



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τεχνικές Συγκέντρωσης σε Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αρτέμης Χ. Βουλκίδης

Αθήνα, Απρίλιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τεχνικές Συγκέντρωσης σε Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αρτέμης Χ. Βουλκίδης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Χρήστος Ν. Καψάλης
Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Απριλίου 2013.

.....
Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Ν. Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Συμεών Χ. Παπαβασιλείου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιχαήλ Ε. Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αθανάσιος Γ. Κανάτας
Καθηγητής Παν. Πειραιώς

.....
Γεώργιος Π. Ευθύμογλου
Αν. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

Αθήνα, Απρίλιος 2013

.....
Αρτέμης Χ. Βουλκίδης

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αρτέμης Χ. Βουλκίδης, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η σχεδίαση κατανεμημένων αλγορίθμων που αποσκοπούν στην επιμήκυνση της διάρκειας λειτουργίας ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSN) με χρήση παραλλαγών της κλασικής θεωρίας παιγνίων. Το Κεφάλαιο 1 παρέχει συνοπτική πληροφόρηση περί αυτόνομων συστημάτων και κατανεμημένου ελέγχου, εισάγοντας τον αναγνώστη στα βασικά χαρακτηριστικά των WSN. Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των WSN, των εφαρμογών τους καθώς και των βασικών τρόπων βελτίωσης της λειτουργίας τους. Παράλληλα, επιχειρείται επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται στα σχήματα ομαδοποίησης κόμβων και συνάθροισης δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η θεωρία παιγνίων και ορισμένες παραλλαγές αυτής. Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες των συνασπιστικών παιγνίων και των παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών, έννοιες στις οποίες βασίζεται η ανάλυση που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4. Καθώς οι δύο αυτές παραλλαγές της κλασικής θεωρίας παιγνίων χρησιμοποιούνται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία για τη μελέτη της διάδρασης μεταξύ συνόλων συνεργατικών παικτών, είναι ιδανικές για την υποστήριξη της θεωρητικής ανάλυσης του σχήματος ομαδοποίησης κόμβων που προτείνεται στο Κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια, η έλλειψη πλήρους πληροφόρησης των παικτών ενός παιγνίου συζητείται στο πλαίσιο των παιγνίων Bayes και της συσχετισμένης ισορροπίας, καλύπτοντας τη θεωρία που απαιτείται για την κατανόηση του Κεφαλαίου 5.

Στο Κεφάλαιο 4 προτείνεται μία μέθοδος σχηματισμού συνασπισμών που αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας των WSN υπό συγκεκριμένες προδιαγραφές ακρίβειας/ποιότητας υπηρεσίας. Χρησιμοποιώντας μικρό πλήθος κόμβων –που καλούνται αντιπρόσωποι– με αυξημένες υπολογιστικές και ενεργειακές δυνατότητες προτείνεται μία προσαρμοστική μέθοδος ομαδοποίησης κόμβων, σύμφωνα με την οποία γειτονικοί κόμβοι σχηματίζουν λειτουργικούς συνασπισμούς αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας τους, υπό αποδεκτή μείωση της ακρίβειας των μετρήσεών τους. Στη συνέχεια, οι αντιπρόσωποι βελτιστοποιούν τη δομή των ομαδοποιημένων κόμβων. Η προτεινόμενη μέθοδος αξιοποιεί τη χωρική συσχέτιση των υπό παρακολούθηση φυσικών φαινομένων για τη δημιουργία ενός συνεργατικού σχήματος που μειώνει σημαντικά το μέσο πλήθος μεταδόσεων των κόμβων. Οι προδιαγραφές ακρίβειας που χαρακτηρίζουν την αποδεκτή λειτουργία

του WSN καθορίζουν την έκταση της ομαδοποίησης των κόμβων. Οι επιδόσεις και η σταθερότητα της προτεινόμενης μεθόδου επέκτασης της διάρκειας λειτουργίας WSN δικτύων εξετάζονται μέσω προσομοιώσεων.

Το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει μια μέθοδο βασισμένη στην έννοια των συσχετισμένων στρατηγικών για τη μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας WSN πολλαπλών υπηρεσιών, εξασφαλίζοντας την καθολική υποστήριξη των υπηρεσιών σε όλη τη γεωγραφική έκταση του WSN. Η μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας ενός WSN πολλαπλών υπηρεσιών εξετάζεται ως παίγνιο πολλαπλών παικτών μεταξύ των κόμβων πολλαπλών λειτουργιών. Καθώς η εφαρμογή καθαρών στρατηγικών οδηγεί σε σταθερή αλλά όχι βέλτιστη κατανομή των κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες, διατυπώνεται μια προσέγγιση συσχετισμένων στρατηγικών για να οδηγήσει τη λειτουργία του WSN κοντά στη θεωρητικά βέλτιστη με κριτήριο τη διάρκεια λειτουργίας του. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καταδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος οδηγεί τη λειτουργία ενός WSN πολλαπλών υπηρεσιών κοντά στη θεωρητικά προβλεπόμενη βέλτιστη χωρίς να απαιτεί την ανταλλαγή σημαντικού πλήθους μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων του WSN.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 ολοκληρώνει τη διατριβή, καταγράφοντας ιδέες σχετικά με ανοικτά θέματα έρευνας στον τομέα της ομαδοποίησης κόμβων σε WSN.

Λέξεις κλειδιά: Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, διάρκεια λειτουργίας, θεωρία παιγνίων, συσχετισμένες στρατηγικές, πολλαπλές υπηρεσίες, ομαδοποίηση κόμβων, ποιότητα υπηρεσίας, χωρική συσχέτιση.

Abstract

The thesis deals with the design of distributed algorithms targeting at the lifetime prolongation of Wireless Sensor Networks (WSNs) using variants of classical game theory. Chapter 1 provides an overview of the principles of autonomous systems and distributed control and introduces the reader to the basic characteristics of WSNs. In Chapter 2, a thorough discussion of the current state-of-the art concerning WSN specifications, applications and operational optimization protocols is given. Special attention is given to the literature related to node clustering and data aggregation.

Chapter 3 provides an introduction to game theory and its variants of interest. First, the basics of coalitional and coalition formation game theory are overviewed to support the theoretical analysis of Chapter 4; since these two variations of classical game theory are widely used to model the interactions of sets of cooperative players, they perfectly fit the clustering optimization problem under consideration. Next, the players lack of information regarding the game states is discussed in the framework of both bayesian games and correlated equilibria, providing the theoretical aspects required for the analysis presented in Chapter 5.

In Chapter 4, a coalition formation game theoretic scheme is proposed that aims at maximizing WSN lifetime under specified QoS. Employing a small number of nodes of increased computing power and lifetime called representatives, an adaptive clustering scheme is proposed where neighboring nodes form coalitions in order to increase energy efficiency at the cost of controllable data accuracy reduction. The coalition formation is globally optimized by the representatives. The spatial correlation of the sensed phenomena is exploited to formulate a cooperation scheme that reduces drastically the number of node transmissions. The specifications regarding the accuracy of the collected data determine the extent of coalition formation. The efficiency and stability of the proposed coalitional scheme are studied through simulations.

Chapter 5 introduces a distributed game theoretic framework based on a correlated strategy approach to maximize the lifetime of multi-service WSNs at the same time assuring fair support of all the services over the entire WSN deployment. WSN lifetime maximization is dealt with as a multiple players game played by the multi-mode nodes. Since a pure strategy approach is shown to lead to a stable but non optimal nodes allocation to the various WSN

services, a correlated strategy approach is proposed to bring a multi-service WSN close to its theoretical optimal state with respect to lifetime maximization. The simulation results indicate that the proposed correlated strategy based framework leads a multi-service WSN close to its theoretical optimal at no significant overhead message exchange.

Finally, Chapter 6 concludes the thesis, providing hints regarding future work on the area of clustering in WSNs.

Keywords: Wireless Sensor Networks, lifetime maximization, game theory, coalitional game theory, correlated strategy, multi-service, clustering, QoS, spatial correlation.

Ευχαριστίες

Το Νοέμβριο του 2007, όταν έκανα την αίτηση για την αποδοχή μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ήθελα να αλλάξω τον κόσμο. Πέντε χρόνια αργότερα, συνειδητοποίησα πως τελικά το μόνο που άλλαξε ήταν ο εαυτός μου. Η έρευνα στο πλαίσιο μιας διδακτορικής διατριβής απαιτεί από όποιον την τολμά αφοσίωση, επιμονή και σωστή καθοδήγηση. Προς τούτο, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή και επιβλέποντά μου κ. Παναγιώτη Κωττή, τον οποίο εκτιμώ ιδιαίτερα τόσο σαν καθηγητή όσο και σαν άνθρωπο. Η ευρύτητα των γνώσεών του και η επιμονή του στην τελειότητα καθοδήγησαν τις σκέψεις μου και διαμόρφωσαν την ερευνητική μου λογική καθ' όλη τη διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής. Τον ευχαριστώ για τη στήριξη που μου παρείχε όσες φορές τη χρειάστηκα καθώς και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Ελπίζω η συνεργασία μας να συνεχισθεί για πολλά χρόνια ακόμη.

Τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες θέλω να εκφράσω προς τους καθηγητές μου κ. Χρήστο Καψάλη, κ. Ιωάννη Κανελλόπουλο, κ. Συμεών Παπαβασιλείου και κ. Μιχαήλ Θεολόγου, οι οποίοι μου παρείχαν ερευνητική και επιστημονική στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Μιχαήλ Θεολόγου ο οποίος με δέχθηκε στο εργαστήριό του για να στεγάσω την έρευνά μου. Στο ίδιο πλαίσιο, θέλω να ευχαριστήσω ειλικρινά τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου του, οι οποίοι με αντιμετώπισαν σαν άμεσο μέλος του δικού τους εργαστηρίου και με δέχθηκαν σαν φίλο. Η παρουσία τους ήταν καταλυτική για την απροβλημάτιστη συνέχεια της διδακτορικής μου έρευνας.

Ευχαριστώ τον Δρ. Μάρκο Αναστασόπουλο, ο οποίος με βοήθησε και με κατεύθυνε από την αρχή του διδακτορικού μου ως και το τέλος αυτού. Η ερευνητική του παρουσία με ενέπνευσε πολλές φορές και με εμπνέει ακόμα και σήμερα. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω την Αγγελική Κορδαλή για τις ερευνητικές συζητήσεις και τη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ επίσης τους Μάρτιν Ζαμκοτσιάν και Αγγελική Σαράφη για τη συνεργασία που είχαμε κατά καιρούς.

Σε προσωπικό επίπεδο, θέλω επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια, είτε έμμεσα είτε άμεσα. Ήταν πάντα εκεί να με βοηθήσουν με όποιο τρόπο μπορούσαν και να με στηρίξουν με όλη τους τη δύναμη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς μου Χρήστο και Γιάννα και την αδελφή μου Αποστολία. Ακόμα και όταν δεν καταλάβαιναν τι ακριβώς τους έλεγα,

ήταν εκεί για να με παρηγορήσουν, να με στηρίξουν, να με ηρεμήσουν. Ήταν σημαντική η συμβολή τους όχι μόνο στην ολοκλήρωση του διδακτορικού μου αλλά, κυρίως, στη διαμόρφωσή μου ως άτομο. Ελπίζω κάποια στιγμή να τους κάνω να καταλάβουν πραγματικά πόσο σημαντικοί είναι στη ζωή μου.

Αρτέμης Βουλκίδης
Αθήνα, 2013

Αφιερωμένο στην αδελφή μου Αποστολία και στο παιδάκι που θα φέρει
στον κόσμο σε λίγους μήνες

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	23
2	Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	29
2.1	Εισαγωγή	29
2.2	Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSN)	31
2.3	Προτυποποίηση των WSN	35
2.3.1	Το πρότυπο IEEE 802.15.4	35
2.3.2	Το πρότυπο ZigBee	36
2.3.3	Το πρότυπο WirelessHART	37
2.3.4	Το πρότυπο 6LoWPAN	39
2.4	Εφαρμογές των WSN	40
2.4.1	Εφαρμογές ασφαλείας	40
2.4.2	Εφαρμογές περιβαλλοντικής προστασίας	42
2.4.3	Εφαρμογές υγείας	43
2.4.4	Εφαρμογές βιομηχανικής παραγωγής	44
2.5	Τεχνικές βελτιστοποίησης των WSN	45
2.5.1	Δρομολόγηση	45
2.5.2	Κατανομή πόρων	46
2.5.3	Συνάθροιση και σύντηξη δεδομένων	47
2.5.4	Ομαδοποίηση κόμβων	48
3	Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων	55
3.1	Κλασσική Θεωρία Παιγνίων	55
3.2	Συνεργατική Θεωρία Παιγνίων	56
3.2.1	Κανονικά συνασπιστικά παίγνια	58
3.2.1.1	Το σύνολο Core	59
3.2.1.2	Η κατανομή αξίας του Shapley (Shapley Value)	61
3.2.1.3	Η κατανομή αξίας Nucleolus	62
3.2.1.4	Το σύνολο Kernel	63
3.2.2	Παίγνια σχηματισμού συνασπισμών	64

3.2.2.1	Δυναμικά παίγνια σχηματισμού συνασπισμών	66
3.3	Παίγνια ελλιπούς πληροφόρησης	68
3.3.1	Ισορροπία Bayes	68
3.3.2	Συσχετισμένη ισορροπία	69
3.3.2.1	Ορισμός της συσχετισμένης ισορροπίας	70
3.3.2.2	Σχολιασμός της συσχετισμένης ισορροπίας	71
4	Εφαρμογή της Συνεργατικής Θεωρίας Παιγνίων στην Ομαδοποίηση Κόμβων	73
4.1	Εισαγωγή	73
4.2	Διατύπωση του προβλήματος	73
4.3	Η φάση έναρξης λειτουργίας	75
4.3.1	Ανάλυση της αξίας των κόμβων	80
4.3.2	Ανάλυση ακρίβειας	83
4.3.3	Επέκταση συνασπισμών	85
4.4	Η φάση βελτιστοποίησης	88
4.4.1	Διάσπαση του προβλήματος βελτιστοποίησης της δομής συνασπισμών	91
4.4.2	Βέλτιστη αναδόμηση διαμέρισης	93
4.5	Φάση σταθερής λειτουργίας	94
4.6	Θέματα δίκαιης μεταχείρισης κόμβων	95
4.6.1	Ενδο-συνασπιστική δικαιοσύνη	95
4.6.2	Δια-συνασπιστική δικαιοσύνη	97
4.7	Αριθμητικά αποτελέσματα και συζήτηση	97
4.8	Συμπεράσματα	103
5	Εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών από Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	105
5.1	Διατύπωση μαθηματικών υποδειγμάτων ομαδοποίησης κόμβων σε MS-WSN	105
5.1.1	Ανάλυση της αξίας των κόμβων	107
5.1.2	Βέλτιστη κατανομή κόμβων σε υπηρεσίες	109
5.1.3	Δυναμική λειτουργία ενός MS-WSN	112
5.2	Η προτεινόμενη κατανομημένη προσέγγιση	112
5.2.1	Το προτεινόμενο πλαίσιο συσχετισμένων στρατηγικών	113
5.2.2	Βέλτιστη κατανομή κόμβων σε MS-WSN	114
5.2.2.1	Η προσέγγιση καθαρών στρατηγικών	114
5.2.2.2	Η προτεινόμενη συσχετισμένη στρατηγική	118
5.3	Η υλοποίηση του προτεινόμενου σχήματος συσχετισμένων στρατηγικών. .	121
5.3.1	Εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος σε συνδυασμό με το k-hop σχήμα ομαδοποίησης KOCA	125
5.4	Αριθμητικά αποτελέσματα και συζήτηση	127
5.5	Συμπεράσματα	133

6	Συμπεράσματα	135
A	Το TU παίγνιο δημιουργίας συνασπισμών κατά τη διάρκεια των φάσεων βελτιστοποίησης και σταθερής λειτουργίας	137
B	Διατύπωση της (4.16).	141
Γ	Απόδειξη της (5.19)	143
Δ	Ισοδυναμία της CE που προσδιορίζεται μέσω της (5.19) με τη θεωρητικά βέλτιστη κατανομή κόμβων που προσδιορίζεται μέσω των (5.12) και (5.13)	145
	Βιβλιογραφία	147

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Αρχιτεκτονική λειτουργίας ενός WS	30
2.2	Γενική αρχιτεκτονική ενός WSN.	32
2.3	Η στοίβα πρωτοκόλλων ενός WSN	33
2.4	Στοίβα πρωτοκόλλων ενός WSN σύμφωνα με το ZigBee.	37
2.5	Η αρχιτεκτονική του WirelessHART.	38
4.1	Σχηματική αναπαράσταση της προτεινόμενης διαδικασίας σχηματισμού συνασπισμών.	76
4.2	Εξέλιξη ενός συνασπισμού ο σχηματισμός του οποίου εκκίνησε από τον κόμβο n_c και επεκτάθηκε μέχρι την αποδοχή του κόμβου n_i	83
4.3	Οι τρεις φάσεις του προτεινόμενου σχήματος δημιουργίας συνασπισμών.	95
4.4	Επίδοση του προτεινόμενου σχήματος δημιουργίας συνασπισμών καθώς μεταβάλλεται ο μέσος βαθμός των κόμβων του WSN.	99
4.5	Επίδοση του προτεινόμενου σχήματος δημιουργίας συνασπισμών καθώς μεταβάλλεται ο μέσος βαθμός χωρικής συσχέτισης του υπό παρακολούθηση φαινομένου	100
4.6	Επίδοση του προτεινόμενου σχήματος δημιουργίας συνασπισμών όταν μεταβάλλεται το πλήθος των αντιπροσώπων.	100
4.7	Ακρίβεια που επιτυγχάνεται από το προτεινόμενο σχήμα δημιουργίας συνασπισμών	101
4.8	Σύγκριση του προτεινόμενου σχήματος με τα σχήματα ELink και KOCA.	102
4.9	Σύγκριση του προτεινόμενου σχήματος με τα σχήματα ELink και KOCA συναρτήσει του μέσου βαθμού των κόμβων του WSN.	103
5.1	Οι φάσεις της προτεινόμενης υλοποίησης.	121
5.2	Σχηματική αναπαράσταση της φάσης βελτιστοποίησης της προτεινόμενης πολυτροπικής λειτουργίας για MS-WSN.	124
5.3	Ποσοστό των κόμβων που κατανέμονται στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες	128
5.4	Πλήθος πρόσθετων μηνυμάτων που αποστέλλονται ανά κόμβο	130
5.5	Επίδοση του προτεινόμενου σχήματος συναρτήσει του μέσου βαθμού των κόμβων του MS-WSN	132

