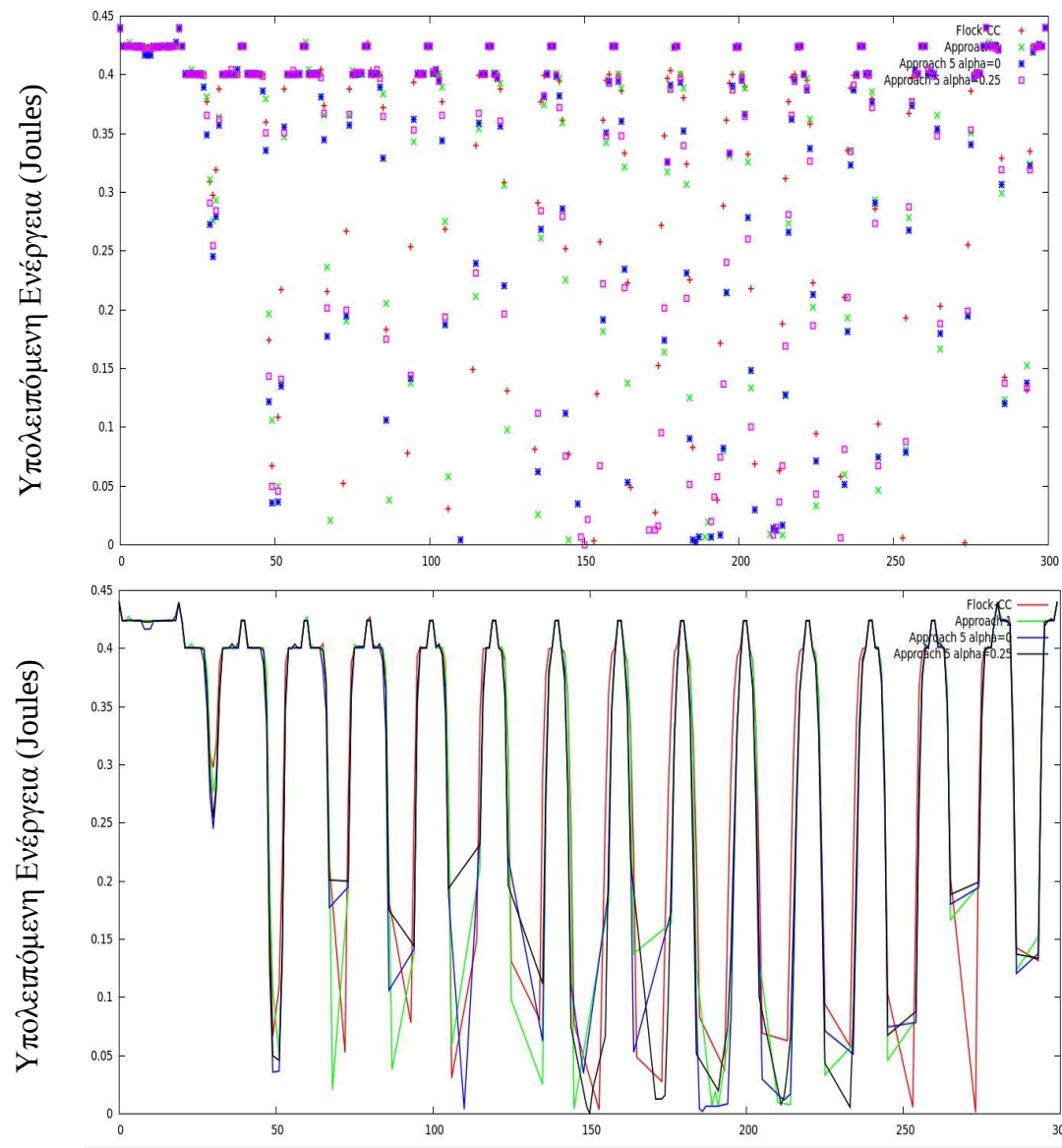
Αντίθετα στους κόμβους 210-230 και δίπλα από τον 270 η μεγαλύτερη υπολειπόμενη ενέργεια φαίνεται να είναι για το πρωτόκολλο Flock-CC.

Η υπολειπόμενη ενέργεια κάθε ζωντανού κόμβου στη χρονική στιγμή $t=1500$ δευτερόλεπτα φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις Σχήμα 4.44. Βλέπουμε και εδώ ότι οι διαφορές στην υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων μεταξύ των προσεγγίσεων δεν είναι πολύ μεγάλες στους πλείστους κόμβους. Η μεγαλύτερη διαφορά παρουσιάζεται δίπλα από τον κόμβο 50 που είναι ο sink, όπου η μεγαλύτερη υπολειπόμενη ενέργεια παρουσιάζεται για την Προσέγγιση 5 και για τα δύο alpha, ενώ το πρωτόκολλο Flock-CC και η Προσέγγιση 1 έχουν μικρότερη υπολειπόμενη ενέργεια κατά 0.1 Joules. Η ίδια διαφορά παρατηρείται και στους κόμβους δίπλα από τον 110, όμως εδώ υπερέχει το πρωτόκολλο Flock-CC. Για τους υπόλοιπους κόμβους οι μόνες αισθητές διαφορές είναι στους διπλανούς κόμβους του 90, όπου η Προσέγγισης 5 με $\alpha=0$ έχουν την μεγαλύτερη υπολειπόμενη ενέργεια.