5.6	Επίδοση του προτεινομένου σχήματος ως προς το συνολικό πλήθος μηνυμάτων που απαιτούνται ανά κόμβο.	133
-----	--	-----

Κατάλογος πινάκων

4.1	Ορολογία Κεφαλαίου 4	77
5.1	Πίνακας οφέλους του κόμβου n_i σύμφωνα με την εγωιστική προσέγγιση καθαρών στρατηγικών.	115
5.2	Πίνακας οφέλους του κόμβου n_i σύμφωνα με την προσέγγιση συσχετισμένων στρατηγικών.	119
5.3	Παράμετροι προσομοίωσης	127
5.4	Θεωρητικά βέλτιστη κατανομή των κόμβων στις υπηρεσίες του MS-WSN.	127

Κατάλογος Αλγορίθμων

1	Διαπραγμάτευση ενός μεμονωμένου κόμβου n_i με έναν κόμβο n_p που ανήκει στο συνασπισμό $S(k, r_j)$	86
2	Η εγωιστική στρατηγική μεγιστοποίησης του οφέλους των κόμβων.	115
3	Η διαδικασία WOT του κόμβου n_i	123

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSN) έχουν προσελκύσει το ερευνητικό ενδιαφέρον πολυάριθμων ερευνητικών ομάδων ανά τον κόσμο. Τα WSN αποτελούνται από ένα πλήθος ασύρματων αισθητήρων (Wireless Sensors, WS) επιφορτισμένων με την παρακολούθηση των περιοχών όπου έχουν διασκορπισθεί. Εφοδιασμένοι με διεπαφές παρακολούθησης φαινομένων (θερμοκρασία, υγρασία, ένταση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κ.α.) ή καταστάσεων (ανίχνευση κίνησης, παραβίαση ασφαλείας κ.α.), οι WS λαμβάνουν μετρήσεις τις οποίες αναφέρουν σε σημεία συγκέντρωσης πληροφορίας. Καθώς τα WSN αναπτύσσονται σε περιοχές όπου η ανθρώπινη παρέμβαση είναι δύσκολη ή οικονομικά ασύμφορη, η λειτουργία τους πρέπει να είναι *αυτόνομη*.

Η έννοια των αυτόνομων συστημάτων υπολογιστών και επικοινωνιών (autonomic computing) θεμελιώθηκε αρχικά από την *Πρωτοβουλία Αυτόνομου Υπολογισμού* (Autonomic Computing Initiative, ACI) [1]. Εμπνευσμένη από τη λειτουργία του νευρικού συστήματος του ανθρώπινου σώματος [2], η αρχιτεκτονική ενός αυτόνομου συστήματος υπόκειται σε προκαθορισμένες σχεδιαστικές κατευθύνσεις που του αποδίδουν συγκεκριμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, κάθε αυτόνομο σύστημα πρέπει να είναι:

Αυτόματο. Κάθε αυτόματο σύστημα πρέπει να μπορεί να αυτο-ελέγχει τις εσωτερικές του διαδικασίες και λειτουργίες. Έτσι, πρέπει να μπορεί να εκκινήσει και να διατηρήσει τη λειτουργία του χωρίς την ανάγκη εξωτερικής βοήθειας ή παρέμβασης. Συνεπώς, οι αναγκαίες πληροφορίες για την έναρξη λειτουργίας του συστήματος πρέπει είτε να έχουν δοθεί σε αυτό εκ των προτέρων, είτε να μπορούν να συλλέγουν από το ίδιο το σύστημα.

Προσαρμοστικό. Ένα αυτόνομο σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να τροποποιήσει τη λειτουργία του. Κάτι τέτοιο επιτρέπει στο σύστημα να μπορεί να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και να διαχειρίζεται τις χωροχρονικές αλλαγές του στο πλαίσιο της βέλτιστης λειτουργίας του, είτε μακροπρόθεσμα είτε βραχυπρόθεσμα.

Ενήμερο. Η έννοια της ενημέρωσης σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να αντιλαμβάνεται την κατάσταση λειτουργίας του ώστε να είναι σε θέση να αντιληφθεί αν επιτελεί τον σκοπό του. Ουσιαστικά, η ενημέρωση ελέγχει την ικανότητα προσαρμογής της λειτουργικής συμπεριφοράς του συστήματος στο πλαίσιο των αλλαγών του εξωτερικού ή εσωτερικού του περιβάλλοντος.

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι ιδιότητες της προσαρμογής και της ενημέρωσης είναι αυτές που προσδίδουν την ιδιότητα της αυτοματοποίησης. Η ανωτέρω γενική περιγραφή των ιδιοτήτων ενός αυτόνομου συστήματος καταδεικνύει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά ενός αυτόνομου συστήματος, χωρίς όμως να καθιστά σαφή τον τρόπο με τον οποίο αυτά μπορούν να διασφαλισθούν. Προς τούτο, η IBM όρισε τα χαρακτηριστικά που επιτρέπουν σε ένα σύστημα να είναι αυτόνομο, δηλαδή να έχει τις ανωτέρω ιδιότητες [3]. Σύμφωνα με τις κατευθύνσεις της IBM, ένα σύστημα μπορεί να αποκαλείται αυτόνομο, όταν είναι:

1. αυτο-ρυθμιζόμενο (self-configurable)
2. αυτο-βελτιστοποιούμενο (self-optimizing)
3. αυτο-προστατευόμενο (self-protecting)
4. αυτο-ιάσιμο (self-healing)

Στην περίπτωση των WSN, η ιδιότητα αυτο-ρύθμισης σημαίνει ότι ένα WSN πρέπει να είναι σε θέση να αντιληφθεί τον εαυτό του ώστε να ρυθμίσει, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, τις παραμέτρους λειτουργίας του. Αντίστοιχα, η αυτο-βελτιστοποίηση προσδίδει στο WSN την ικανότητα αυτόματης ρύθμισης των παραμέτρων λειτουργίας του, ώστε η τελευταία να παραμένει βέλτιστη σε κάθε περίπτωση. Η έννοια της αυτο-προστασίας συνεπάγεται ότι ένα WSN πρέπει να έχει τη δυνατότητα να προλαμβάνει και να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά καταστάσεις που απειλούν τη (βέλτιστη) λειτουργία του. Οι καταστάσεις αυτές μπορεί να είναι είτε ενδογενείς είτε εξωγενείς αντίστοιχα με το αν προέρχονται από το εσωτερικό του WSN, π.χ. στην περίπτωση λειτουργίας κακόβουλων WS, ή οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες, π.χ. στην περίπτωση καταστροφής WS καίριων για τη λειτουργία του WSN συνολικά. Τέλος, στην περίπτωση διαταραχής της λειτουργίας του, ένα WSN πρέπει να είναι αυτο-ιάσιμο, δηλαδή να μπορεί να διαγνώσει το πρόβλημα που προκάλεσε αυτή τη διαταραχή, να το αντιμετωπίσει και να επαναφέρει τη λειτουργία του στη βέλτιστη κατάστασή της.

Η επίτευξη των ανωτέρω χαρακτηριστικών και ιδιαίτερα η διατήρηση της ανεξαρτησίας τους στο πλαίσιο λειτουργίας των WSN βασίζεται στην ορθή αρχιτεκτονική σχεδίαση των WSN, η οποία πρέπει να είναι αρθρωτή (modular) και να ακολουθεί συγκεκριμένα πρότυπα σχεδίασης (design patterns), όπως π.χ. το MVC (Model-View-Controller) ή το SC (Service Composition).

Η ικανοποίηση των απαιτήσεων για το χαρακτηρισμό των WSN ως αυτόνομων συστημάτων είναι ουσιαστική γιατί εγγυάται τη βέλτιστη λειτουργία τους χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Εντούτοις, η ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων δεν είναι εύκολη καθώς, αφενός, ο διαχωρισμός των απαιτούμενων χαρακτηριστικών για το χαρακτηρισμό τους ως αυτόνομων δεν είναι πάντα σαφής και, αφετέρου, τα WSN χαρακτηρίζονται από εγγενείς περιορισμούς που περιορίζουν το εύρος των δυνατών εφαρμογών τους. Ο βασικότερος αυτών των περιορισμών είναι η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας προς μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των WSN (βλ. κεφάλαιο 2 για λεπτομέρειες και συζήτηση). Η πρόσφατη βιβλιογραφία μελετά το πρόβλημα της μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής των WSN από πολλές πλευρές, βελτιστοποιώντας ενεργειακά τις διαδικασίες δρομολόγησης, εφαρμόζοντας τεχνικές συνάθροισης δεδομένων και ομαδοποίησης WS, υλοποιώντας σχήματα κωδικοποίησης και συγχώνευσης πληροφοριών κ.ο.κ. Η προσπάθεια απλοποίησης και ενεργειακής βελτιστοποίησης των εφαρμοσμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και ανάλυσης δεδομένων κατέδειξε από νωρίς την ύπαρξη στόχων βελτιστοποίησης που δεν είναι δυνατό να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα. Επομένως, είναι απαραίτητος ο κατάλληλος συμβιβασμός μεταξύ των ασυμβίβαστων στόχων βελτιστοποίησης. Ενδεικτικά, η ανάγκη μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης των λειτουργιών των WS αντιτίθεται στην ανάγκη για υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων που αναφέρουν. Αντίστοιχα, η αξιοπιστία στη μετάδοση πακέτων πληροφορίας μεταξύ των κόμβων έρχεται σε αντιδιαστολή με την ανάγκη μείωσης της πληροφοριακής επιβάρυνσης (πλεονάζουσας κίνησης, overhead traffic) για λόγους μείωσης κατανάλωσης ενέργειας. Λεπτομέρειες επί αυτών των αναγκαίων συμβιβασμών μπορούν να βρεθούν στο κεφάλαιο 4 και στις αναφορές [4–6], αντίστοιχα.

Πέραν της ανάγκης εύρεσης συμβιβαστικών λύσεων, η σχεδίαση αρθρωτών αυτόνομων συστημάτων συχνά παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα [7]. Συνεπώς, ο ντετερμινιστικός προσδιορισμός της βέλτιστης λειτουργίας ενός WSN δεν είναι πάντα εφικτός. Επίσης, η κεντρική διαχείριση της λειτουργίας του WSN δεν είναι δυνατός επειδή, για λόγους κόστους, η χρήση ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων δεν είναι αποδεκτή. Οι περιορισμοί πολυπλοκότητας και υπολογιστικών δυνατοτήτων ωθούν την σχεδίαση των WSN προς την κατεύθυνση ανάπτυξης *κατανεμημένων* αρχιτεκτονικών, χαμηλής πολυπλοκότητας που θα διαχειρίζονται βέλτιστα τους αναπόφευκτους συμβιβασμούς μεταξύ των στόχων βελτιστοποίησης.

Στην παρούσα διατριβή, η διατύπωση μαθηματικών υποδειγμάτων (μοντέλων) της συμπεριφοράς των WS και η σχεδίαση των τεχνικών βελτιστοποίησης της λειτουργίας των WSN γίνεται με χρήση της θεωρίας παιγνίων [8]. Η θεωρία παιγνίων θεμελιώθηκε από τις εργασίες των John von Neumann και Oskar Morgenstern [9, 10] και εδραιώθηκε με τις εργασίες του John F. Nash [11, 12]. Στοχεύοντας στη μελέτη και βελτιστοποίηση των οικονομικών αγορών, όπου οι λειτουργικές διαδικασίες είναι αναγκαστικά κατανεμημένες και οι εμπλεκόμενες οντότητες συχνά έχουν αντικρουόμενα συμφέροντα, η θεωρία παιγνίων είναι κατάλληλη για τη διατύπωση μοντέλων για αυτόνομα, κατανεμημένα συστήματα όπου οι στόχοι

βελτιστοποίησης είναι αντικρουόμενοι. Η σταδιακή ανάπτυξη της θεωρίας παιγνίων οδήγησε ταχέως στη διατύπωση εναλλακτικών εκδοχών της, με στόχο την καλύτερη διατύπωση μοντέλων για διαφοροποιημένες καταστάσεις τις οποίες η κλασική θεωρία παιγνίων αδυνατεί να καλύψει επαρκώς. Η εξελικτική, η συνεργατική καθώς και η θεωρία παιγνίων υπό αβεβαιότητα είναι τρεις από τις παραλλαγές της κλασικής θεωρίας που χρησιμοποιούνται ευρέως στη σύγχρονη βιβλιογραφία για τη μελέτη των WSN αλλά και άλλων συστημάτων επικοινωνιών. Το κεφάλαιο 3 περιέχει περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με τις διάφορες εκδοχές της θεωρίας παιγνίων αλλά και παραδείγματα που άπτονται της μοντελοποίησης WSN με χρήση της συγκεκριμένης θεωρίας.

Η χρήση της θεωρίας παιγνίων στην παρούσα διατριβή γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά, η θεωρία παιγνίων δημιουργίας συνασπισμών, μία εκδοχή της συνεργατικής θεωρίας παιγνίων, εφαρμόζεται για τη διαμόρφωση της συμπεριφοράς των WS που συνιστούν ένα WSN ώστε αυτή να αντανακλά τα ενεργειακά οφέλη που προκύπτουν από τη συνεργασία των WS (βλ. παράγραφο 3.2.2 για ορισμούς και συζήτηση σχετικά με τη θεωρία παιγνίων δημιουργίας συνασπισμών). Στην προσπάθειά τους να μεγιστοποιήσουν το ενεργειακό τους όφελος, οι WS συνασπίζονται δημιουργώντας συνεργατικές οντότητες. Το προτεινόμενο σχήμα δημιουργίας συνασπισμών βελτιστοποιείται ακολούθως από ένα μικρό σύνολο ισχυρότερων υπολογιστικά κόμβων. Το προτεινόμενο σχήμα είναι αυτο-ρυθμιζόμενο καθώς το WSN αυτο-οργανώνει τους συνασπισμούς κόμβων χωρίς κάποια εξωτερική παρέμβαση. Επίσης, υποστηρίζοντας τεχνικές εκ των υστέρων επεξεργασίας δεδομένων, ανιχνεύει ενδεχόμενες αλλαγές στο εξωτερικό ή εσωτερικό περιβάλλον του WSN, ώστε η δομή των συνασπισμών του να παραμένει βέλτιστη σε κάθε περίπτωση, επιτρέποντας το χαρακτηρισμό του ως αυτο-βελτιστοποιούμενο, αυτο-ιάσιμο και αυτο-προστατευόμενο.

Η υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών σε ομοιόμορφα WSN με (πιθανώς) ομαδοποιημένους κόμβους μελετάται στη συνέχεια με εφαρμογή της συσχετιστικής θεωρίας παιγνίων (βλ. εδάφιο 3.3.2 για ορισμούς και λεπτομέρειες). Θεωρώντας ένα ομοιόμορφο WSN στο οποίο κάθε WS μπορεί να υποστηρίξει ένα σύνολο υπηρεσιών, η συσχετιστική θεωρία παιγνίων διαχειρίζεται την τάση των WS να προτιμούν την υποστήριξη της περισσότερο αποδοτικής ενεργειακά υπηρεσίας έναντι των λιγότερο ενεργειακά αποδοτικών. Το προτεινόμενο σχήμα κατανομής των WS σε υπηρεσίες εφαρμόζει κριτήρια καθολικής υποστήριξης των υπηρεσιών στο WSN καθώς και δικαιοσύνης μεταξύ των WS, με απώτερο στόχο τη μεγιστοποίηση της διάρκειας εξυπηρέτησης των υπηρεσιών του WSN. Είναι επίσης δυναμικό, προσαρμόζοντας βέλτιστα την κατανομή των WS όταν υπάρχει αλλαγή στον αριθμό ή τα χαρακτηριστικά των υποστηριζόμενων υπηρεσιών. Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοσθεί σε πληθώρα WSN που υποστηρίζουν ομαδοποίηση κόμβων, διαφανώς, χωρίς την ανάγκη διαφοροποίησης του σχήματος ομαδοποίησης.

Η διατριβή συνεχίζει ως ακολούθως. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται εισαγωγή στα χαρακτηριστικά των WSN και των WS που τα απαρτίζουν. Το Κεφάλαιο 3 εισάγει τον αναγνώστη στη

θεωρία παιγνίων και ειδικότερα στις τρεις βασικές εκδοχές αυτής που θα αξιοποιηθούν στο πλαίσιο της διατριβής. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται το προτεινόμενο σχήμα δημιουργίας συνασπισμών κόμβων. Η μελέτη σχετικά με την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών σε WSN με ομαδοποιημένους κόμβους παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 αποτιμάται η χρήση της θεωρίας παιγνίων στο γενικότερο πρόβλημα ομαδοποίησης WS στα WSN.

Κεφάλαιο 2

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

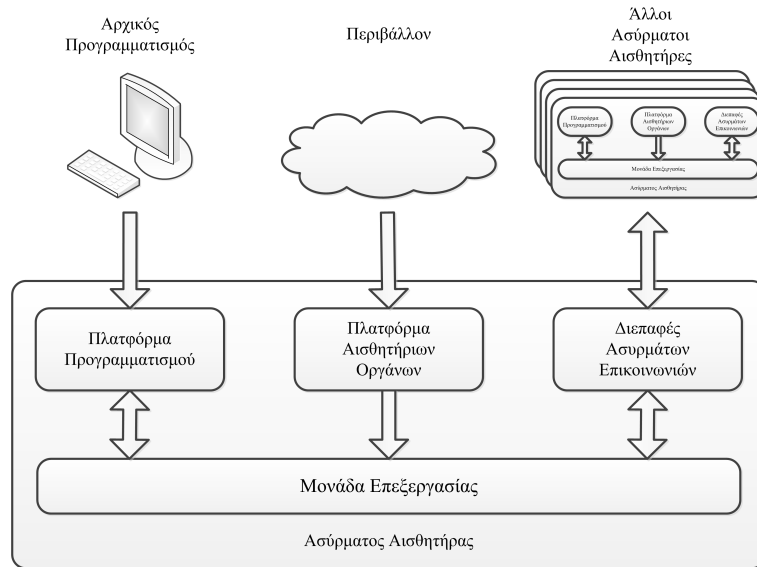
2.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων ετών έχει καταστήσει εφικτή τη σχεδίαση και παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και συσκευών υπό τη μορφή *Μικροηλεκτρομηχανικών* συστημάτων (ΜΗΜΣ ή Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS). Λόγω του μικρού όγκου και του χαμηλού κόστους παραγωγής τους, τα MEMS μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε πλήθος εφαρμογών. Η δημιουργία μικρών και φθηνών ασυρμάτων αισθητήρων (Wireless Sensors, WS) προσανατολισμένων στην επίβλεψη φυσικών φαινομένων και κατασκευών αποτελεί μία από τις πλέον αντιπροσωπευτικές χρήσεις των MEMS [13].

Η αρχιτεκτονική ενός WS αποτελείται από τέσσερα δομικά τμήματα και συνθέτουν την αρχιτεκτονική του όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Αυτά είναι (1) η πλατφόρμα προγραμματισμού, (2) η πλατφόρμα αισθητήριων οργάνων, (3) οι διεπαφές ασυρμάτων επικοινωνιών και (4) η μονάδα επεξεργασίας.

Η πλατφόρμα προγραμματισμού επιτρέπει τον αρχικό προγραμματισμό ενός WS πριν από τη χρησιμοποίησή του. Μέσω της πλατφόρμας προγραμματισμού η οποία μπορεί να περιλαμβάνει USB, Ethernet ή σειριακές θύρες είναι δυνατή η ενημέρωση του λογισμικού (software) ή του μεσισμικού (firmware) του WS. Έτσι, η πλατφόρμα προγραμματισμού επιτρέπει τον καθορισμό της συμπεριφοράς του WS στο πλαίσιο της επικείμενης χρήσης του. Η πλατφόρμα αισθητήριων οργάνων αποτελείται από ένα ή περισσότερα αισθητήρια όργανα που ανιχνεύουν φυσικά φαινόμενα (θερμοκρασία, υγρασία, φωτεινότητα, ένταση υπερύδους ακτινοβολίας, ηλεκτρομαγνητικά πεδία, κίνηση, ένταση σεισμικών δονήσεων, ένταση ηχητικών σημάτων κ.α.).

Οι διεπαφές ασυρμάτων επικοινωνιών αποτελούνται από μία ή περισσότερες κεραίες εκπομπής και λήψης και επιτρέπουν την επικοινωνία των WS με άλλους WS ή άλλες υπολογιστικές συσκευές εφοδιασμένες με τον απαραίτητο τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό. Η μονάδα επεξεργασίας αποτελεί το συνδεδετικό κρίκο των ανωτέρω μονάδων, επιτρέποντας την επεξερ-



Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική λειτουργίας ενός WS

γασία και αποστολή των μετρήσεων που λαμβάνονται από τη μονάδα αισθητήριων οργάνων βάσει των προδιαγραφών που προδιαγράφει η μονάδα προγραμματισμού.

Η χρήση των ασυρμάτων αισθητήρων πραγματοποιείται κατά κανόνα στο πλαίσιο ενός μεγαλύτερου WSN. Τα WSN αποτελούνται συνήθως από μεγάλο αριθμό αισθητήρων (ορισμένες υλοποιήσεις WSN απαιτούν τη χρήση δεκάδων χιλιάδων αισθητήρων [14, 15]). Το μεγάλο πλήθος αισθητήρων που είναι απαραίτητο για την αποτελεσματική λειτουργία των WSN, δημιουργεί παράλληλα και την ανάγκη ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής τους, ιδιαίτερα στο πλαίσιο υλοποιήσεων WSN ευρείας κλίμακας. Προς τούτο, τα δομικά τμήματα του υλισμικού (hardware) των WS είναι ως επί το πλείστον χαμηλού κόστους και δυνατοτήτων. Ανάλογα με τη σκοπιμότητα της χρησιμοποίησής τους, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των WS μπορεί να παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις, επιτρέποντας την ομαδοποίησή τους σε δύο βασικές κατηγορίες αντίστοιχα προς τις δυνατότητές τους [14].

Ένας τυπικός WS χαμηλών υπολογιστικών δυνατοτήτων περιέχει ένα μικροεπεξεργαστή που χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλή συχνότητα λειτουργίας (4 MHz – 16 MHz). Ως προς τη μνήμη, ένας υπολογιστικά αδύναμος WS περιέχει συνήθως μία μνήμη αποθήκευσης τύπου flash μεγέθους 8kB – 512kB και μία μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) μεγέθους 0.5kB – 64kB. Οι κεραίες εκπομπής/λήψης των WS λειτουργούν συνήθως σε συχνότητες με φέροντα στα 868MHz (στην Ευρώπη), 915MHz (στην Αμερική) και 2.4GHz (παγκοσμίως), έχοντας τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων με ρυθμούς που ξεκινούν από τα 10kbps και φθάνουν μέχρι τα 250kbps. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αδύναμων υπολογιστικά WS αποτελούν οι Mica/Mica2/MicaZ, IRIS, Telos/TMote [16] και EYES [17].

Οι ισχυρότεροι WS περιέχουν επεξεργαστές με συχνότητες που μπορεί να φθάσουν ακόμα και τα 400MHz (Stargate). Αντίστοιχα, η μνήμη αποθήκευσης ενός ισχυρού WS μπορεί να φθάνει 32MB και η μνήμη τυχαίας προσπέλασης τα 64MB. Οι συχνότητες επικοινωνίας ή ο

ρυθμός μετάδοσης δεδομένων δεν τροποποιούνται σημαντικά. Παραδείγματα υπολογιστικά ισχυρών AA αποτελούν οι IMote/IMote2, Stargate και Netbridge NB-100 [16].

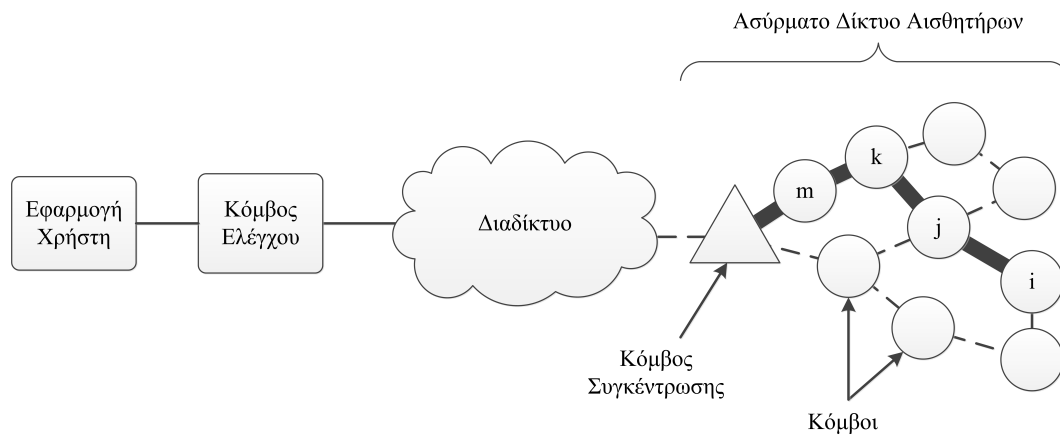
Σε κάθε περίπτωση, οι WS τροφοδοτούνται από μία ή περισσότερες μπαταρίες περιορισμένης χωρητικότητας (συνήθως τύπου AA). Όπως αναλύεται στη συνέχεια, η αδυναμία επανατροφοδότησης στην περίπτωση όπου τα ενεργειακά αποθέματα των WS τελειώσουν συνιστά το μεγαλύτερο πρόβλημα των WSN, καθιστώντας επιτακτική ανάγκη το σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων για τον καθορισμό των λειτουργικών διαδικασιών WS.

2.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSN)

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, οι WS σπανίως χρησιμοποιούνται μεμονωμένα: η χρήση τους συνήθως συνιστάται στο πλαίσιο διευρυμένων WSN τα οποία αποτελούνται από εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες WS. Τα WSN αναπτύσσονται συνήθως σε περιοχές όπου η ανθρώπινη πρόσβαση είναι δύσκολη ή αδύνατη. Στην τελευταία περίπτωση, η ανάπτυξη ενός WSN μπορεί να πραγματοποιηθεί με ρίψη των αισθητήρων από εναέρια μέσα, π.χ. ελικόπτερα ή αεροπλάνα [18]. Συνεπώς, οποιαδήποτε εξωτερική, φυσική παρέμβαση στη λειτουργία τους δεν είναι εφικτή είτε για οικονομικούς είτε για πρακτικούς λόγους. Η αδυναμία φυσικής πρόσβασης στην τοποθεσία ανάπτυξης του WSN αποτελεί και την κύρια αιτία μελέτης της λειτουργίας τους καθώς οι περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι των WS καθιστούν μη αποδοτική τη λειτουργία των WSN σε πρωτόκολλα που δεν είναι ενεργειακά βελτιστοποιημένα. Καθώς η κύρια αιτία ενεργειακής κατανάλωσης ενός WS έγκειται στη χρήση των τηλεπικοινωνιακών διεπαφών του για την αποστολή και λήψη δεδομένων, η διεθνής βιβλιογραφία επιδιώκει κατά κύριο λόγο την ελαχιστοποίηση της σχετικής δραστηριότητας.

Η μελέτη της τηλεπικοινωνιακής δραστηριότητας των WS των WSN οδήγησε τη σχετική έρευνα στη διατύπωση αφαιρετικών μοντέλων με τη βοήθεια της θεωρίας γράφων [19]. Συγκεκριμένα, τα WSN λογίζονται συνήθως ως γράφοι $G(V, E)$ όπου V είναι οι κόμβοι και E οι ακμές του γράφου. Στο πλαίσιο λειτουργίας των WSN, οι κόμβοι V αντιπροσωπεύουν τους WS, ενώ οι ακμές E αντιπροσωπεύουν τηλεπικοινωνιακές συνδέσεις μεταξύ κόμβων. Ακολουθώντας τη σημειολογία της θεωρίας γράφων, δύο κόμβοι (WS) συνδέονται με μία ακμή εφόσον η επικοινωνία τους είναι άμεσα εφικτή χωρίς την ανάγκη παρεμβολής τρίτων οντοτήτων. Αντίστοιχα, δύο κόμβοι $v_i, v_j \in V$ καλούνται *γείτονες* αν στο γενικευμένο γράφο του WSN υπάρχει ακμή $e_{ij} \in E$, όπου e_{ij} είναι ακμή που ενώνει τους κόμβους v_i και v_j . Στη συνέχεια, οι WS ενός WSN θα καλούνται απλά *κόμβοι*, στο πλαίσιο της μαθηματικής περιγραφής των WSN ως γενικευμένων γράφων. Η γενική αρχιτεκτονική λειτουργίας ενός WSN παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους κόμβους ενός WSN συνήθως προωθούνται σε συγκεκριμένο κόμβο, τον κόμβο *συγκέντρωσης* (sink). Ο κόμβος συγκέντρωσης είναι συνή-



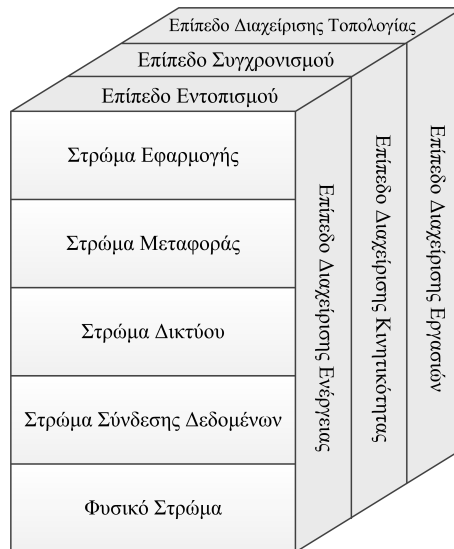
Σχήμα 2.2: Γενική αρχιτεκτονική ενός WSN.

θως ισχυρότερος υπολογιστικά και ενεργειακά από τους απλούς κόμβους του δικτύου. Εκτός από τη συλλογή των δεδομένων που αποστέλλονται από τους κόμβους, ο κόμβος συγκέντρωσης είναι υπεύθυνος για τη διασύνδεση του WSN με το διαδίκτυο. Η αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση που συνεπάγεται η συλλογή, επεξεργασία και προώθηση των πληροφοριών των κόμβων του WSN στο διαδίκτυο εξηγεί και την ανάγκη ύπαρξης του κόμβου συγκέντρωσης ως σημείου αναφοράς για το WSN, σε ενεργειακό και υπολογιστικό επίπεδο. Η πληροφορίες που συγκεντρώνει ο κόμβος συγκέντρωσης προωθούνται στη συνέχεια μέσω του διαδικτύου σε κατάλληλες υποδομές συγκέντρωσης, ελέγχου και επεξεργασίας πληροφοριών, επιτρέποντας τη μακρόθεν παρακολούθηση και έλεγχο του WSN μέσω κατάλληλων εφαρμογών χρήστη.

Δεδομένων των ενεργειακών δυνατοτήτων των κόμβων ενός WSN, η απεριόριστη αύξηση της ισχύος εκπομπής τους με στόχο τη δημιουργία σημείο προς σημείο συνδέσεων μεταξύ απομακρυσμένων γεωγραφικά κόμβων –αυξάνοντας ουσιαστικά το μέγεθος της γειτονιάς των κόμβων¹– δεν είναι εφικτή. Για το λόγο αυτό, η επιτυχής επικοινωνία μεταξύ δύο μη γειτονικών κόμβων γίνεται μέσω της προώθησης των σχετικών μηνυμάτων από ενδιάμεσους κόμβους. Η διαδρομή που δημιουργείται μέσω αυτού του τρόπου προώθησης είναι αντίστοιχη της έννοιας της *διαδρομής* (path) της θεωρίας γράφων, γεγονός που συμβάλλει περαιτέρω στην ενίσχυση της ορθότητας της περιγραφής των WSN μέσω της θεωρίας αυτής. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται με έντονη διαγράμμιση μια πιθανή διαδρομή για τη μετάδοση των μετρήσεων του κόμβου *i* στον κόμβο συγκέντρωσης, μέσω των ενδιάμεσων κόμβων *j*, *k*, *m*. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προώθηση των μηνυμάτων πραγματοποιείται πάντα μέσω γειτονικών κόμβων. Η λειτουργία βήμα προς βήμα (hop-by-hop) προώθησης των μηνυμάτων πληροφορίας μεταξύ των κόμβων ενός WSN δικαιολογεί επίσης την κατάταξη των WSN στη γενικότερη κατηγορία των *ad-hoc* δικτύων.

Η διπλή λειτουργία των κόμβων ενός WSN, οι οποίοι λειτουργούν ως *πηγές πληροφο-*

¹Κατ' αντιστοιχία με τον ορισμό των γειτόνων ενός κόμβου σε ένα WSN, η γειτονιά ενός κόμβου ορίζεται ως το σύνολο των γειτόνων του.



Σχήμα 2.3: Η στοίβα πρωτοκόλλων ενός WSN

ρίας αλλά και ως *αναμεταδότες* μηνυμάτων, σε συνδυασμό με τα περιορισμένα ενεργειακά τους αποθέματα, οδήγησε τη σχεδίαση της στοίβας πρωτοκόλλων των WSN σε μια τροποποιημένη εκδοχή του παραδοσιακού μοντέλου OSI πέντε στρωμάτων, με επιπλέον επίπεδα σχεδιασμού που αποσκοπούν κατά κύριο λόγο στην ενεργειακή βελτιστοποίηση της δικτυακής λειτουργίας των κόμβων του WSN. Η στοίβα πρωτοκόλλων των WSN απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.3, πέραν των πέντε κλασικών στρωμάτων OSI, δηλαδή του *φυσικού στρώματος*, του *στρώματος σύνδεσης δεδομένων*, του *στρώματος δικτύου*, του *στρώματος μεταφοράς* και του *στρώματος εφαρμογής*, ορίζονται και έξι επίπεδα σχεδιασμού, δηλαδή τα επίπεδα *διαχείρισης ενέργειας*, *διαχείρισης κινητικότητας*, *διαχείρισης εργασιών*, *διαχείρισης τοπολογίας*, *εντοπισμού* και *συγχρονισμού* [14].