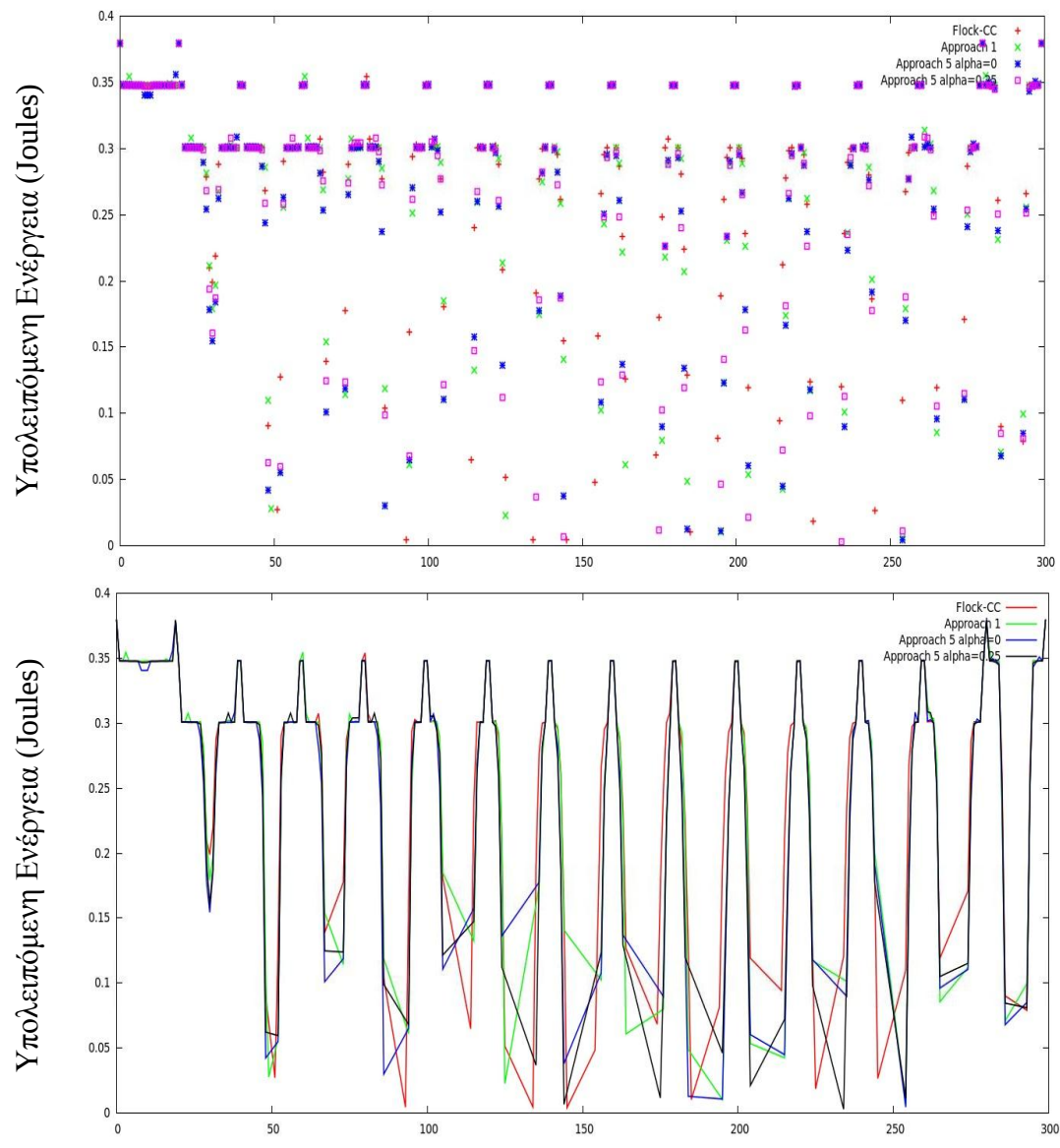
Στη συνέχεια, στη γραφική παράσταση στο Σχήμα 4.45, παρατηρήθηκε η υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων που είχαν ενέργεια μέχρι τη χρονική στιγμή $t=2500$ δευτερόλεπτα. Σε αυτή την χρονική στιγμή το μεγαλύτερο ποσοστό των κόμβων έχουν πεθάνει ήδη λόγω έλλειψης ενέργειας. Παρατηρούμε ότι η ενέργεια όλων των προσεγγίσεων είναι πολύ κοντά με κάποιες εξαιρέσεις. Αρχικά, οι κόμβοι που έχουν ακόμη ενέργεια μεταξύ 160 και 220 στην Προσέγγιση 5 με $\alpha=0$ φαίνεται να έχουν μεγαλύτερη υπολειπόμενη ενέργεια από τις υπόλοιπες προσεγγίσεις. Στην Προσέγγιση 5 με $\alpha=0.25$ φαίνεται οι ζωντανοί κόμβοι με αριθμό 140-150 να έχουν μεγαλύτερη υπολειπόμενη ενέργεια από τις υπόλοιπες προσεγγίσεις.

Τέλος, στη γραφική παράσταση στο Σχήμα 4.46 (για $t=3000$ δευτερόλεπτα) μπορούμε να δούμε ότι όσοι κόμβοι έχουν μείνει ζωντανοί, έχουν σχεδόν την ίδια υπολειπόμενη ενέργεια. Να σημειωθεί ότι οι κόμβοι που είναι ακόμη ζωντανοί σε αυτή τη χρονική στιγμή είναι οι κόμβοι στα άκρα του δικτύου και ο κόμβος sink, στον οποίο αρχικά δώσαμε περισσότερη ενέργεια λόγω των ιδιοτήτων που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

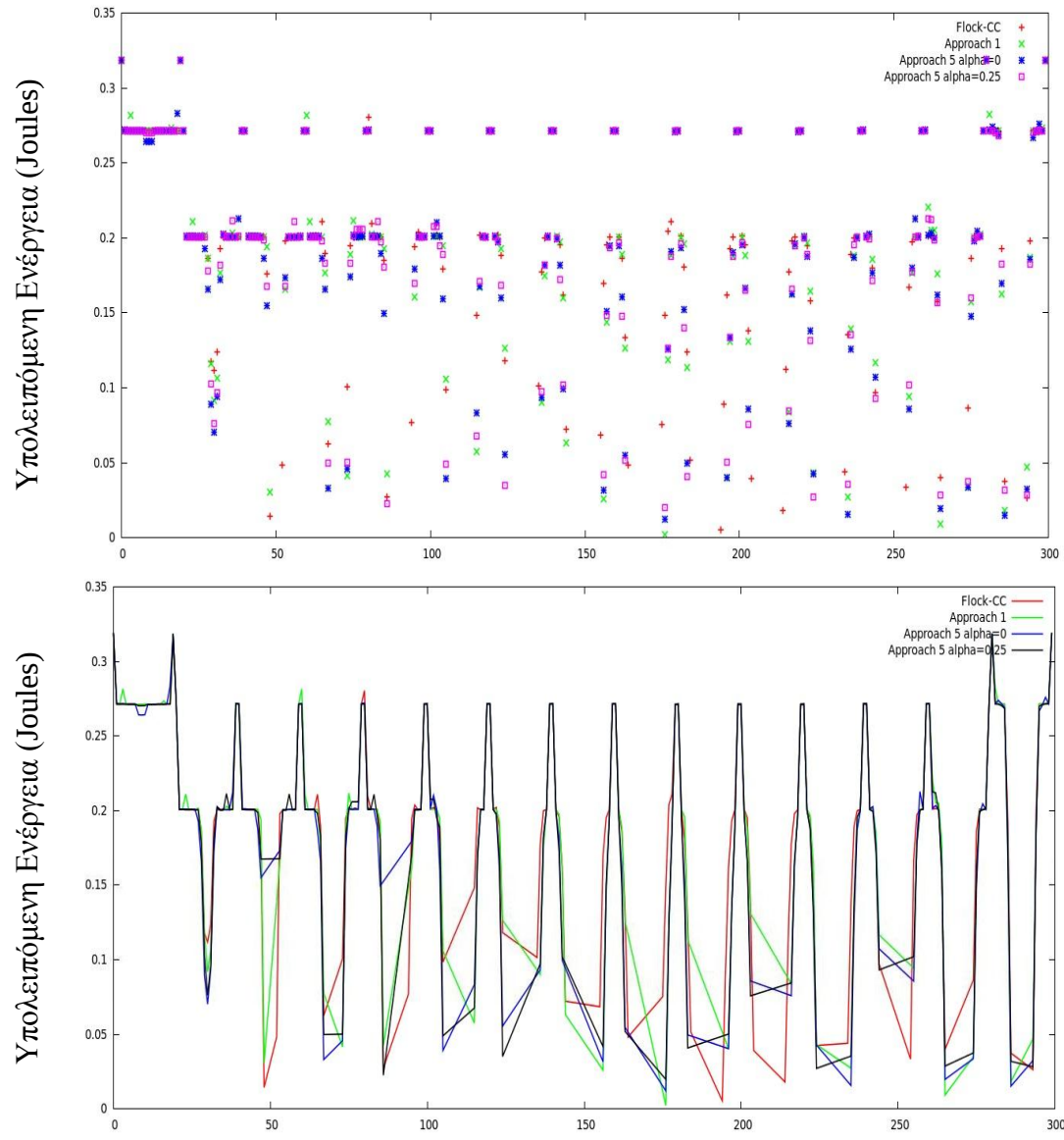
Ακολουθούν οι τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις κάθε προσέγγισης, δείχνοντας την υπολειπόμενη ενέργεια του κάθε κόμβου στη διάρκεια του χρόνου (Σχήμα 4.47-4.50).



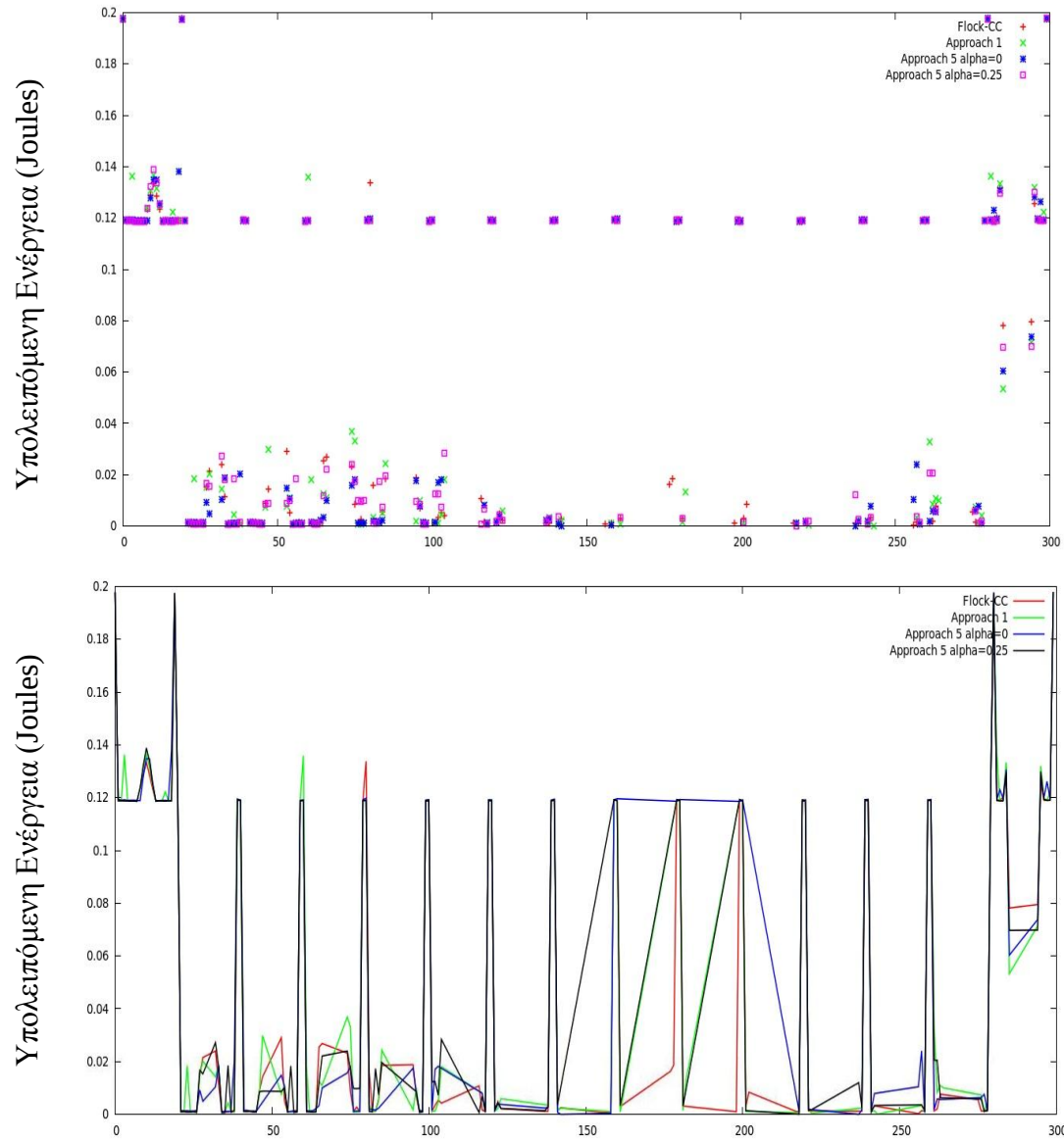
Σχήμα 4.42: Γραφική παράσταση υπολειπόμενης ενέργειας κάθε κόμβου τη χρονική στιγμή 500 δευτερόλεπτα, για όλες τις προσεγγίσεις Flock-CC, Προσέγγιση 1, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0$, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0.25$.