Το φυσικό στρώμα (Physical layer, PHY) υλοποιεί στους κόμβους σχήματα κωδικοποίησης και διαμόρφωσης, ενώ είναι υπεύθυνο για την υλοποίηση τεχνικών αποστολής και λήψης μηνυμάτων. Καθώς το περιβάλλον μετάδοσης είναι θορυβώδες και οι κόμβοι του WSN μπορεί να είναι κινητοί, το στρώμα σύνδεσης δεδομένων (data link layer) είναι υπεύθυνο για την εξασφάλιση ασφαλούς και αξιόπιστης τηλεπικοινωνίας μέσω τεχνικών ελέγχου και διόρθωσης λαθών. Επιπλέον, το στρώμα σύνδεσης δεδομένων είναι υπεύθυνο για την πρόσβαση των κόμβων στο κοινό μέσο, ορίζοντας κατάλληλα σχήματα πρόσβασης (Medium Access Control, MAC) που αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση των συγκρούσεων μεταξύ μηνυμάτων γειτονικών κόμβων. Το στρώμα δικτύου (Network layer, NWK) επιφορτίζεται με τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαδρομής δρομολόγησης των μηνυμάτων πληροφορίας που παράγουν ή αναμεταδίδουν οι κόμβοι. Το στρώμα μεταφοράς (Transport Layer, TRA) είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση της απαιτούμενης ροής μηνυμάτων στο δίκτυο, όπως αυτή προδιαγράφεται από το στρώμα εφαρμογής (Application layer, APP) που καθορίζει και τη

συνολική λειτουργία του WSN. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα στρώματα της αρχιτεκτονικής OSI σε ad-hoc δίκτυα παρέχονται στην παραπομπή [20].

Τα διάφορα επίπεδα σχεδιασμού που διαφοροποιούν τον ορισμό και τη λειτουργία των ανωτέρω στρωμάτων είναι απαραίτητα για τη διαχείριση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των WSN και την επακόλουθη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των κόμβων στο πλαίσιο ενός WSN. Συγκεκριμένα, το επίπεδο διαχείρισης ενέργειας καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ο κόμβος διαχειρίζεται την ενέργειά του. Για παράδειγμα, οι κόμβοι μπορούν να απενεργοποιούν τον πομποδέκτη τους προσωρινά μετά τη λήψη ενός μηνύματος από κάποιο γείτονά τους για να αποφύγουν διπλότυπα μηνύματα. Επίσης, όταν τα ενεργειακά αποθέματα ενός κόμβου είναι κοντά στην εξάντληση τους, ο κόμβος μπορεί να εκπέμψει ένα μήνυμα ενημερώνοντας τους γείτονές του ότι δεν θα ικανοποιεί αιτήματα προώθησης μηνυμάτων, δεσμεύοντας ουσιαστικά την ενέργειά του αποκλειστικά για την αποστολή των μετρήσεών του. Το επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας αναγνωρίζει και καταγράφει τις κινήσεις των κόμβων ώστε, αφενός, να διατηρείται η επίγνωση των κόμβων σχετικά με τη θέση των γειτόνων τους και, αφετέρου, να εξασφαλίζεται η γνώση σχετικά με τις εφικτές διαδρομές δρομολόγησης πληροφοριών προς άλλους κόμβους. Το επίπεδο διαχείρισης εργασιών ισορροπεί και να χρονοπρογραμματίζει τα μετρητικά καθήκοντα των κόμβων μιας ευρύτερης περιοχής, καθώς, υπό συνθήκες συνθήκες, είναι δυνατό να μην απαιτούνται μετρήσεις από όλους τους κόμβους μιας περιοχής, αλλά μόνο από ένα υποσύνολο αυτών. Ενδεικτικά, ένας σχετικός χρονοπρογραμματισμός μπορεί να προσδιορίζει τη συχνότητα αναφοράς των μετρήσεων των κόμβων του WSN ανάλογα προς τα ενεργειακά αποθέματα κάθε κόμβου, ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη κατανομή κατανάλωσης ισχύος μεταξύ των κόμβων.

Τα επίπεδα εντοπισμού, συγχρονισμού και διαχείρισης τοπολογίας λειτουργούν κατά βάση συνεργατικά με τα στρώματα της στήβας πρωτοκόλλων των WSN, καθιστώντας εφικτές υλοποιήσεις που βασίζονται σε πληροφορίες από διαφορετικά στρώματα της αρχιτεκτονικής της λειτουργίας των WSN (cross-layer architectures). Για τον επιτυχημένο χρονοπρογραμματισμό των καθηκόντων των κόμβων σε ένα WSN, είναι απαραίτητο να υπάρχει κοινή βάση χρονικής αναφοράς μεταξύ των κόμβων. Σε αντίθετη περίπτωση, η αξιολόγηση των μετρήσεων των κόμβων από γείτονες κόμβους ή τον κόμβο συγκέντρωσης θα ήταν υπό διαρκή αμφισβήτηση. Παρά το γεγονός ότι σχετικοί αλγόριθμοι αξιολόγησης πιθανώς παρωχημένης πληροφορίας υπάρχουν στην πρόσφατη σχετική βιβλιογραφία [21], η ύπαρξη στοιχειώδους συγχρονισμού μεταξύ των δομικών οντοτήτων ενός WSN θεωρείται γενικά επιβεβλημένη. Επίσης, το επίπεδο εντοπισμού είναι απαραίτητο για την αξιοποίηση των μετρήσεων των κόμβων των WSN, καθώς οι μετρήσεις αυτές έχουν ουσιαστική υπόσταση μόνο όταν αντιπροσωπεύουν τη μετρήσιμη συμπεριφορά των υπό παρακολούθηση φαινομένων σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος. Η έλλειψη γνώσης εντοπιότητας σε επίπεδο κόμβων θα είχε ως αποτέλεσμα τη διακίνηση πληροφορίας χωρίς να είναι δυνατή η αντιστοίχιση της πληροφορίας με τα χαρακτηριστικά των υπό παρακολούθηση φαινομένων. Τέλος, το επίπεδο

διαχείρισης τοπολογίας είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου η *κάλυψη* ή η *συνεκτικότητα* του δικτύου είναι επιβεβλημένες και ακολουθούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Η κάλυψη του δικτύου ορίζει το επίπεδο στο οποίο τα σημεία ενδιαφέροντος του WSN καλύπτονται μετρητικά από ένα ή περισσότερους κόμβους του WSN και σχετίζεται με τη διατήρηση της ικανότητας του WSN να ανιχνεύσει ένα γεγονός ή να μετρήσει με ακρίβεια ένα φυσικό φαινόμενο. Η συνεκτικότητα ενός WSN καθορίζει τη δυνατότητα μετάδοσης των πληροφοριών από ένα σημείο του WSN σε κάποιο άλλο και σχετίζεται με την ικανότητα ουσιαστικής αξιοποίησης των μετρητικών ικανοτήτων των κόμβων του WSN. Το επίπεδο διαχείρισης τοπολογίας θα μπορούσε, για παράδειγμα, να προδιαγράψει το σύνολο των κόμβων σε κάποια περιοχή του WSN που έχουν κλειστούς τους πομποδέκτες τους, διατηρώντας σε αποδεκτά επίπεδα την κάλυψη και τη συνεκτικότητα του WSN.

2.3 Προτυποποίηση των WSN

Η ετερογένεια των χαρακτηριστικά των κόμβων ενός WSN καθώς και η διαφορετικές απαιτήσεις από τη λειτουργία των WSN προκαλούν προβλήματα συμβατότητας, ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου είναι απαραίτητη η διασύνδεση δικτύων διαφορετικού τύπου. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος, έχει προταθεί από διαφορετικούς οργανισμούς μια σειρά προτύπων με στόχο την προτυποποίηση της λειτουργίας των WSN καθώς και τον ακριβή προσδιορισμό των λειτουργιών των κόμβων στο πλαίσιο των WSN.

2.3.1 Το πρότυπο IEEE 802.15.4

Στο πλαίσιο της προτυποποίησης ασύρματων προσωπικών δικτύων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (Low-Rate Wireless Personal Area Networks, LR-WPANs), το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) εξέδωσε το πρότυπο IEEE 802.15.4 το οποίο προσδιορίζει λεπτομερώς την πλατφόρμα επικοινωνιών των LR-WPANs, στα οποία τηλεπικοινωνιακά υπάγονται και τα WSN [22]. Συγκεκριμένα, το πρότυπο ορίζει τρεις ζώνες συχνοτήτων περί των 868MHz, 915MHz και 2.4GHz με εφαρμογή στην Ευρώπη, την Αμερική και σε παγκόσμια κλίμακα, αντιστοίχως. Επιπλέον, σε επίπεδο φυσικού στρώματος, στις ζώνες συχνοτήτων περί των 868MHz και 915MHz συστήνεται η κωδικοποίηση BPSK (Binary Phase Shift Keying), ενώ στη ζώνη περί τη συχνότητα 2.4GHz προδιαγράφεται η κωδικοποίηση O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying). Επιπλέον, συστήνονται υλοποιήσεις βασισμένες σε άλλου τύπου κωδικοποιήσεις και διαμορφώσεις όπως ASK (Amplitude Shift Keying), CSS (Chirp Spread Spectrum) και GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Στο επίπεδο πρόσβασης στο κοινό μέσο (Medium Access Control, *MAC*), ορίζονται κατάλληλα πρωτόκολλα που επιτρέπουν την αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των ασύρματων κόμβων σε τοπολογίες αστέρα (*star*) και πλέγματος (*mesh*), καθώς και σε τοπολογίες τύπου δέν-

δρου με ομαδοποιημένους ασύρματους κόμβους. Επίσης, η ασφάλεια των τηλεπικοινωνιών προτυποποιείται προδιαγράφοντας υπηρεσίες σχετικές με εμπιστευτικότητα και αυθεντικότητα δεδομένων καθώς και προστασία από παραγωγή διπλότυπων μηνυμάτων. Το πρότυπο 802.15.4 υλοποιείται στην πλειοψηφία των κατασκευαστών κόμβων.

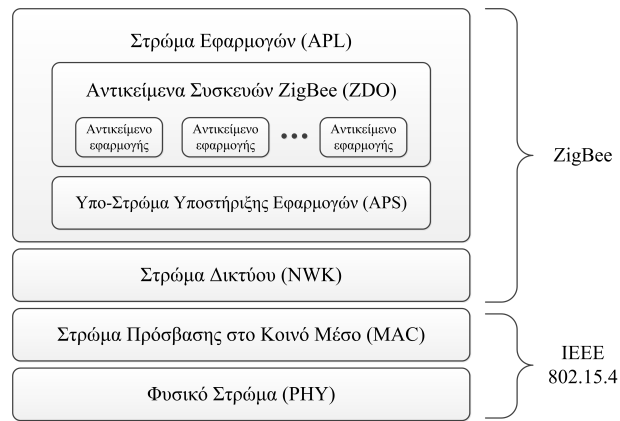
Το πρότυπο IEEE 802.15.4 ταιριάζει στα ειδικά τηλεπικοινωνιακά χαρακτηριστικά των WSN χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη τα λοιπά χαρακτηριστικά των WSN, καθώς αναφέρεται σε ευρύτερη ομάδα τηλεπικοινωνιακών κόμβων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Η ανάγκη ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας για την αποτελεσματική λειτουργία των WSN οδήγησε στην ανάπτυξη και άλλων προτύπων που αποσκοπούν στην προδιαγραφή των υπολοίπων στρωμάτων επικοινωνίας των κόμβων καθώς και της διαλειτουργικότητας των WSN με άλλου τύπου δίκτυα, όπως το Διαδίκτυο. Τα σημαντικότερα από αυτά τα πρότυπα είναι το *ZigBee* [23], το *WirelessHART* [24] και το *6LoWPAN* [25].

2.3.2 Το πρότυπο ZigBee

Το πρότυπο ZigBee αναπτύχθηκε από τη ZigBee Alliance, η οποία είναι μία διεθνής, μη κερδοσκοπική σύμπραξη μεγάλων κατασκευαστών ημιαγωγών και παρόχων τεχνολογίας. Ο στόχος του ZigBee είναι η ανάπτυξη μιας τηλεπικοινωνιακής πλατφόρμας προσανατολισμένης στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των WSN. Στο πλαίσιο του προτύπου υποστηρίζονται πέντε βασικές εφαρμογές: (1) οικιακός αυτοματισμός, (2) αυτοματισμός κατασκευών, (3) ευφυής ενέργεια, (4) τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και (5) προσωπική ιατρική φροντίδα.

Το ZigBee λειτουργεί συνεργατικά με το IEEE 802.15.4. Συγκεκριμένα, τα στρώματα του φυσικού επιπέδου και της πρόσβασης στο κοινό μέσο ορίζονται μέσω του IEEE 802.15.4, ενώ το ZigBee προδιαγράφει τις λειτουργίες του WSN σε επίπεδο δικτύου και εφαρμογών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

Το στρώμα δικτύου όπως προδιαγράφεται από το ZigBee είναι υπεύθυνο για την εγκατάσταση ενός νέου WSN καθώς και για την, κατά το δυνατόν, αυτοματοποιημένη ενσωμάτωση των κόμβων στο πλαίσιο του (νέου) WSN. Αντίστοιχα προς την επιθυμητή δικτυακή λειτουργία του WSN, το ZigBee μπορεί να διαμορφώσει διάφορα στρώματα της τηλεπικοινωνιακής στοίβας πρωτοκόλλων των κόμβων. Ενδεικτικά, η διευθυνσιοδότηση των κόμβων στο πλαίσιο του ZigBee δεν βασίζεται στη μοναδική κατασκευαστική ταυτότητα τους (Unique IDentity, UID) αλλά σε μία μικρότερη αλφαριθμητική ακολουθία που τους δίδεται από το διαχειριστή του δικτύου και έχει ισχύ αποκλειστικά στο πλαίσιο του WSN στο οποίο εκάστοτε συμμετέχουν. Κατ' αυτό τον τρόπο, το μέγεθος των μηνυμάτων που μεταδίδονται μειώνεται, μειώνοντας αντίστοιχα και τη σχετική κατανάλωση ενέργειας. Πρόσθετες πληροφορίες μπορεί να αποθηκεύονται στην αποδοθείσα διεύθυνση κάθε κόμβου: σε δένδρικές τοπολογίες η μοναδική διεύθυνση κάθε κόμβου καταδεικνύει τη διαδρομή από τη ρίζα του δένδρου (συνήθως ο κόμβος συγκέντρωσης) μέχρι τον συγκεκριμένο κόμβο. Επίσης,



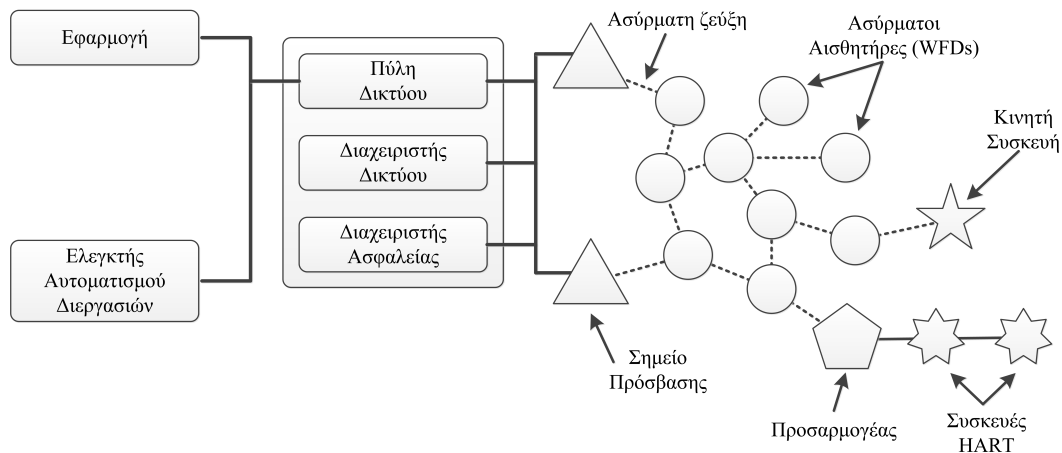
Σχήμα 2.4: Στοιβά πρωτοκόλλων ενός WSN σύμφωνα με το ZigBee.

το στρώμα δικτύου του ZigBee παρέχει διαδικασίες συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων και των ενδεχόμενων ελεγκτών δικτύου καθώς και λειτουργίες δρομολόγησης στο πλαίσιο της λειτουργίας πολλαπλών βημάτων των WSN.

Το στρώμα εφαρμογής (Application layer, APL) του ZigBee ορίζει δύο υπο-στρώματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4: (1) το υπο-στρώμα υποστήριξης εφαρμογών (Application Support Sub-Layer (APS) και (2) το υπο-στρώμα αντικειμένων συσκευών ZigBee (ZigBee Device Objects Sub-Layer, ZDO) που αποτελείται από τα αντικείμενα των εφαρμογών. Τα αντικείμενα των εφαρμογών αποτελούν επί της ουσίας τα συστατικά μέρη των εφαρμογών των κατασκευών, η ανάπτυξη των οποίων οφείλει να ακολουθεί τα σχετικά πρότυπα του ZigBee. Το υπο-στρώμα ZDO ορίζει το σύνολο των δυνατών δικτυακών λειτουργιών των κόμβων, καθορίζοντας κατά βάση το ρόλο των κόμβων στο πλαίσιο ενός WSN. Το ZDO είναι επίσης υπεύθυνο για την ομαλή ενσωμάτωση των κόμβων στο WSN. Το υπο-στρώμα APS επιτρέπει την ενημέρωση των κόμβων του WSN σχετικά με την εισαγωγή νέων κόμβων και τις δυνατότητες αυτών, επιτρέποντας, εκτός των άλλων, τον επιμερισμό των συνολικών δυνατοτήτων του WSN στους κατάλληλους κόμβους, στην περίπτωση ετερογενών WSN.

2.3.3 Το πρότυπο WirelessHART

Το πρότυπο WirelessHART αναπτύχθηκε ως επέκταση του βιομηχανικού προτύπου Highway Addressable Remote Transducer (HART) που αποτελεί το πλέον διαδεδομένο τηλεπικοινωνιακό πρότυπο σε επίπεδο βιομηχανικού αυτοματισμού με υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου [24]. Η αρχιτεκτονική δομή του WirelessHART απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5. Το WirelessHART ορίζει τρεις βασικές οντότητες, ανάλογα με το ρόλο που αυτές επιτελούν στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, ορίζονται (1) οι συσκευές *WirelessHART* (WirelessHART Field Devices, WFDs), (2) ο *διαχειριστής δικτύου* (Network Manager, NM) και (3) οι *πύλες δικτύου* (Gateways, GWs). Οι WFDs είναι οι κόμβοι που απαρτίζουν το WSN του συνολικού δικτύου επικοινωνιών. Οι πύλες δικτύου προσφέρουν διεπαφές επικοινωνίας μεταξύ



Σχήμα 2.5: Η αρχιτεκτονική του WirelessHART.