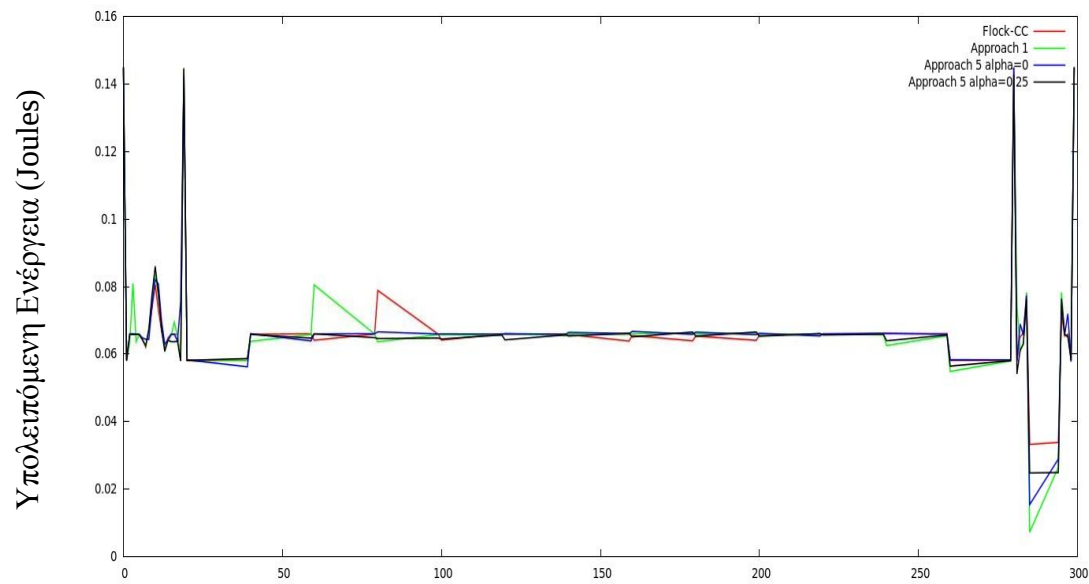
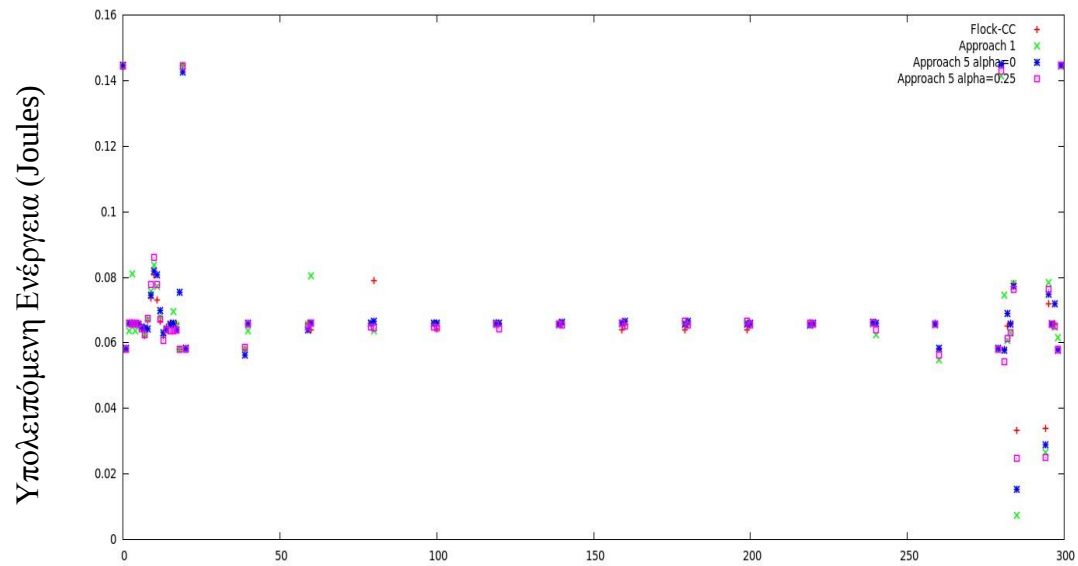
Σχήμα 4.43: Γραφική παράσταση υπολειπόμενης ενέργειας κάθε κόμβου τη χρονική στιγμή 1000 δευτερόλεπτα, για όλες τις προσεγγίσεις Flock-CC, Προσέγγιση 1, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0$, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0.25$.



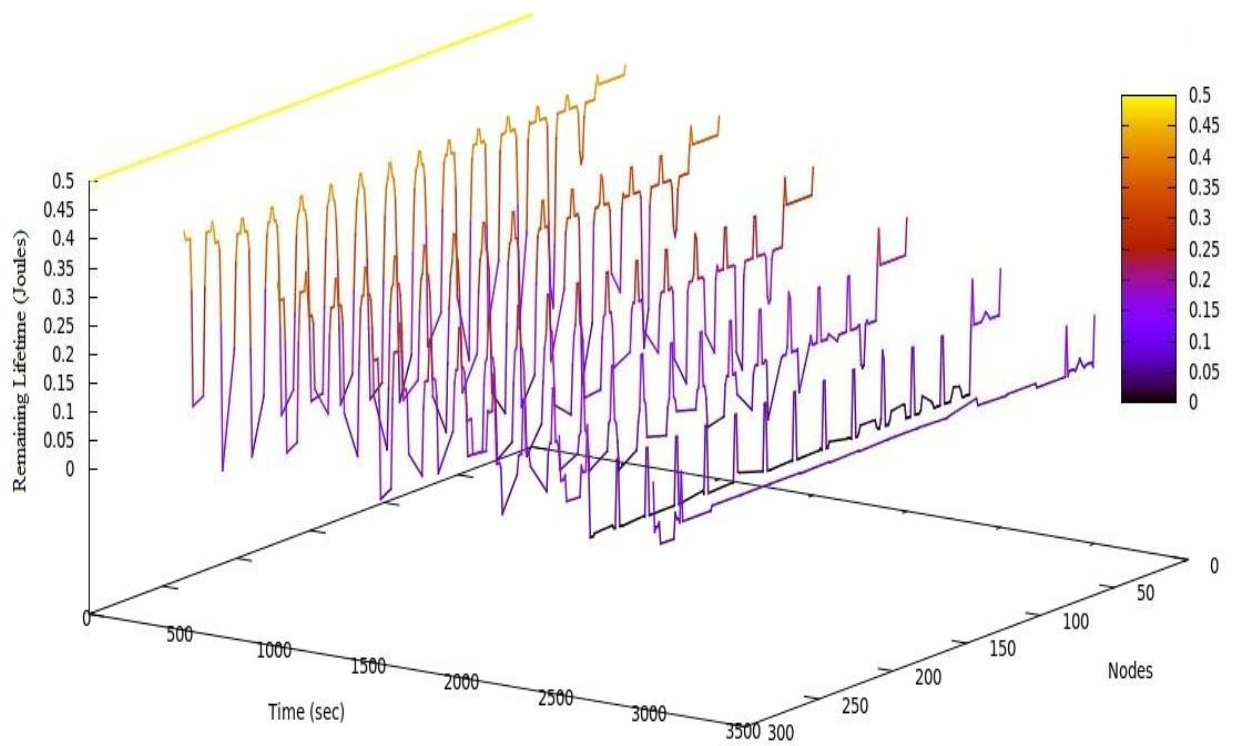
Σχήμα 4.44: Γραφική παράσταση υπολειπόμενης ενέργειας κάθε κόμβου τη χρονική στιγμή 1500 δευτερόλεπτα, για όλες τις προσεγγίσεις Flock-CC, Προσέγγιση 1, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0$, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0.25$.



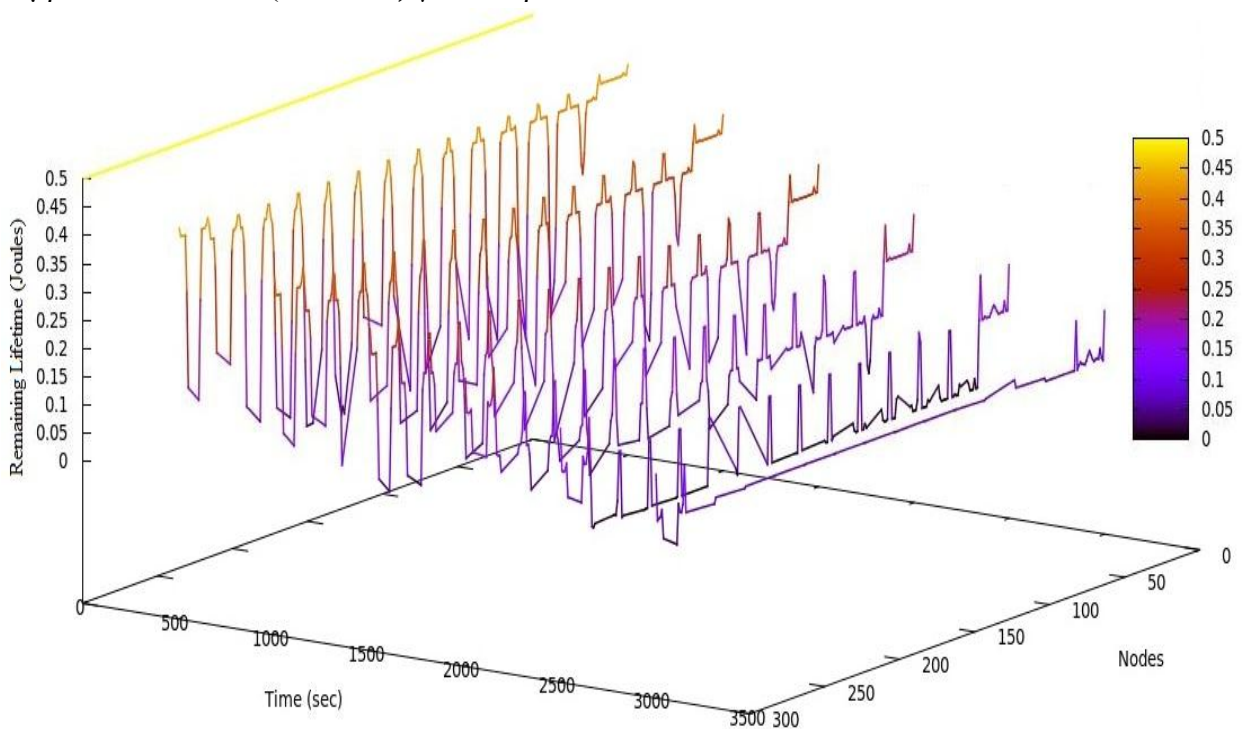
Σχήμα 4.45: Γραφική παράσταση υπολειπόμενης ενέργειας κάθε κόμβου τη χρονική στιγμή 2500 δευτερόλεπτα, για όλες τις προσεγγίσεις Flock-CC, Προσέγγιση 1, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0$, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0.25$.