των ασύρματων και των ενσύρματων τμημάτων του συνολικού HART δικτύου. Κατ' αυτό τον τρόπο η εφαρμογή και οι σχετικοί ελεγκτές μπορούν να αλληλεπιδρούν με την υποδομή WirelessHART και να προσαρμόζουν κατάλληλα τις ενέργειές της ώστε να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές λειτουργίας της εφαρμογής. Ο ρόλος του διαχειριστή δικτύου είναι να καθιστά αποδοτική την επικοινωνία εντός του δικτύου, ρυθμίζοντας τη λειτουργία του τελευταίου τόσο σε θέματα δρομολόγησης όσο και σε θέματα πρόσβασης στο κοινό μέσο. Εκτός από τις ανωτέρω τρεις οντότητες, το WirelessHART προδιαγράφει τη λειτουργία *προσαρμογέων* (Adapters), οι οποίοι παρέχουν υπηρεσίες σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων WirelessHART του δικτύου και των υφιστάμενων, παραδοσιακών τμημάτων HART αυτού. Τέλος, το πρότυπο λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη *φορητών συσκευών* (Handhelds), οι οποίες εφοδιάζονται με τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό συμβατό με τους WFDs ώστε να καθίσταται αποτελεσματική η άμεση επικοινωνία με τμήματα του WSN.

Το WirelessHART ορίζεται βάσει του προτύπου IEEE 802.15.4, τουλάχιστον σε επίπεδο φυσικού στρώματος. Η πρόσβαση των οντοτήτων του δικτύου στο κοινό μέσο πραγματοποιείται κατόπιν γνωστοποίησης ενός κατάλληλου TDMA προγράμματος μετάδοσεων το οποίο υποστηρίζει, εκτός των άλλων, δυναμική καταχώριση εύρους ζώνης, ανάλογα με τις ανάγκες των κόμβων που εισάγονται στο WSN. Σε επίπεδο δικτύου, το πρότυπο ορίζει τεχνικές δρομολόγησης που βασίζονται στη διατήρηση σχετικών πινάκων σε κάθε κόμβο. Για κάθε πιθανή ζεύξη μεταξύ ενός WFD και μιας πύλης δικτύου, λαμβάνονται υπόψη περισσότερα του ενός μονοπάτια μετάδοσης, ώστε στην περίπτωση όπου υπάρξει διαταραχή στη μετάδοση μέσω ενός μονοπατιού, η ύπαρξη εναλλακτικών να διατηρήσει την αξιοπιστία μετάδοσης των δεδομένων σε επίπεδο 3σ, καθιστώντας την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης δεδομένων μεγαλύτερη από 99.73%. Σε επίπεδο μεταφοράς, το WirelessHART υποστηρίζει μετάδοση μεγάλων πακέτων δεδομένων με χρήση τεχνικών ομοίων του TCP. Η διαρκής καταγραφή στατιστικών σχετικά με την ποιότητα των ζεύξεων και το ποσοστό επιτυχών μεταδόσεων από τους WFD συνδράμει επίσης στην προσπάθεια μεγιστοποίησης της

αξιοπιστίας του προτύπου. Τέλος, σε επίπεδο εφαρμογής, υποστηρίζεται πλήρως το στρώμα εφαρμογής του HART. Συνεπώς, υφιστάμενα πρωτόκολλα συμβατά με το HART μπορούν απροβλημάτιστα να εφαρμοσθούν και στο WirelessHART.

2.3.4 Το πρότυπο 6LoWPAN

Τα ανωτέρω πρότυπα αποσκοπούν στη δημιουργία αρχιτεκτονικών που επιτρέπουν την ανάπτυξη εφαρμογών για WSN. Έτσι, είναι εφικτή η σχεδίαση και ανάπτυξη WSN που προσανατολίζονται σε συγκεκριμένες, καλά ορισμένες εφαρμογές που εκμεταλλεύονται τις στοίβες πρωτοκόλλων αυτών των πρωτοκόλλων. Εντούτοις, τα WSN αυτά δεν μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα με το διαδίκτυο καθώς τα πρότυπα που βασίζονται στο IEEE 802.15.4 δεν είναι συμβατά με το πρωτόκολλο IP [22] και, συνεπώς, οι κόμβοι τους δεν μπορούν να αλληλεπιδράσουν με την υποδομή του διαδικτύου. Αυτός είναι ο λόγος που είναι απαραίτητη η ύπαρξη κόμβων συγκέντρωσης ή πυλών δικτύου που συλλέγουν την πληροφορία που παράγεται από τους κόμβους του WSN και, ακολούθως, την προωθούν κατάλληλα στο διαδίκτυο. Μια τέτοιου είδους αρχιτεκτονική βέβαια καθιστά ευάλωτα τα WSN καθώς η λειτουργία τους εξαρτάται από την κατάσταση αυτών των δικτυακών οντοτήτων.

Η ανάγκη εναρμόνισης της λειτουργίας των WSN με το διαδίκτυο οδήγησε τον οργανισμό Internet Engineering Task Force (IETF) στην ανάπτυξη του προτύπου 6LoWPAN (IPv6 for Low-power Wireless Personal Area Network). Το 6LoWPAN αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός στρώματος προσαρμογής στο IPv6 πάνω από τη στοίβα πρωτοκόλλων του IEEE 802.15.4 ώστε κάθε κόμβος ενός WSN να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο και να είναι προσβάσιμος από το αυτό.

Το πρόβλημα προσαρμογής των WSN στο IPv6 έγκειται κατά κύριο λόγο στο σύστημα διευθυνσιοδότησης του τελευταίου, το οποίο απαιτεί την ύπαρξη επικεφαλίδας μήκους 40 bytes σε κάθε μήνυμα, τη στιγμή που το IEEE 802.15.4 ορίζει ως μέγιστο μήκος ενός πακέτου τα 127 bytes. Δεδομένων των περιορισμένων ενεργειακών δυνατοτήτων των κόμβων ενός WSN, η απευθείας υλοποίηση του IPv6 σε αυτούς θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της ωφέλιμης κίνησης πληροφοριών, οδηγώντας στην κατασπατάληση των πόρων του WSN. Το 6LoWPAN προτείνει την εισαγωγή ενός επιπέδου προσαρμογής που επιτρέπει τις επικοινωνίες IPv6 στο πλαίσιο λειτουργίας ενός WSN. Συγκεκριμένα, υλοποιείται μια λογική *στοιβαγμένων επικεφαλίδων* (stacked headers) οι οποίες αντικαθιστούν την παραδοσιακή, μονολιθική επικεφαλίδα που χρησιμοποιείται από το IPv6. Ορίζονται τέσσερις τύποι επικεφαλίδων (dispatch, πλέγματος, fragment και συμπίεσης επικεφαλίδας) οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με την περίπτωση. Επιπλέον, τεχνικές συμπίεσης επιτρέπουν τη συμπίεση των επικεφαλίδων από τα 40 bytes στα 4 bytes, μέγεθος κατάλληλο για χρήση στα WSN.

Εκτός από τη συμπίεση των επικεφαλίδων, η ανάπτυξη του 6LoWPAN στοχεύει στη λύση προβλημάτων δρομολόγησης και μεταφοράς που θα καταστήσουν απροβλημάτιστη

και περισσότερο διάφανη τη λειτουργία του IPv6 σε WSN.

2.4 Εφαρμογές των WSN

Με βάση την προηγηθείσα ανάλυση, οι λειτουργικές δυνατότητες ενός WSN εξαρτώνται από: (1) το πλήθος των κόμβων που το απαρτίζουν, (2) τα είδη των αισθητηρίων οργάνων που διαθέτουν οι κόμβοι και (3) τις ειδικές υλοποιήσεις της στοίβας πρωτοκόλλων και ειδικότερα του στρώματος εφαρμογής των κόμβων και του WSN, οι οποίες καθορίζουν την οριστική αρχιτεκτονική λειτουργίας του WSN.

Αντίστοιχα προς τα αισθητήρια όργανα που διαθέτουν οι κόμβοι του, ένα WSN μπορεί να παρακολουθήσει διάφορα φαινόμενα του περιβάλλοντός του. Συνεπώς, είναι δυνατή η υλοποίηση πολλών εφαρμογών, το φάσμα των οποίων περιλαμβάνει εφαρμογές ασφάλειας σε επίπεδο καθημερινότητας (επίβλεψη αντισεισμικότητας κτιρίων, επίβλεψη ενεργειακής απόδοσης συσκευών ή κτιρίων), εφαρμογές που άπτονται της εθνικής ασφάλειας (παρακολούθηση στόχων, στρατοπέδων, έγκαιρη ανίχνευση επιθέσεων, συλλογή λοιπών πληροφοριών αμυντικής φύσης), εφαρμογές περιβαλλοντικής προστασίας (παρακολούθηση ποιότητας χώματος και υδάτων, καταγραφή δραστηριότητας ζώων, ανίχνευση πυρκαγιών ή άλλων φυσικών καταστροφών), εφαρμογές υγείας (απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών, έγκαιρη ενημέρωση έκτακτων περιστατικών) κ.α. Στα επόμενα εδάφια παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένες εφαρμογές των WSN, ομαδοποιημένες βάσει του γενικότερου πλαισίου εφαρμογής τους.

2.4.1 Εφαρμογές ασφάλειας

Τα WSN έχουν χρησιμοποιηθεί ως τμήματα συστημάτων εντολών, ελέγχου, επικοινωνιών, υπολογισμού, ευφυίας, παρακολούθησης, αναγνώρισης και στόχευσης (C4ISR – Command, Control, Communications, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, Targeting) [26, 27]. Ο χαρακτηρισμός τους ως αυτόνομων συστημάτων καθιστά τα WSN ιδιαίτερα ελκυστικά για χρήση σε στρατιωτικά C4ISR συστήματα, όπου η δυνατότητα ταχείας εγκατάστασης, δυναμικής λειτουργίας και αυτόματης βελτιστοποίησης είναι καθοριστικής σημασίας. Επίσης, το χαμηλό κόστος των ασύρματων κόμβων επιτρέπει τη μαζική χρησιμοποίησή τους σε WSN στρατιωτικών εφαρμογών ώστε να εξασφαλισθεί επαρκής εφεδρεία εναλλακτικών διαμορφώσεων λειτουργίας στην περίπτωση όπου καταστραφούν κάποιοι από τους κόμβους. Ως εκ τούτου, η καταστροφή ενός κόμβου μπορεί να έχει πολύ μικρότερη επίδραση στην εξέλιξη μιας στρατιωτικής επιχείρισης σε σχέση με την καταστροφή ενός παραδοσιακού κέντρου παρακολούθησης και ανίχνευσης.

Το πρόγραμμα Smart Dust (*Εξυπνη Σκόνη*) αποτέλεσε μία από τις πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης στρατιωτικών εφαρμογών με βάση τα WSN [28, 29]. Θέτοντας ως αρχικό στόχο

την ανάπτυξη μικρών σε μέγεθος αισθητήρων, η σχετική έρευνα οδήγησε στη δημιουργία WS (ασυρμάτων αισθητήρων) με όγκο που δεν υπερέβαινε τα 16 mm^3 οι οποίοι μπορούσαν να συλλέξουν πληροφορίες σε σχέση με την κίνηση εχθρικών στόχων, την ύπαρξη επικίνδυνων χημικών σε ευρείες γεωγραφικές περιοχές, την επίβλεψη μεταφορών κ.α. Το εξαιρετικά μικρό μέγεθος των WS του Smart Dust κίνησε το ενδιαφέρον και άλλων εμπορικών εφαρμογών που τα χρησιμοποίησαν κυρίως για την επίβλεψη βιομηχανικής αυτοματοποιημένης παραγωγής. Εξάλλου, η προσπάθεια ανάπτυξης του Smart Dust είχε ως αποτέλεσμα τη σταδιακή ανάπτυξη του TinyOS [30], το οποίο είναι μέχρι σήμερα το περισσότερο διαδεδομένο λειτουργικό σύστημα για WS καθώς και την ίδρυση εταιριών που πρωτοστατούν στην ανάπτυξη και προτυποποίηση WSN [16, 31].

Στο πλαίσιο της επιτήρησης πεδίων μάχης, τα WSN έχουν εφαρμοσθεί και ως συστήματα ανίχνευσης ελεύθερων σκοπευτών (Sniper Detection Systems) [32]. Το αποτέλεσμα της σχετικής έρευνας ήταν η ανάπτυξη του *Boomerang* [33]. Χρησιμοποιώντας συστάδες κατάλληλα συντεταγμένων παθητικών ακουστικών WS, το *Boomerang* εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες των ηχητικών κυμάτων που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια πυροβολισμών για να ανιχνεύσουν, με διαφορική ανάλυση, τη θέση ελεύθερων σκοπευτών. Το *Boomerang* ορίζει συγκεντρωτική λειτουργία για τα σχετικά WSN, καθώς οι ακουστικοί WS βρίσκονται συνήθως ανεπτυγμένοι πάνω σε κινητές ή ακίνητες κατασκευές. Η επιτυχία του *Boomerang* οδήγησε στην ανάπτυξη μιας κατανεμημένης εκδοχής του, η οποία παρέχει ακόμη υψηλότερη ακρίβεια ανίχνευσης [34].

Το *VigilNet* αποτελεί μία ακόμη εφαρμογή των WSN προσαρμοσμένη σε στρατιωτικούς σκοπούς [35, 36]. Θεωρώντας την ανάπτυξη WSN ευρείας κλίμακας με περισσότερους από χίλιους κόμβους ανεπτυγμένους σε μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις (τουλάχιστον 0.1 km^2), το *VigilNet* έχει ως στόχο την ενεργειακά αποτελεσματική ανάπτυξη κατανεμημένων WSN που αποσκοπούν στην ανίχνευση στόχων και παρατήρηση πεδίων μαχών. Η διάρκεια λειτουργίας του *VigilNet* βελτιστοποιείται με χρήση ιεραρχικών πρωτοκόλλων συναθροίσεως δεδομένων (data aggregation). Επίσης, ορίζονται δύο τύποι κόμβων, οι *φρουροί* (sentries) και οι απλοί κόμβοι: όταν κάποιος κόμβος ανιχνεύσει περιστατικό άξιο αναφοράς, το αναφέρει στον πλησιέστερο φρουρό του, ο οποίος επεξεργάζεται, συναθροίζει και δρομολογεί κατάλληλα τη συλλεγόμενη πληροφορία. Εκτός της επεξεργασίας, συναθροίσεως και δρομολόγησης των πακέτων πληροφορίας που αποστέλλονται από τους κόμβους, οι φρουροί είναι επίσης υπεύθυνοι για την ομαδοποίηση των κόμβων για την καλύτερη αντιμετώπιση εκτάκτων καταστάσεων.

Εκτός των ανωτέρω στρατιωτικών εφαρμογών πολλές άλλες ακόμα έχουν προταθεί [37, 38], αναγνωρίζοντας τη δυναμική των WSN στις εφαρμογές εθνικής ασφάλειας.

2.4.2 Εφαρμογές περιβαλλοντικής προστασίας

Τα WSN έχουν με επιτυχία χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές προστασίας περιβάλλοντος και παρατήρησης της άγριας ζωής. Οι συνηθέστερες σχετικές χρήσεις των WSN περιλαμβάνουν την παρακολούθηση χλωρίδας και πανίδας απομακρυσμένων περιοχών, την εποπτεία εδαφών και υδάτων για γεωργικούς λόγους, την παρακολούθηση θαλάσσιας ζωής, την αξιολόγηση καιρικών φαινομένων, την πρόληψη φυσικών καταστροφών κ.α.

Η παρακολούθηση του νησιού Great Duck των Η.Π.Α. είναι μία από τις πλέον αντιπροσωπευτικές περιβαλλοντικές χρήσεις των WSN [39, 40]. Το νησί αυτό αποτελεί εδώ και χρόνια αντικείμενο μελέτης πολλών ορνιθολόγων λόγω της αφθονίας του σε πολλά είδη θαλάσσιων πτηνών [41]. Η παρατήρηση του πλήθους και της συμπεριφοράς των πτηνών καθώς και η καταγραφή των καιρικών φαινομένων στο νησί πραγματοποιούνται με τη βοήθεια ενός WSN που ανέπτυξαν από κοινού το College of Atlantic και το Intel Research Laboratory του πανεπιστημίου Berkeley το 2002. Το συγκεκριμένο WSN είναι ιεραρχικό: το ένα επίπεδο ιεραρχίας περιλαμβάνει τους WS του δικτύου ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει ένα σύνολο δικτυακών πυλών που είναι υπεύθυνες τόσο για την επικοινωνιακή συνεκτικότητα του WSN όσο και για τη διασύνδεση του κυρίως WSN με τον κεντρικό σταθμό συλλογής πληροφοριών. Ο τελευταίος αποστέλλει τις συλλεγόμενες πληροφορίες μέσω διαδικτύου σε κέντρα ελέγχου εκτός του νησιού. Οι μετρήσεις γίνονται από τους WS του πρώτου επιπέδου και είναι δύο τύπων: αυτές που ασχολούνται με την ύπαρξη των πτηνών στο νησί, ελέγχοντας με κατάλληλους αισθητήρες τις φωλιές τους, και αυτές που πραγματοποιούν μετεωρολογικές μετρήσεις.