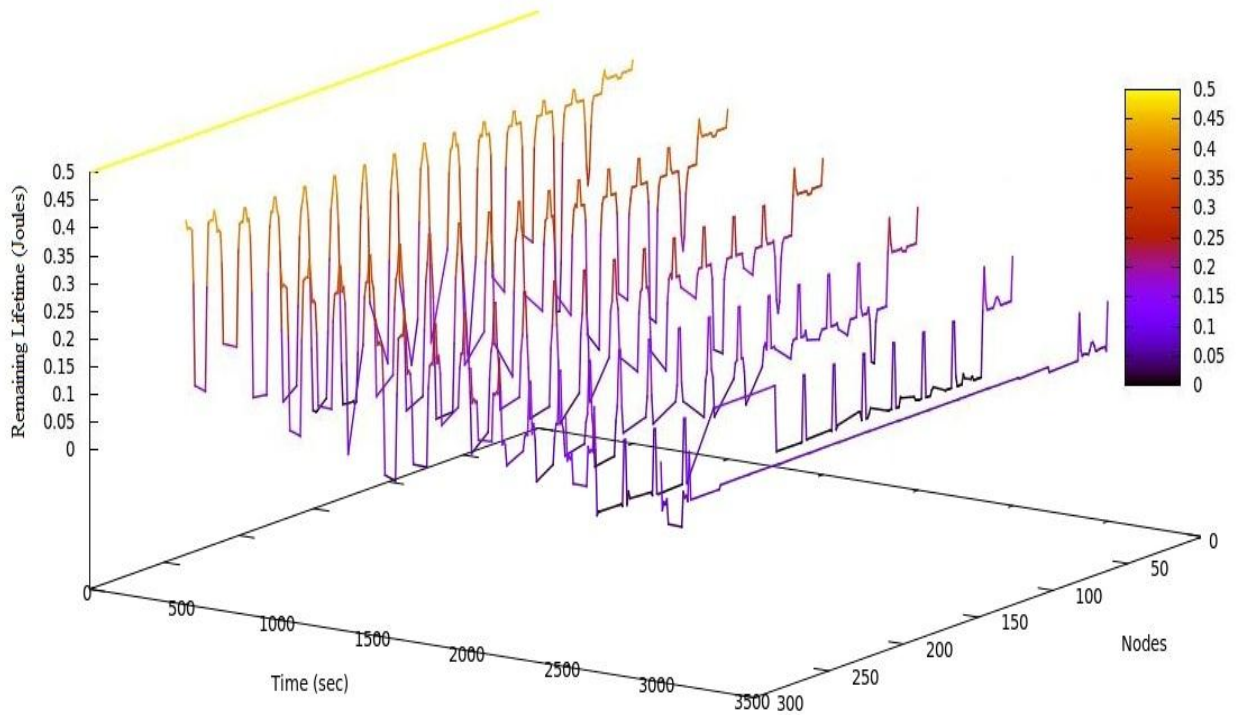
Σχήμα 4.46: Γραφική παράσταση υπολειπόμενης ενέργειας κάθε κόμβου τη χρονική στιγμή 3000 δευτερόλεπτα, για όλες τις προσεγγίσεις Flock-CC, Προσέγγιση 1, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0$, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0.25$.



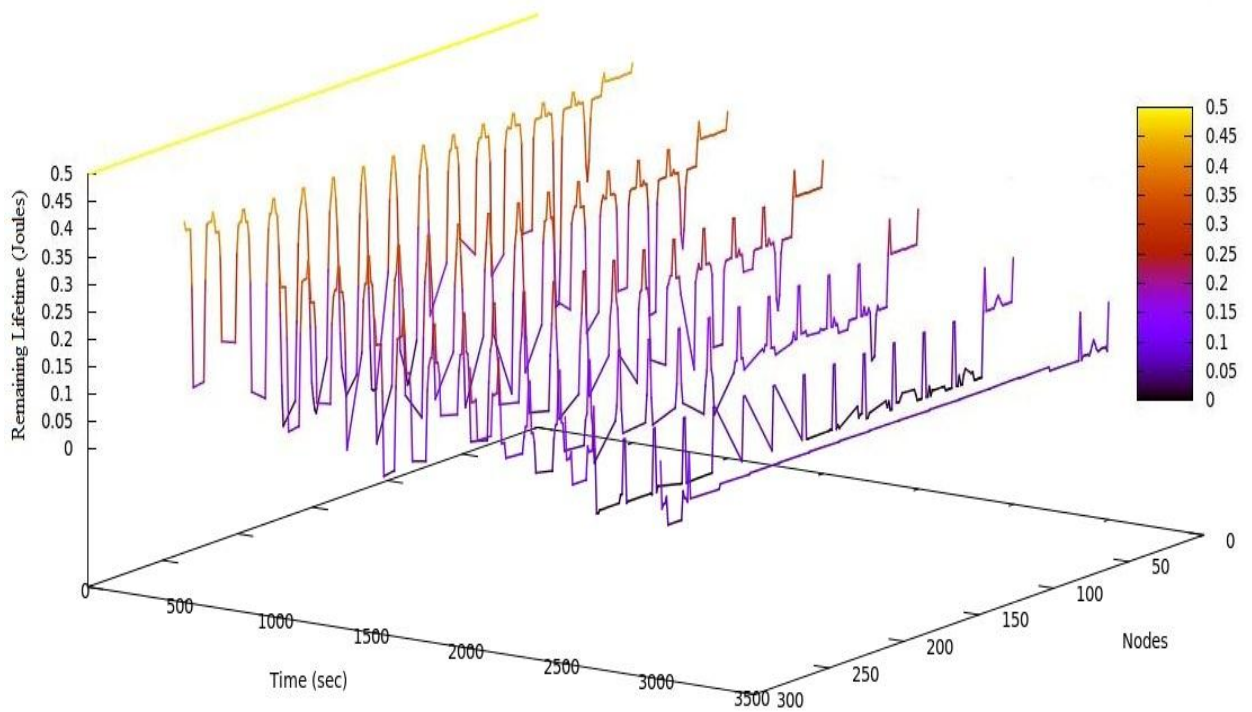
Σχήμα 4.47: Τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση της υπολειπόμενης ενέργειας των ζωντανών κόμβων του δικτύου (σε Joules) για το Πρωτόκολλο Flock-CC.



Σχήμα 4.48: Τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση της υπολειπόμενης ενέργειας των ζωντανών κόμβων του δικτύου (σε Joules) για την Προσέγγιση 1.



Σχήμα 4.49: Τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση της υπολειπόμενης ενέργειας των ζωντανών κόμβων του δικτύου (σε Joules) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0$.



Σχήμα 4.50: Τρισδιάστατη γραφική αναπαράσταση της υπολειπόμενης ενέργειας των ζωντανών κόμβων του δικτύου (σε Joules) για την Προσέγγιση 5 με $\alpha = 0.25$.

Τέλος, θα παρατηρήσουμε τον πιο κάτω πίνακα, Πίνακας 4.4, στον οποίο καταγράφηκε συγκεντρωτικά ο αριθμός των ‘ζωντανών’ κόμβων σε κάθε προσέγγιση για κάθε μια από τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές $t=\{500, 1000, 1500, 2000, 2500\}$. Ζωντανό κόμβο θεωρούμε ένα κόμβο που τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή έχει ενέργεια.

	t=500sec	t=1000sec	t=1500sec	t=2000sec	t=2500sec
Flock-CC	219	207	196	178	146
Προσέγγιση 1	206	192	182	168	139
Προσέγγιση 5 με alpha=0	207	189	179	163	130
Προσέγγιση 5 με alpha=0.25	212	191	180	161	137

Πίνακας 4.4: Αριθμός ‘ζωντανών’ κόμβων σε κάθε προσέγγιση για κάθε μια από τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές $t=\{500, 1000, 1500, 2000, 2500\}$.

Οι προσεγγίσεις που μελετήθηκαν στις διάφορες μετρικές που λήφθηκαν υπόψη, ειδικά σε αυτό το υποκεφάλαιο (Προσέγγιση 1, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0$, Προσέγγιση 5 με $\alpha=0.25$), φάνηκαν να είχαν καλύτερα αποτελέσματα από το πρωτόκολλο Flock-CC. Βλέποντας τον πιο πάνω πίνακα όμως, μπορούμε να δούμε καθαρά ότι παρ’ όλες τις βελτιώσεις που είχαν οι προσεγγίσεις, στις ενδεικτικές στιγμές που λήφθηκαν μετρήσεις για τον συνολικό αριθμό των κόμβων που ήταν ζωντανοί φαίνεται ότι ο αριθμός αυτός είναι μεγαλύτερος στο πρωτόκολλο Flock-CC.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 Γενικά Συμπεράσματα	118
5.3 Μελλοντικές εργασίες	119

Σε αυτό το τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα των πέντε προσεγγίσεων που προτάθηκαν όσο αφορά τις τροποποιήσεις στο πρωτόκολλο Flock-CC για την συμπερίληψη της παραμέτρου ενέργεια. Ακολούθως, καταγράφονται στο τέλος του κεφαλαίου οι διάφορες προτεινόμενες μελλοντικές εργασίες που θα μπορούσαν να μελετηθούν σε μεταγενέστερο στάδιο, για την περαιτέρω μελέτη και βελτίωση του πρωτοκόλλου.

5.1 Γενικά Συμπεράσματα

Λόγω της σημαντικότητας της αποτελεσματικής διαχείρισης των ενεργειακών πόρων των κόμβων-αισθητήρων σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η εισαγωγή της παραμέτρου ενέργεια στο πρωτόκολλο Flock-CC, το

οποίο μιμείται την συμπεριφορά σμήνους πουλιών για την καθοδήγηση των πακέτων δεδομένων (data packets) προς ένα καθολικό πόλο έλξης (τον κόμβο sink). Η τροποποίηση η οποία προτάθηκε είναι η εισαγωγή ενός νέου κανόνα αλληλεπίδρασης ενός πακέτου με τα γειτονικά του, σύμφωνα με τον οποίο υπάρχει μια δύναμη έλξης προς κόμβους με μεγαλύτερη υπολειπόμενη ενέργεια. Μελετήθηκαν διάφοροι τρόποι υλοποίησης αυτού του νέου κανόνα στο πρωτόκολλο. Για την κάθε προσέγγιση που προτάθηκε, έγινε πειραματική μελέτη στον προσομοιωτή ns-2 ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των διάφορων προσεγγίσεων. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα για την κάθε μετρική που λήφθηκε υπόψη αναπαραστάθηκαν σε γραφικές παραστάσεις με την βοήθεια της excel και του gnuplot. Συμπληρωτικά χρησιμοποιήθηκαν και κάποιοι συγκεντρωτικοί πίνακες.

Όπως ήταν αναμενόμενο, υπήρξαν trade-off μεταξύ των διάφορων μετρικών που λήφθηκαν υπόψη για την αξιολόγηση των διάφορων προσεγγίσεων. Δεν υπήρχε δηλαδή κάποια προσέγγιση που να υπερτερεί σε όλα από τις υπόλοιπες. Από την πειραματική μελέτη στα υποκεφάλαια 4.5 και 4.6, κάποιες από τις προσεγγίσεις υπερτερούσαν στις διάφορες μετρικές. Συγκριμένα πολύ καλά αποτελέσματα είχε η Προσέγγιση 1 και η Προσέγγιση 5 για $\alpha = 0$ και 0.25. Από την περεταίρω μελέτη όμως στο υποκεφάλαιο 4.7, φάνηκε ότι παρ' όλη την βελτίωση των υπόλοιπων μετρικών, υπήρχε μεγαλύτερο ποσοστό νεκρών κόμβων στις χρονικές στιγμές που μελετήθηκαν σε σχέση με το Flock-CC πρωτόκολλο. Οπότε δεν επιτεύχθηκε ο αρχικός στόχος αύξησης της διάρκειας ζωής του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων, όμως υπήρξε βελτίωση στις άλλες μετρικές.

5.3 Μελλοντικές εργασίες

Σε όλες τις προσεγγίσεις που μελετήθηκαν, παρατηρήθηκαν διαφορές στα αποτελέσματα ανάλογα με το αν παρατηρούνταν ψηλά ή χαμηλά επίπεδα συμφόρησης, αναδεικνύοντας έτσι την ανάγκη προσαρμογής των παραμέτρων του πρωτοκόλλου για το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων ανάλογα με την κατάσταση που επικρατεί σε αυτό.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα μελλοντική εργασία για την προσέγγιση Flock-CC, είναι η διερεύνηση εναλλακτικών μεθόδων αξιολόγησης του τρόπου συμβολής της παραμέτρου

ενέργειας στην διαμόρφωση του πρωτοκόλλου. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να μελετηθούν διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού της συνάρτησης επιθυμητότητας (desirability function) ή ακόμη να γίνουν συνδυασμοί των προσεγγίσεων. Θα μπορούσε επίσης οι προσεγγίσεις 1 και 4 να δοκιμαστούν με διαφορετικές μεταβλητές, από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική μελέτη.