Το ZebraNet [42] αποτελεί ένα άλλο παράδειγμα επιτυχημένης εφαρμογής των WSN για περιβαλλοντικούς σκοπούς καθώς αναπτύχθηκε για την παρακολούθηση τη συμπεριφοράς άγριων ζώων στο φυσικό τους περιβάλλον. Συγκεκριμένα, μελετώνται τα πρότυπα κινητικότητας δύο ειδών ζεβρών, η μεταξύ τους αλληλεπίδραση καθώς και η επίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας στη συμπεριφορά τους. Οι ζέβρες που παρακολουθούνται φέρουν περιλαίμιο (WS) εξοπλισμένο με μια συσκευή GPS, ένα μικροεπεξεργαστή, δύο κεραίες για αποστολή και λήψη δεδομένων (μία μικρής εμβέλειας και μια μεγάλης), μια συστοιχία μπαταριών και ένα πλαίσιο ηλιακών φορτιστών. Η θέση των ζεβρών καταγράφεται σε τακτικά χρονικά διαστήματα και η σχετική πληροφορία αναφέρεται σε ένα κεντρικό σταθμό, όταν οι ζέβρες βρίσκονται κοντά σε αυτόν. Καθώς το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών επισκέψεων του σταθμού από τις ζέβρες μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλο, το ZebraNet υλοποιεί μία διαδικασία ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των WS των ζεβρών και των γειτόνων αυτών. Κατ' αυτό τον τρόπο, όταν μία ζέβρα βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης αναφέρει πληροφορίες τοποθεσίας όχι μόνο για την ίδια αλλά και για άλλες ζέβρες: στην ουσία, το ZebraNet συνδυάζει τη λειτουργία των WSN με αυτή των δικτύων με ανοχή στην καθυστέρηση (Delay Tolerant Networks, DTN), χρησιμοποιώντας σχετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης και συνάθροισης δεδομένων. Το ZebraNet επηρέασε σημαντικά την έρευνα περί τη δια-

τύπωση μαθηματικών υποδειγμάτων κινητικότητας, δρομολόγησης σε DTN, ενώ ανέδειξε νέα προβλήματα στη μέχρι τότε σχεδίαση των WSN [43, 44].

Το WSN του νησιού Great Duck και το ZebraNet είναι τα πλέον χαρακτηριστικά της χρήσης των WSN για περιβαλλοντικούς σκοπούς. Εντούτοις, υπάρχουν πολλές ακόμα σχετικές εφαρμογές. Ενδεικτικά, στο κράτος του Ισημερινού την περίοδο 2004–2005 υλοποιήθηκαν δύο WSN που μελετούσαν την ηφαιστειακή δραστηριότητα των ηφαιστείων Volcán Tangurahua και Volcán Reventador [45]. Επιπλέον, στην παραπομπή [46] μελετάται η εφαρμογή των WSN στην ανίχνευση πλημμυρίδων η οποία εφαρμόστηκε με επιτυχία τόσο στις Η.Π.Α (Blue River, Oklahoma) όσο και στις Ονδούρες.

Η χρήση των WSN για περιβαλλοντικούς σκοπούς αποτελεί μία από τις πλέον αναγνωρίσιμες χρήσεις τους, κάτι που αποδεικνύεται από την πληθώρα έργων που ασχολούνται με τη μελέτη και ανάπτυξη σχετικών εφαρμογών όπως το SCIER [47], EU-FIRE [48], καθώς και από τη διατήρηση του σχετικού ενδιαφέροντος μέσω της δημοσίευσης ολοένα και περισσότερων σχετικών έργων σχετικά με την παρακολούθηση υδάτων, την παρατήρηση της κλιματικής αλλαγής κ.α. [49–51].

2.4.3 Εφαρμογές υγείας

Τα WSN έχουν υλοποιηθεί με επιτυχία σε πολυάριθμες εφαρμογές υγείας. Η δυνατότητα διαρκούς παρακολούθησης σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος των κόμβων καθιστά τα WSN ιδανικά για παρακολούθηση ασθενών, διαχείριση φαρμακευτικών αγωγών σε νοσοκομεία, ανίχνευση θέσης ασθενών και ιατρών σε νοσοκομεία ή τη δημιουργία τεχνητών μελών του σώματος.

Η αντιπροσωπευτικότερη εφαρμογή των WSN σε υπηρεσίες υγείας είναι η απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών. Το έργο CodeBlue του πανεπιστημίου Harvard [52, 53] υλοποιεί ένα ευρύ WSN που αποτελείται από φορητούς WS, έκαστος των οποίων είναι εφοδιασμένος, εκτός των άλλων, με ένα παλμικό οξύμετρο, ένα ηλεκτροκαρδιογράφο και ένα ηλεκτρομυογράφο. Τα ιατρικά όργανα λαμβάνουν περιοδικά μετρήσεις από τους ασθενείς που φέρουν τους WS και τις αποστέλλουν σε κάποιο κεντρικό σταθμό εντός του νοσοκομείου. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις αυτές παραδίδονται στους αντίστοιχους ιατρούς. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η διαρκής παρακολούθηση και καταγραφή του ιατρικού ιστορικού των ασθενών. Επιπλέον, η δυνατότητα απευθείας αποστολής προσωπικών μηνυμάτων στους αισθητήρες των ασθενών από τους ιατρούς τους καθιστά εφικτή την άμεση αντίδραση τόσο του ιατρικού προσωπικού όσο και του ασθενούς σε έκτακτες περιπτώσεις. Το CodeBlue προδιαγράφει τη λειτουργία ενός πλήρως αυτόνομου WSN, όπου η ενσωμάτωση νέων αισθητήρων, η αναγνώριση της θέσης τους και η ρύθμιση της συμπεριφοράς τους σχετικά με την αναγνώριση έκτακτων καταστάσεων γίνονται χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης.

Σε αντίθεση με το CodeBlue το οποίο προορίζεται για χρήση εντός νοσοκομειακών μο-

νάδων, το AlarmNet επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών και ηλικιωμένων εντός του προσωπικού τους χώρου μέσω τεχνικών οικιακής παρακολούθησης [54, 55]. Συγκεκριμένα, το AlarmNet προδιαγράφει ένα ιεραρχικό WSN το οποίο λαμβάνει περιβαλλοντικές μετρήσεις καθώς και μετρήσεις σχετικές με τη φυσιολογία των υπό παρακολούθηση ατόμων. Ένα WSN, που μεταφέρεται από τους στόχους παρακολούθησης λαμβάνει μετρήσεις σχετικές με τη φυσιολογική (ιατρική) κατάστασή τους. Επιπλέον, ένα στατικό WSN, που τοποθετείται στον περιβάλλοντα χώρο των ασθενών/ηλικιωμένων, λαμβάνει μετρήσεις σχετικά με τη θερμοκρασία, τα ποσοστά υγρασίας, τη σύσταση του αέρα καθώς και την ένταση του φωτός στον περιβάλλοντα χώρο. Τα δεδομένα αυτά αποστέλλονται με τη βοήθεια κατάλληλων πυλών διαδικτύου στους ιατρούς που είναι υπεύθυνοι για την παρατήρηση των υπό παρακολούθηση ατόμων, καθιστώντας εφικτή την καταγραφή του ιστορικού των ασθενών καθώς και την άμεση παρέμβαση των ιατρών, εφόσον αυτή χρειάζεται.

2.4.4 Εφαρμογές βιομηχανικής παραγωγής

Η εφαρμογή των WSN στην οργάνωση και επίβλεψη της βιομηχανικής παραγωγής ήταν μία από τις πρώτες χρήσεις των WSN. Η χρήση αισθητήρων στη βιομηχανική παραγωγική διαδικασία δεν είναι νέα. Στην πραγματικότητα, ενσύρματοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια στο πλαίσιο της αυτοματοποίησης του ελέγχου της παραγωγής. Εντούτοις, το κόστος συντήρησης, επέκτασης ή αναβάθμισης των ενσύρματων δικτύων αισθητήρων είναι συχνά απαγορευτικό. Η ανάπτυξη του προτύπου WirelessHART ως επέκταση του παραδοσιακού ενσύρματου HART (βλ. εδάφιο 2.3.3) επιβεβαιώνει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας για την αξιοποίηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων των WSN.

Μία από τις συνηθέστερες χρήσεις των WSN στη βιομηχανική παραγωγή είναι η επίβλεψη της κατάστασης του εξοπλισμού παραγωγής μέσω της ανάλυσης των δονήσεών του. Το υπόδειγμα δόνησης κάθε μηχανήματος είναι συγκεκριμένο όταν λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες και διαφέρει από το αντίστοιχο στην περίπτωση όπου δυσλειτουργεί [56, 57]. Το FabApp αποτελεί μια εφαρμογή προληπτικής συντήρησης για προστασία βιομηχανικού εξοπλισμού το οποίο βασίζεται στη θεωρία ανάλυσης δονήσεων [58–60] και αναλύεται αρχιτεκτονικά σε μια ιεραρχία τριών επιπέδων, η οποία είναι παρόμοια με αυτή του WirelessHART. Το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει τους WS που συνθέτουν το κυρίως δίκτυο παρατήρησης. Έκαστος των WS είναι εφοδιασμένος εκτός των άλλων με ένα επιταχυνσιόμετρο το οποίο χρησιμεύει για την ανίχνευση δονήσεων. Το δεύτερο επίπεδο αποτελείται από ένα σύνολο πυλών διαδικτύου. Ο ρόλος αυτών των συσκευών είναι πολλαπλός καθώς είναι επιφορτισμένες με: (1) την οργάνωση των κόμβων σε ομάδες, (2) τον καθορισμό της μετρητικής τους λειτουργίας, (3) τη συλλογή των πληροφοριών που αποστέλλονται από τους κόμβους, και (4) την προώθηση της συλλεγμένης πληροφορίας στο δίκτυο ελέγχου της βιομηχανικής παραγωγής, το οποίο αποτελεί και το τρίτο επίπεδο ιεραρχίας. Η ιεραρχική δομή λειτουργίας

του FabApp και η αυξημένη ευφυΐα που ενσωματώνεται στις πύλες δικτύου επιτρέπουν την αποτελεσματική επίβλεψη της παραγωγής μέσω της αμφίδρομης επικοινωνίας του μετρητικού και του ελεγκτικού τμήματος του WSN και αποτελεί μία από τις πλέον χαρακτηριστικές πρακτικές εφαρμογές των WSN στην επίβλεψη βιομηχανικής παραγωγής. Μάλιστα, η αρχιτεκτονική του FabApp χρησιμοποιείται και σε WSN που έχουν ως αντικείμενο την επιθεώρηση της κατάστασης κτιριακών εγκαταστάσεων [61, 62].

Τα WSN χρησιμοποιούνται, επίσης, στην επίβλεψη κατασκευών όπου η ανθρώπινη παρουσία μπορεί να είναι επικίνδυνη, όπως η παρακολούθηση της κατάστασης πυρηνικών αντιδραστήρων [63]. Επίσης, η επίβλεψη της παραγωγικής διαδικασίας αποτελεί αντικείμενο εφαρμογής των WSN. Ενδεικτικά, στις παραπομπές [64–67] αναλύονται μέθοδοι παρακολούθησης της παραγωγικής διαδικασίας γεωργικών προϊόντων στα περισσότερα στάδια της παραγωγής, από την καλλιέργεια μέχρι την τελική διάθεση των προϊόντων.

Καταλήγοντας, οι δυνατές εφαρμογές των WSN είναι πολλές και σε πολλούς τομείς ενδιαφέροντος. Μάλιστα, λόγω της συνεχούς έρευνας βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους και της ολοκληρωμένης ανάπτυξης σχετικών προτύπων, οι χρήσεις των WSN αναμένονται να πληθύνουν ακόμα περισσότερο, καθιστώντας τα βασικά συστατικά στοιχεία των δικτύων επόμενης γενιάς (Next Generation Networks, NGN).

2.5 Τεχνικές βελτιστοποίησης των WSN

Καθώς η λειτουργία των WSN στα στρώματα PHY και MAC προτυποποιήθηκε άμεσα μέσω του IEEE 802.15.4, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στράφηκε προς τη βελτιστοποίηση των υπολοίπων στρωμάτων της στοίβας πρωτοκόλλων της δικτυακής λειτουργίας των WSN, δηλαδή των στρωμάτων δικτύου, μεταφοράς και εφαρμογής. Αντίστοιχα προς το στόχο βελτιστοποίησης, οι τεχνικές βελτιστοποίησης που έχουν κατά κύριο λόγο προταθεί μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες, πραγματοποιώντας δρομολόγηση ή συνάθροιση δεδομένων, διαχείριση πόρων ή ομαδοποίηση κόμβων. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής ενδιαφέρον παρουσιάζουν, κατά κύριο λόγο, η ομαδοποίηση κόμβων και, δευτερευόντως, η συνάθροιση δεδομένων. Προς τούτο, η δρομολόγηση δεδομένων και η διαχείριση πόρων παρουσιάζονται συνοπτικά, για λόγους πληρότητας.

2.5.1 Δρομολόγηση

Η δρομολόγηση της πληροφορίας που παράγεται κατά καταναμημένο τρόπο στο πλαίσιο λειτουργίας ενός γενικού ad-hoc δικτύου έχει αποτελέσει σημαντικό αντικείμενο έρευνας. Για τη βελτιστοποίησή της έχουν διατυπωθεί πολλές τεχνικές [68–70]. Η καταναμημένη ad-hoc λειτουργία των WSN επιτρέπει την καταρχήν εφαρμογή σε αυτά των τεχνικών που παρουσιάζονται στις προαναφερθείσες παραπομπές. Εντούτοις, η ανάγκη ελαχιστοποίησης της

κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων δεν επιτρέπει τη χωρίς όρους ή διαφοροποίηση εφαρμογή τους. Λόγω της αλλαγής του βασικού στόχου βελτιστοποίησης, η δρομολόγηση των πακέτων πληροφορίας σε WSN έχει μελετηθεί ιδιαίτερα. Στις παραπομπές [71–74] συνοψίζονται οι σημαντικότερες προτάσεις βελτιστοποίησης της δρομολόγησης πακέτων σε WSN.

Αντίστοιχα προς τη δικτυακή δομή που επιδιώκεται, έχουν προταθεί τρεις βασικές κατηγορίες αλγορίθμων δρομολόγησης. Συγκεκριμένα, ορίζονται αλγόριθμοι επίπεδοι (flat network routing), ιεραρχικοί (hierarchical network routing) ή βασισμένοι στη θέση των κόμβων (location-based routing). Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση καθορίζει τη συμπεριφορά των κόμβων ως προς τις αποφάσεις που καλούνται να λάβουν κατά τη δρομολόγηση. Έτσι υπάρχουν αλγόριθμοι βασισμένοι στη διαπραγμάτευση μεταξύ των κόμβων, στη διατήρηση ενός επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS), στην ισορροπημένη κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας κ.α. Χρησιμοποιούνται συχνά τεχνικές βασισμένες σε βιολογικά [75] ή φυσικά φαινόμενα [76], αποσκοπώντας στη μίμηση φυσικών διαδικασιών για την ανάπτυξη δυναμικών πρωτοκόλλων. Τέλος, συχνή είναι και η ανάπτυξη αλγορίθμων δρομολόγησης που προσπαθούν να διαχειρισθούν κατάλληλα τη βελτιστοποίηση μέτρων αξιολόγησης (metrics) με αντικρουόμενα χαρακτηριστικά, όπως συμβαίνει, για παράδειγμα, με την καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στο WSN [77].

2.5.2 Κατανομή πόρων

Δεδομένης της ανάγκης για ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, η αποτελεσματική κατανομή πόρων είναι σημαντική στην προσπάθεια μεγιστοποίησης της διάρκειας λειτουργίας των WSN. Αντίστοιχα προς τον εκάστοτε στόχο κατανομής, οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων στα WSN ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες. Συγκεκριμένα, μελετάται συνήθως η κατανομή ή της ενέργειας των κόμβων [78] ή του διαθέσιμου εύρους ζώνης [79] ή και των δύο ταυτόχρονα [80]. Μάλιστα οι συγγραφείς της [80] προτείνουν ένα δυναμικό μηχανισμό διαχείρισης του ρυθμού μετάδοσης των κόμβων ενός WSN αποσκοπώντας στη δίκαιη κατανομή του συνολικού εύρους ζώνης ενός WSN, καταλήγοντας ότι η εξασφάλιση ίσης μεταχείρισης των κόμβων στο πλαίσιο ενός σχήματος κατανομής πόρων αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα σχεδίασης: μία κατανομή πόρων αφορά την κατάλληλη διαχείριση του συμβιβασμού μεταξύ της δικαιοσύνης και κάποιου άλλου παράγοντα βελτιστοποίησης. Η σημασία της εξασφάλισης δικαιοσύνης τονίζεται και στην εργασία [81], όπου τεκμηριώνεται ότι η δίκαιη μεταχείριση μεταξύ των κόμβων του δικτύου έρχεται σε μερική αντίθεση με την ανάγκη ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας στο WSN: η εξασφάλιση δικαιοσύνης επιτυγχάνει ομαλότερη λειτουργία ενώ η έλλειψη αυτής επιτυγχάνει μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας. Αντίστοιχα προς την εργασία που παρουσιάζεται στην παραπομπή [80], οι συγγραφείς της [82] βελτιστοποιούν, επίσης, την από κοινού κατανομή της ενέργειας και του

εύρους ζώνης των κόμβων με τη δημιουργία μιας εικονικής αγοράς αγαθών, αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας του WSN με αυτόνομο τρόπο.