Οι διάφορες προσεγγίσεις μελετήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη ενός καθολικού πόλου έλξης. Θα μπορούσε να μελετηθεί η διεύρυνση του πρωτοκόλλου ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων με πολλαπλούς πόλους έλξης (sink nodes). Σε ένα τέτοιο δίκτυο, με την ύπαρξη πολλαπλών πόλων έλξης, αναμένεται από την μια να αυξηθεί η διαχειρισιμότητα του δικτύου αλλά παράλληλα να μειωθεί και η σπατάλη ενέργειας λόγω του ότι τα πακέτα θα χρειάζεται να ‘ταξιδεύουν’ μικρότερες αποστάσεις για να φτάσουν σε ένα sink.

Τέλος, το πρωτόκολλο Flock-CC μαζί με την τροποποίηση για την συμπερίληψη της ενέργειας θα μπορούσε να μελετηθεί στην παρουσία ενός ή περισσότερων κινητών κόμβων sink (mobile sink nodes). Η μελέτη που έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία περιορίστηκε σε κόμβους-αισθητήρες σε σταθερές θέσεις. Για την κίνηση του/των sink nodes θα πρέπει να σχεδιαστεί επιπλέον μια στρατηγική πάνω στην οποία θα βασίζεται η κίνηση όσων κόμβων θα κινούνται.

Βιβλιογραφία

- [1] P. Antoniou, «Nature-Inspired Congestion Control and Avoidance in Wireless Sensor Networks,» May, 2012.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, March 1999.
- [3] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh και W. Heinzelman, «Infrastructure tradeoffs for sensor networks,» *Proc. of First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, pp. 49-58, September 2002.
- [4] C. W. Reynolds, «Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model,» σε *SIGGRAPH '87: Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 25-34, New York, NY, USA, 1987.
- [5] I. D. Couzin, J. E. N. S. Krause, R. James, G. D. Ruxton και N. R. Franks, «Collective memory and spatial sorting in animal groups,» *Journal of Theoretical*, τόμ. 218, September 2002.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam και E. Cayirci, «Wireless Sensor Networks: A survey,» *Computer Networks*, τόμ. 38, pp. 393-422, 2002.
- [7] J. Muscatello και J. Martin, «Wireless Networks Security,» 20 April 2005.
- [8] J. F. Kurose και K. W. Ross, *Computer Networking, A Top-Down Approach*.
- [9] Y. Sankarasubramaniam, A. Ozgur και I. Akyildiz, «ESRT Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks».

- [10] A. Kulkarni, Congestion Control in Wireless Sensor Network, Alabama, 09 August 2010.
- [11] C. Y. Wan, S. B. Eisenman και A. T. Campbell, «CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks,» σε *SenSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, New York, USA, 2003.
- [12] B. Hull, K. Jamieson και H. Balakrishnan, «Mitigating congestion in wireless sensor networks,» *SenSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, αρ. New York, NY, USA, pp. 134-147, 2004.
- [13] E. Ben-Jacob, I. Cohen, O. Shochet, A. Czirok και T. Vicsek, «Cooperative Formation of Chiral Patterns during Growth of Bacterial Colonies». *Physical review letters* 75 (15): 2899-2902.
- [14] A. Goldsmith και S. Wicker, «Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks,» *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol 9, pp. 8-27, August 2002.
- [15] L. Yuan και G. Qu, «Energy-efficient Design of Distributed Sensor Networks,» *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, M. Ilyas and I. Mahgoub, eds., Boca Raton, FL, CRC Press, pp. 38.1-38.19, 2004.
- [16] C. Schurgers, O. Aberthorn και M. Srivastava, «Modulation scaling for energy aware communication systems,» σε *Proceedings of the 2001 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, Huntington Beach, CA, August 2001.
- [17] A. P. Chandrakasan, R. Min, M. Bhardwaj, S. Cho και A. Wang, «Power aware wireless microsensor systems,» σε *28th European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC'02)*, Florence, Italy, 2002.
- [18] C. Feare, *The Starling*, 1984: Oxford University Press, ISBN 978-0-19-217705-6.

- [19] B. L. Partridge, «The structure and function of fish schools,» *Scientific American*, vol. 246, no. 6, pp. 114-123, June 1982.
- [20] S. Hubbard, P. Babak, S. Sigurdsson και K. Magnusson, «A model of the formation of fish schools and migrations of fish,» 2004.
- [21] C. Allison και C. Hughes, «Bacterial swarming: an example of prokaryotic differentiation and multicellular behaviour,» *Science Progress* 75 (298 Pt 3-4), pp. 403-422, 1991.
- [22] D. Chowdhury, «Collective effects in intra-cellular molecular motor transport: coordination, cooperation and competition,» *Physica A*, 372 (1), pp. 84-95.
- [23] J. K. Parrish και W. M. Hamner, *Animal Groups in Three Dimensions*, Cambridge University Press, 1997.
- [24] D. Helbing, J. Keltsch και P. Molnar, *Modelling the evolution of human trail systems*, *Nature* 388 (6637) : 47-50, 1997.
- [25] D. Helbing, I. Farkas και T. Vicsek, *Simulating dynamical features of escape panic*, *Nature* 407 (6803): 487-490, 2000.
- [26] D. Helbing, I. J. Farkas και T. Vicsek, *Freezing by heating in a driven mesoscopic system*, *Physical review letter* 84 (6): 1240-1243, 2000.
- [27] G. Beni και J. Wang, «Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems,» σε *Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems*, Tuscany, Italy, 26-30 June 1989.
- [28] W. T. Reeves, «Particle Systems—a Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects,» 1983.
- [29] J. Krause και G. D. Ruxton, «*Living in Groups*,» Oxford: Oxford University Press,

2002.

- [30] B. L. Partridge και T. J. Pitcher, «The sensory basis of fish schools: relative role of lateral line and vision,» *J. Comparative Physiol.*, τόμ. 135, pp. 315-325, 1980.
- [31] “User Information,” 5 November 2011. [Online]. Available: http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/User_Information.
- [32] M. Inc., “Data Sheet for MICAz,” MEMSIC, [Online]. Available: http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/micaz_datasheet-t.pdf.
- [33] “Find the energy contained in standard battery sizes,” AllAboutBatteries.com, [Online]. Available: <http://www.allaboutbatteries.com/Energy-tables.html>.
- [34] K. Sha and W. Shi, “Modeling the Lifetime of Wireless Sensor Networks,” *Sensor Letters*, Vols. 3, 1-10, pp. 1-9, 2005.