2.5.3 Συνάθροιση και σύντηξη δεδομένων

Καθώς η χρήση των τηλεπικοινωνιακών τους διεπαφών αποτελεί τη βασικότερη πηγή κατανάλωσης της ενέργειας των κόμβων ενός WSN, η *συνάθροιση* (aggregation) και η *σύντηξη* (fusion) δεδομένων χρησιμοποιούνται συχνά για τον περιορισμό του όγκου της πληροφορίας που διακινείται μεταξύ των κόμβων. Η συνάθροιση δεδομένων αφορά την εφαρμογή απλών συναρτήσεων συνάθροισης (μέγιστο, ελάχιστο, μέση τιμή, τυπική απόκλιση κ.τ.λ.) επί ενός συνόλου δεδομένων με σκοπό την εξαγωγή ενός άλλου συνόλου δεδομένων το οποίο προκύπτει από το αρχικό μετά από αφαίρεση της πλεονασματικής πληροφορίας. Είναι φανερό ότι η συνάθροιση δεδομένων περιλαμβάνει διαδικασίες οι οποίες συχνά συνεπάγονται απώλεια πληροφορίας (lossy), δηλαδή μετά την εφαρμογή της συνάθροισης, η αρχική πληροφορία δεν είναι δυνατόν να ανακτηθεί με ακρίβεια. Σε αντίθεση με τη συνάθροιση δεδομένων η σύντηξη δεδομένων αναφέρεται στην κατάλληλη επεξεργασία ενός συνόλου δεδομένων με σκοπό την αύξηση του σημασιολογικού περιεχομένου τους. Πολλές φορές η συνάθροιση και η σύντηξη δεδομένων συνδυάζονται για τη δημιουργία σχημάτων *σύντηξης πληροφορίας* που συνδυάζουν την απλότητα που προσφέρει η συνάθροιση δεδομένων με τη σημασιολογική επεξεργασία που παρέχεται από τη σύντηξη δεδομένων [83, 84]. Στη συνέχεια, οι έννοιες της συνάθροισης και σύντηξης δεδομένων θα χρησιμοποιούνται αδιακρίτως, στο πλαίσιο ορισμού συνολικών σχημάτων σύντηξης πληροφοριών.

Η σημασία των τεχνικών συνάθροισης έγινε αμέσως αντιληπτή από την επιστημονική κοινότητα και η εφαρμογή τους μελετήθηκε αρχικά στο πλαίσιο ανάπτυξης αποτελεσματικότερων αλγορίθμων δρομολόγησης, όπως π.χ. το Directed Diffusion [85]. Η επίδραση της εφαρμογής μεθόδων συνάθροισης δεδομένων στη διάρκεια λειτουργίας των WSN αναλύεται στην παραπομπή [86]. Συγκεκριμένα, στην [86] υποστηρίζεται ότι ο εμπλουτισμός της λειτουργίας των κόμβων των WSN με κατάλληλες τεχνικές συνάθροισης πληροφορίας αυξάνει σημαντικά τη διάρκεια λειτουργίας του WSN αλλά, παράλληλα, αυξάνει τη συνολική καθυστέρηση που χαρακτηρίζει τη διάδοση πληροφορίας. Η επίδραση των τεχνικών συνάθροισης στην επίδοση των WSN μελετάται επίσης στην παραπομπή [87] όπου οι συγγραφείς μελετούν πλήθος σχημάτων συνάθροισης, εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των WSN που επηρεάζονται από την εφαρμογή τους. Εκτός από τη διάρκεια λειτουργίας ενός WSN και την καθυστέρηση στη διάδοση της πληροφορίας, θεμελιώνεται η μείωση της ακρίβειας της πληροφορίας. Επίσης, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα προβλήματα ασφάλειας ή/και ιδιωτικότητας που ανακύπτουν κατά την επεξεργασία δεδομένων για την εφαρμογή της συνάθροισης. Το πρόβλημα της ασφάλειας των δεδομένων κατά τη συνάθροιση εξετάζεται αναλυτικά στην παραπομπή [88] όπου προτείνεται ένα σχήμα διατήρησης της ιδιωτικότητας βασισμένο στις

αρχές της ομομορφικής κρυπτογράφησης δημοσίου κλειδιού [89]. Το πρόβλημα του αποτελεσματικού συμβιβασμού μεταξύ της ανάγκης για ιδιωτικότητα και ασφάλεια της πληροφορίας των κόμβων και της απαραίτητης υπολογιστικής ισχύος για την επίτευξη των στόχων αυτών μελετάται επίσης στην [90], όπου οι συγγραφείς επιτυγχάνουν αποτελεσματική και ασφαλή συνάθροιση δεδομένων με τη βοήθεια σχημάτων ομαδοποίησης κόμβων.

Οι συγγραφείς της [91] εξετάζουν την εφαρμογή συνάθροισης σε WSN επιδιώκοντας (i) την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, (ii) τη μεγιστοποίηση της σημασιολογικής πληροφορίας που χαρακτηρίζουν τα συλλεγόμενα δεδομένα, και, (iii) την εξασφάλιση δίκαιης μεταχείρισης των κόμβων, με κριτήριο την ενεργειακή τους κατανάλωση. Καθώς η μεγιστοποίηση της πληροφορίας που συνοδεύει τα συλλεγόμενα δεδομένα συνεπάγεται την αντίστοιχη μεγιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, προτείνονται δύο προσεγγίσεις για τη διαχείριση των αντιτιθέμενων (i) και (ii). Κατά την πρώτη προσέγγιση, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της σημασιολογικής πληροφορίας των συλλεγόμενων δεδομένων υπό περιορισμούς ως προς τη μέγιστη κατανάλωση ενέργειας. Η δεύτερη προσέγγιση εξετάζει την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης για τη συλλογή των δεδομένων υπό περιορισμούς ως προς την ελάχιστη σημασιολογική πληροφορία των δεδομένων. Μάλιστα, αποδεικνύεται ότι οι δύο προσεγγίσεις είναι ουσιαστικά δυϊκές καθώς η μία μπορεί να προκύψει μέσω της άλλης. Εντούτοις, η δεύτερη είναι απλούστερη υπολογιστικά και είναι κατάλληλη για εφαρμογή στα WSN, τα οποία εμφανίζουν εγγενείς περιορισμούς ως προς την υπολογιστική ισχύ των κόμβων που τα απαρτίζουν. Ως προς με την ανάγκη ισότιμης ενεργειακής μεταχείρισης των κόμβων, οι συγγραφείς καταλήγουν ότι η εφαρμογή των σχετικών περιορισμών στα πλαίσια των δύο ανωτέρω προσεγγίσεων είναι χωρίς αντίκρουσμα καθώς, στην προσπάθεια βελτιστοποίησης της ατομικής τους λειτουργίας, οι κόμβοι λειτουργούν τελικά με τρόπο που εξασφαλίζει την ομοιομορφία της ενεργειακής κατανάλωσης των ιδίων και των γειτόνων τους.

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα σχήματα συνάθροισης πληροφορίας που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία δίδονται στις επισκοπήσεις [92–94].

2.5.4 Ομαδοποίηση κόμβων

Η συνάθροιση πληροφοριών συχνά συνοδεύεται από την εφαρμογή τεχνικών ομαδοποίησης κόμβων (node clustering), οι οποίες αναφέρονται στον καθορισμό ομοιόμορφης συμπεριφοράς για ομάδες κόμβων που μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά [95]. Στο πλαίσιο της ομαδοποιημένης τους συμπεριφοράς, οι κόμβοι δρουν συνεργατικά με τους υπόλοιπους κόμβους-μέλη της ομάδας τους, επιδιώκοντας κατ' αυτό τον τρόπο τη μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας τους. Η αξία της συνεργασίας μεταξύ των κόμβων υπογραμμίζεται στην [96], όπου διερευνώνται αναλυτικά οι περιπτώσεις στις οποίες η συνεργασία μεταξύ των κόμβων ενός WSN έχει θετικό ή αρνητικό αντίκτυπο για τη λειτουργία του. Μάλιστα,

οι συγγραφείς της [96] καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι σε πρακτικές εφαρμογές WSN, η συνεργασία μεταξύ των κόμβων βελτιώνει τη λειτουργία τους. Αντίστοιχα προς το εκάστοτε κριτήριο δημιουργίας ομάδων κόμβων, τα οφέλη από την εφαρμογή της ομαδοποίησης προέρχονται από διαφορετικές λειτουργικές δραστηριότητες των κόμβων των WSN, όπως η δρομολόγηση ή η κατανομή πόρων. Σε κάθε περίπτωση, η βέλτιστη διαμέριση (partitioning) ενός WSN σε ομάδες κόμβων είναι υπολογιστικά δύσκολη ακόμα και σε WSN που αποτελούνται από μικρό αριθμό κόμβων [97]. Λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή υπολογιστική δυνατότητα των WSN κόμβων καθώς και την ανάγκη κατανεμημένης λειτουργίας, είναι επιτακτική η ανάπτυξη σχημάτων ομαδοποίησης που είναι (i) κατανεμημένα, (ii) υπολογιστικά απλά, (iii) προσαρμοστικά.

Ένα από τα πρώτα σχήματα ομαδοποίησης κόμβων υπήρξε το *LEACH* (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [98]. Στην [98] προτείνεται ένα σχήμα ομαδοποίησης κόμβων που αποσκοπεί στην υποβοήθηση της διαδικασίας συνάθροισης δεδομένων σε WSN. Η αρχιτεκτονική ομαδοποίησης που ακολουθείται από το LEACH βασίζεται στον προσδιορισμό κατάλληλων επικεφαλής κόμβων (cluster heads, CH) οι οποίοι καθορίζουν τις ομάδες κόμβων του WSN. Η επιλογή των CH γίνεται πιθανοτικά: η πιθανότητα επιλογής ενός κόμβου ως CH εξαρτάται από τη διαθέσιμη ενέργειά του. Ο σχηματισμός των ομάδων προκύπτει βάσει της επιλογής των CH, οι οποίοι αποστέλλουν σύντομα μηνύματα που πληροφορούν τις γειτονιές τους για την παρουσία τους. Οι κόμβοι επιλέγουν τον πλησιέστερο σε αυτούς CH και αποστέλλουν σε αυτόν τα δεδομένα τους με βάση ένα πλαίσιο χρονοπρογραμματισμού που δημιουργείται από τον εκάστοτε CH. Τα συλλεγόμενα δεδομένα συναθροίζονται από τους CH και στη συνέχεια αποστέλλονται στους κόμβους συγκέντρωσης του WSN. Επίσης, το LEACH διαθέτει μηχανισμούς προσαρμογής στις αλλαγές του περιβάλλοντος του WSN. Εντούτοις, οι μηχανισμοί αυτοί λειτουργούν επιβαρυντικά όταν κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός WSN οι αλλαγές του περιβάλλοντος είναι ταχείες. Τότε, ο αριθμός μηνυμάτων που απαιτούνται για την προσαρμογή της διαμέρισης του WSN αυξάνει δραματικά. Αν και το LEACH αποτελεί μία από τις πρώτες προσπάθειες διατύπωσης ενός σχήματος ομαδοποίησης, λειτουργεί ακόμα και σήμερα ως πρότυπο αρχιτεκτονικής ομαδοποίησης, λόγω της απλότητας λειτουργίας του, της κατανεμημένης φύσης του και της προσαρμοστικότητάς του.

Όπως το LEACH, έτσι και το *HEED* (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering) προτείνει το σχηματισμό ομάδων μέσω του προσδιορισμού κατάλληλων CH [99]. Η (κατανεμημένη) επιλογή των CH βασίζεται τόσο στη διαθέσιμη ενέργεια των κόμβων, όσο και σε άλλα δευτερεύοντα κριτήρια όπως είναι ο βαθμός των κόμβων ή η μέση απόσταση από τους γείτονές τους. Η προσαρμοστικότητα του HEED εξασφαλίζεται μέσω μίας περιοδικής διαδικασίας επανεπιλογής CH. Ο σκοπός του HEED είναι η μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας των WSN μέσω του σχηματισμού ομάδων παρόμοιου μεγέθους και εκ των υστέρων εφαρμογής τεχνικών συνάθροισης από τους CH. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα οφέλη των κόμβων από την ομαδοποίηση είναι ισομερώς κατανεμημένα, οδηγώντας σε ομοιόμορφη κα-

τανάλωση ενέργειας. Το HEED ολοκληρώνει τη διαδικασία προσδιορισμού των ομάδων σε $O(1)$ επαναλήψεις χωρίς την ανάγκη αποστολής μεγάλου αριθμού μηνυμάτων. Εντούτοις, η τυχαιότητα που υπάρχει στον τρόπο προσδιορισμού των CH μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστες λύσεις.

Σε αντίθεση με τα ανωτέρω σχήματα που επιδιώκουν το σχηματισμό ομάδων παρόμοιου μεγέθους (balanced clustering), οι συγγραφείς της [100] προτείνουν ένα σχήμα ομαδοποίησης που αποσκοπεί στο σχηματισμό ομάδων μεταβλητού μεγέθους. Σύμφωνα με την [100], οι κόμβοι που βρίσκονται πλησιέστερα προς τον κόμβο συγκέντρωσης διακινούν μεγαλύτερο πλήθος πακέτων πληροφορίας σε σχέση με κόμβους που απέχουν περισσότερο, λόγω της σύγκλισης των διαδρομών δρομολόγησης από τους κόμβους μετρήσεων προς τον κόμβο συγκέντρωσης. Προς τούτο, προτείνεται ένα σχήμα ομαδοποίησης το οποίο οδηγεί στο σχηματισμό ομάδων κόμβων ευρύτερων περί τον κόμβο συγκέντρωσης και μικρότερων προς τα γεωγραφικά άκρα του WSN. Η άνιση μεταχείριση των κόμβων σε όρους κατανομής της συνεργατικής αξίας (δύο κόμβοι που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες απολαμβάνουν διαφορετικά συνεργατικά κέρδη) καταδεικνύει ότι το πόσο δίκαιη είναι η δίκαιη μεταχείριση των κόμβων στο πλαίσιο λειτουργίας ενός WSN μπορεί να διερευνηθεί υπό διαφορετικές θεωρήσεις, οδηγώντας, κάθε φορά, σε διαφορετικές βέλτιστες λύσεις.

Τα προαναφερθέντα σχήματα (LEACH και HEED) είναι από τα πλέον διαδεδομένα σχήματα ομαδοποίησης κόμβων που αποσκοπούν στην υποβοήθηση σχημάτων συνάθροισης δεδομένων σε WSN. Εντούτοις, κατά το σχηματισμό των ομάδων δεν λαμβάνεται υπόψη η ενδεχόμενη ύπαρξη χωρικής συσχέτισης των μετρήσεων που λαμβάνουν οι κόμβοι. Η ύπαρξη χωρικής συσχέτισης στις μετρήσεις των κόμβων αναφέρεται μεταξύ άλλων στη δυνατότητα πρόβλεψης ή προσέγγισης των μετρήσεων μιας ομάδας κόμβων με βάση τις μετρήσεις μιας άλλης ομάδας. Αντίστοιχα, η ύπαρξη χρονικής συσχέτισης αναφέρεται στη δυνατότητα αξιοπιστής πρόβλεψης των μελλοντικών μετρήσεων ενός κόμβου με βάση το ιστορικό των μετρήσεών του (βλ. Κεφ. 4 για λεπτομέρειες και συζήτηση). Η δυνατότητα χωρικής συσχέτισης ή χρονικής πρόβλεψης μπορεί να αξιοποιηθεί για τη δημιουργία αποτελεσματικών σχημάτων ομαδοποίησης.

Το *PREMON* (PREdictive MONitoring) είναι ένα από τα πρώτα σχήματα ομαδοποίησης που εκμεταλλεύονται την ύπαρξη χωροχρονικής συσχέτισης στα υπό παρακολούθηση φυσικά φαινόμενα [101]. Σύμφωνα με τους συγγραφείς της [101], ένα στιγμιότυπο ενός WSN μπορεί απεικονισθεί ως εικόνα, όπου οι μετρήσεις των κόμβων του WSN αντιστοιχούν σε ένταση των εικονοστοιχείων (pixels). Καθώς η διαδικασία λήψης μετρήσεων μπορεί να περιγραφεί ως διαδοχή λήψης τέτοιων στιγμιότυπων, η μετρητική διαδικασία μπορεί να απεικονισθεί ως μια συνεχόμενη προβολή των αντίστοιχων εικόνων. Δεδομένης της αντιστοίχισης στιγμιότυπων του WSN με εικόνες, το *PREMON* προτείνει την εφαρμογή σχημάτων συμπίεσης πληροφορίας μέσω ομαδοποίησης και ακόλουθης συνάθροισης δεδομένων βάσει προβλέψεων με τρόπο αντίστοιχο της συμπίεσης MPEG. Καθώς δεν προδιαγράφεται συγκεκρι-

κριμένο σχήμα ομαδοποίησης, υποτίθεται η εφαρμογή ενός οποιουδήποτε τέτοιου σχήματος το οποίο ορίζει κόμβους CH. Οι CH συλλέγουν τις μετρήσεις των κόμβων της ομάδας τους και, στη συνέχεια, πραγματοποιούν *προβλέψεις* σχετικά με την εξέλιξη των μετρήσεων αυτών. Οι προβλέψεις αυτές αποστέλλονται στους κόμβους της ομάδας μαζί με σχετικά προγράμματα αποστολών, ένα για κάθε κόμβο. Το πρόγραμμα των αποστολών και οι προβλέψεις καθορίζονται με βάση τις αρχές συμπίεσης εικόνας και βίντεο του MPEG, η οποία στηρίζεται στην ομοιότητα μεταξύ των τιμών γειτονικών εικονοστοιχείων (μετρήσεων των κόμβων). Αντίστοιχα προς το πρόγραμμα που λαμβάνει, κάθε κόμβος εκτελεί τα μετρητικά του καθήκοντα. Αν κάποια μέτρησή του αποκλίνει την πρόβλεψη του CH, αποστέλλεται στον CH, αλλιώς καταπιέζεται.

Το *ELink* που παρουσιάζεται στην [102] είναι σχήμα ομαδοποίησης που αποσκοπεί στη διευκόλυνση της διαδικασίας συνάθροισης δεδομένων. Το ELink προτείνει ένα μηχανισμό που μπορεί να δημιουργήσει *ομάδες- δ* , δηλαδή ομάδες κόμβων στις οποίες η μέγιστη διαφορά μεταξύ των δεδομένων που συλλέγονται από οποιοδήποτε ζεύγος κόμβων που ανήκουν στην ίδια ομάδα δεν υπερβαίνει το δ . Ο περιορισμός αυτός ονομάζεται *κανόνας δ* . Η λογική του ELink είναι ότι δεδομένου ενός αρχικού υποσυνόλου κόμβων (κόμβοι-φρουροί, sentinels), η δημιουργία των ομάδων μπορεί να πραγματοποιηθεί εκκινώντας από τους κόμβους-φρουρούς, η θέση των οποίων είναι προκαθορισμένη. Η επέκταση των ομάδων γίνεται ακτινικά, εφόσον η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων ενός κόμβου-φρουρού και του υποψήφιου προς αποδοχή στην ομάδα κόμβου ικανοποιεί τον κανόνα δ . Η ολοκλήρωση της φάσης σηματοδότησης απαιτεί $O(\sqrt{N} \log N)$ χρονοσχισμές, όπου N το πλήθος των κόμβων του WSN, ενώ απαιτείται η ανταλλαγή $O(N)$ μηνυμάτων για την επίτευξη της τελικής δομής ομαδοποίησης. Κάθε κόμβος-φρουρός είναι υπεύθυνος για τη συνάθροιση των δεδομένων που αποστέλλουν οι κόμβοι της ομάδας τους καθώς και για την εξασφάλιση της ισχύος του κανόνα δ .

Θεωρώντας την αντιστοιχία ενός στιγμιότυπου ενός WSN με μία εικόνα ως σύνολο εικονοστοιχείων, όπως κάνει και το PREMON, το EEDC (Energy-Efficient Data Collection) επιδιώκει την εφαρμογή ομαδοποίησης κόμβων για την έμμεση επιβολή βέλτιστων τεχνικών συνάθροισης [103]. Ειδικότερα, το EEDC αποσκοπεί στη μείωση του χωροχρονικού ρυθμού συλλογής μετρήσεων από τους κόμβους, δηλαδή στη μείωση της χωροχρονικής πυκνότητας των αναφερόμενων μετρήσεων των κόμβων του WSN. Η μείωση αυτή στηρίζεται στην αξιοποίηση της υπάρχουσας χωροχρονικής συσχέτισης. Ορίζοντας κατάλληλα την έννοια της *διαφοροποίησης χρονοσειρών* ως χρονική εξέλιξη της διαφοροποίησης των μετρήσεων ζευγών κόμβων, το EEDC ομαδοποιεί τους κόμβους του WSN με κριτήριο την ελαχιστοποίηση αυτής της διαφοροποίησης χρονοσειρών. Εκτός των άλλων, προτείνεται ένα μοντέλο γραμμικής παρεμβολής για τον προσδιορισμό της χρονοσειράς που προσεγγίζει καλύτερα την εξέλιξη των μετρήσεων ενός κόμβου. Αρχικά, οι κόμβοι του WSN λαμβάνουν ικανοποιητικό αριθμό μετρήσεων και προσδιορίζουν την αντιπροσωπευτική τους χρονοσειρά με-

τρήσεων. Στη συνέχεια, κάθε κόμβος αποστέλλει τη χρονοσειρά μετρήσεων του στον κόμβο συγκέντρωσης του WSN. Ο τελευταίος, λαμβάνοντας υπόψη τις συγκεκριμένες χρονοσειρές μετρήσεων των κόμβων, επιδιώκει το διαμερισμό του WSN σε ομάδες, εντός των οποίων η διαφοροποίηση χρονοσειρών δεν υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Όπως είναι αναμενόμενο, η διαδικασία διαμερισμού του WSN επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του μεγέθους των ομάδων, προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη του WSN λόγω ομαδοποίησης των κόμβων. Τέλος, ο κόμβος συγκέντρωσης ενημερώνει τους κόμβους ως προς την ομάδα στην οποία ανήκει έκαστος, ενώ παρακολουθεί την εξέλιξη των αναφερόμενων μετρήσεων για να διαπιστώσει αν παραβιάζεται ο κανόνας της μέγιστης διαφοροποίησης χρονοσειρών μετρήσεων σε κάθε ομάδα κόμβων του WSN. Στο πλαίσιο της συνεργατικής του λειτουργίας, κάθε κόμβος αποστέλλει πληροφορίες που αντιπροσωπεύουν τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας του. Έτσι, αντί να αποστέλλουν όλοι οι κόμβοι τα δεδομένα τους στον κόμβο συγκέντρωσης, σε κάθε χρονοσχιση αναφοράς ένας κόμβος αναλαμβάνει την αντιπροσώπευση όλης της ομάδας. Το EEDC, στην αρχή λειτουργίας του οποίου βασίζεται εν μέρει το Κεφάλαιο 4, αυξάνει σημαντικά τη διάρκεια λειτουργίας του WSN, μέσω της εκμετάλλευσης της χωροχρονικής συσχέτισης των υπό παρακολούθηση φαινομένων.

Αντίστοιχα προς το EEDC, το *MCC* (Model-based Continuous Clustering) που παρουσιάζεται στην [104] προτείνει μία μέθοδο συνεχούς ομαδοποίησης κόμβων η οποία βασίζεται στον τοπικό προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υπό παρακολούθηση φυσικών φαινομένων από τους κόμβους του WSN. Κάνοντας χρήση γραμμικής παρεμβολής επί ιστορικών μετρήσεων του, κάθε κόμβος του WSN επιδιώκει να προβλέψει τις τιμές των μελλοντικών μετρήσεων του. Με βάση τις προβλέψεις των κόμβων, η διαμέριση του WSN σε ομάδες μεταβάλλεται διαρκώς ώστε κάθε στιγμή να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια των αναφερόμενων από τους κόμβους μετρήσεων. Η εγγενής προσαρμοστικότητα του *MCC* έρχεται, πάντως, σε αντίθεση με την ανάγκη μεγιστοποίησης της διάρκειας λειτουργίας του WSN, καθώς η διαρκής αλλαγή της δομής των ομάδων επιφέρει σημαντική αύξηση της τηλεπικοινωνιακής και κατά συνέπεια ενεργειακής επιβάρυνσης των κόμβων.

Η προσπάθεια βελτιστοποίησης της συνάθροισης δεδομένων με χρήση κατάλληλων σχημάτων ομαδοποίησης επιδιώκεται και στην [105]. Το προτεινόμενο σχήμα, *CAG* (Clustered AGgregation), ομαδοποιεί τους κόμβους του WSN στο οποίο εφαρμόζεται στο πλαίσιο της δημιουργίας του δένδρου δρομολόγησης (routing tree) από τους κόμβους του WSN στον κόμβο συγκέντρωσης. Συγκεκριμένα, το δένδρο δρομολόγησης εκκινεί από τον κόμβο συγκέντρωσης και επεκτείνεται ακτινικά, περικλείοντας σταδιακά τους κόμβους του WSN. Ο σχηματισμός του δένδρου δρομολόγησης πραγματοποιείται με βάση το *TAG* [106]. Ο κόμβος συγκέντρωσης ορίζεται αρχικά ως κόμβος CH, ορίζοντας μία ομάδα κόμβων, η οποία προς το παρόν περιλαμβάνει μόνο τον εαυτό του. Στη συνέχεια, προσκαλεί τους γείτονες κόμβους του να συμμετάσχουν στην ομάδα του, αποστέλλοντας και την τιμή μέτρησής του. Ένας κόμβος που λαμβάνει μια τέτοια πρόσκληση καταγράφει τον κόμβο-αποστολέα και την

αποδέχεται μόνο εφόσον η διαφορά μεταξύ της δικής του μέτρησης και της μέτρησης του κόμβου συγκέντρωσης είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Στην αντίθετη περίπτωση, ο κόμβος αυτο-ανακηρύσσεται CH και, λειτουργώντας όπως ο κόμβος συγκέντρωσης, προσκαλεί τους μη-ομαδοποιημένους του γείτονες να συμμετέχουν στην ομάδα του. Σε κάθε περίπτωση, οι κόμβοι καταγράφουν τους κόμβους που τους καλούν για συμμετοχή σε ομάδες, αποκτώντας κατ' αυτόν τον τρόπο επίγνωση του δένδρου δρομολόγησης. Με βάση τα ανωτέρω, ο διαμερισμός του WSN σε ομάδες πραγματοποιείται παράλληλα με τη δημιουργία του δένδρου δρομολόγησης. Κατά τη λειτουργία του δικτύου, κάθε CH συναθροίζει την πληροφορία που του αποστέλλουν οι κόμβοι-μέλη της ομάδας του (οι απόγονοί του στο δένδρο δρομολόγησης) και αποστέλλει μόνο μία, συναθροισμένη, τιμή στον κόμβο συγκέντρωσης, μειώνοντας το πλήθος των μηνυμάτων προς αποστολή και αυξάνοντας τη διάρκεια λειτουργίας του WSN.

Οι συγγραφείς της [107] προτείνουν το *TASC* (Topology Adaptive Spatial Clustering), ένα σχήμα ομαδοποίησης που αποσκοπεί στη δημιουργία ομάδων κόμβων ομοιόμορφης πυκνότητας. Καθώς η ανάπτυξη ενός WSN επί του πεδίου παρατήρησης είναι τυχαία, μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα κόμβων σε τοπικό επίπεδο. Το *TASC* προδιαγράφει ένα δυναμικό σχήμα αναγνώρισης τοπολογίας σε απόσταση δύο βημάτων από κάθε κόμβο, η οποία ονομάζεται *σχετική πυκνότητα* κόμβων. Η γνώση αυτή αξιοποιείται από τους κόμβους για καταναμημένο σχηματισμό ομάδων στο εσωτερικό των οποίων η σχετική πυκνότητα κόμβων είναι ομοιόμορφη. Παρά το γεγονός ότι η χωρική συσχέτιση των υπό παρακολούθηση φυσικών φαινομένων αξιοποιείται έμμεσα, το *TASC* αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα σχήματος χωρικής ομαδοποίησης.

Στην [108] παρουσιάζεται μία μέθοδος *ομαδοποίησης k βημάτων* η οποία σχηματίζει ομάδες κόμβων προκαθορισμένου μεγέθους. Η έννοια της ομαδοποίησης k -βημάτων αναφέρεται στο σχηματισμό αμοιβαίως αποκλειόμενων ομάδων των οποίων τα μέλη απέχουν το πολύ k βήματα από τους αντίστοιχους CH. Η μέθοδος που προτείνουν οι συγγραφείς της [108] επιλέγει τυχαία τους κόμβους CH κατά τρόπο καταναμημένο. Στη συνέχεια, οι κόμβοι του WSN ανταλλάσσουν σύντομα μηνύματα σε μια προσπάθεια να αποκτήσουν επίγνωση της γειτονιάς τους. Έπειτα, οι CH εκκινούν το σχηματισμό ομάδων βασιζόμενοι στον καθορισμό ελάχιστων συνδετικών δένδρων (*minimum spanning tree, MST*) k βημάτων, των οποίων οι κόμβοι-ρίζες είναι οι ίδιοι. Αν και έχουν προταθεί πολλά σχήματα που βασίζονται στον καθορισμό *MST* [109, 110], ο απαιτούμενος υπολογιστικός φόρτος είναι σημαντικός και κρίνεται συνήθως απαγορευτικός για χρήση σε WSN. Για το σκοπό αυτό, έχουν προταθεί προσεγγιστικές ή απλοποιημένες τεχνικές, που καθιστούν το σχετικό υπολογισμό εφικτό, όπως τα *MST k βημάτων* [108], ή τα κλαδεμένα *MST* (*capacitated MST*) [109].

Ένα σχήμα ομαδοποίησης k βημάτων με τίτλο *KCMBC* (*k-hop Compound Metric Based Clustering*) παρουσιάζεται στην [111]. Το *KCMBC* κάνει χρήση του βαθμού σύνδεσης (*connectivity*) και της κινητικότητας των κόμβων για την εξαγωγή μιας σύνθετης μετρικής που

χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των κόμβων CH. Ο σχηματισμός των ομάδων εκκινεί από τους κόμβους CH και επιτυγχάνεται με χρήση μιας επέκτασης της μεθόδου Max-Min [112]. Το KCMBC επιτυγχάνει ταχύ σχηματισμό ομάδων καθώς χαρακτηρίζεται από υπολογιστική πολυπλοκότητα $O(k)$. Παράλληλα, η υποστήριξη της κινητικότητας των κόμβων την καθιστά αποτελεσματική σε δυναμικά WSN.

Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους ομαδοποίησης k βημάτων που αποσκοπούν στο σχηματισμό αμοιβαίως αποκλειόμενων ομάδων κόμβων, οι συγγραφείς της [113] εξετάζουν το σχηματισμό επικαλυπτόμενων ομάδων, δηλαδή ομάδων με κοινά υποσύνολα κόμβων. Το προτεινόμενο σχήμα, *KOCA* (*k*-hop Overlapping Clustering Algorithm), προδιαγράφει το σχηματισμό ομάδων κόμβων με συγκεκριμένο μέσο βαθμό επικάλυψης. Όπως και η πλειοψηφία των σχημάτων ομαδοποίησης, το *KOCA* προϋποθέτει την ανάδειξη κόμβων CH. Η επιλογή των CH γίνεται τυχαία, με βάση μια a priori καθορισμένη πιθανότητα, p_{ch} . Οι ομάδες διευρύνονται ως δένδρα με κόμβους-ρίζες τους CH κατόπιν σχετικής πρόσκλησης από αυτούς. Κάθε κόμβος αποδέκτης μιας τέτοιας πρόσκλησης την αποδέχεται εφόσον η απόστασή του από τον αντίστοιχο CH είναι μικρότερη από k βήματα. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κόμβος αναπαράγει την πρόσκληση, προσκαλώντας αντίστοιχα τους γειτονικούς του κόμβους. Μετά το τέλος της διαδικασίας σχηματισμού των ομάδων, όλοι οι κόμβοι του δικτύου ανήκουν σε μία ή περισσότερες ομάδες. Ο βαθμός επικάλυψης των ομάδων μπορεί να ρυθμισθεί με κατάλληλη διαμόρφωση των βασικών παραμέτρων p_{ch} και k . Το *KOCA* είναι το πρώτο σχήμα που αναφέρεται στο σχηματισμό επικαλυπτόμενων ομάδων. Εντούτοις, η διερεύνησή τους παρουσιάζει ενδιαφέρον, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά τη σχεδίαση και ανάπτυξη αποτελεσματικών σχημάτων εντοπισμού και ανθεκτικών σχημάτων δρομολόγησης.

Γενικά, οι τεχνικές ομαδοποίησης k βημάτων δεν εκμεταλλεύονται άμεσα τη χωρική συσχέτιση των υπό παρακολούθηση φαινομένων. Εντούτοις, στην περίπτωση όπου η κατανομή της χωρικής συσχέτισης του φυσικού φαινομένου είναι γνωστή, ο περιορισμός ακρίβειας μπορεί a priori να αντιστοιχηθεί σε ένα πλήθος βημάτων k . Ο γεωγραφικός περιορισμός που εισάγεται μέσω του μέγιστου πλήθους βημάτων, k , αποτελεί συνηθισμένο τρόπο ελέγχου της τοπολογίας ενός WSN, λόγω της απλότητας στην υλοποίησή του, της σχετικά μικρής επιβάρυνσης που επιφέρει και της δυνατότητας έμμεσης σύνδεσής του με πραγματικά κριτήρια ακρίβειας πληροφορίας.

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα υπάρχοντα σχήματα ομαδοποίησης κόμβων διατίθενται στις επισκοπήσεις [114, 115].

Κεφάλαιο 3

Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων

3.1 Κλασική Θεωρία Παιγνίων

Η θεωρία παιγνίων (Game Theory) μελετά μη συνεργατικές σχέσεις μεταξύ συνόλων λογικών παικτών που ενεργούν με βάση αντικρουόμενα συμφέροντα. Τυπικά, ένα παίγνιο καθορίζεται από μία πλειάδα τιμών $\langle \mathcal{N}, \mathcal{G}, \pi \rangle$, όπου \mathcal{N} είναι το σύνολο των παικτών που συμμετέχουν στο παίγνιο, $\mathcal{G} = G_1 \times G_2 \times \dots \times G_{|\mathcal{N}|}$ είναι το σύνολο των διαθέσιμων προφίλ στρατηγικών όπου G_i είναι το διαθέσιμο σύνολο των στρατηγικών του παίκτη n_i , και $\pi : \mathbb{R}^{|\mathcal{G}|} \rightarrow \mathbb{R}$ είναι μία συνάρτηση που αποδίδει σε κάθε παίκτη μία τιμή ανταμοιβής (όφελος) αντίστοιχα προς το προφίλ στρατηγικών που εκάστοτε ακολουθεί. Αναφορικά με τις διαθέσιμες στρατηγικές κάθε παίκτη, μία *καθαρή* στρατηγική (pure strategy) αναθέτει στον παίκτη μία σαφώς καθορισμένη αλληλουχία στρατηγικών κινήσεων υπό οποιαδήποτε κατάσταση μπορεί να αντιμετωπίσει. Αντίθετα, μία *μικτή* στρατηγική (mixed strategy) αντιπροσωπεύει πιθανότητες στις διαθέσιμες καθαρές στρατηγικές των παικτών, ορίζοντας πιθανές ομάδες δυνατών στρατηγικών κινήσεων. Το σύνολο των στρατηγικών ενός παίκτη ορίζεται ως το σύνολο των καθαρών του στρατηγικών και μπορεί να είναι είτε πεπερασμένο είτε άπειρο. Αντίστοιχα, λόγω της συνεχούς φύσης των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας, το σύνολο των μικτών στρατηγικών των παικτών είναι άπειρο.

Μια κρίσιμη έννοια που σχετίζεται με τη θεωρία παιγνίων είναι αυτή της *ισορροπίας* [8] η οποία ορίζεται ως το στρατηγικό προφίλ που είναι βέλτιστο για όλους τους παίκτες, δηλαδή κανένας παίκτης δεν μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερο όφελος μεταβάλλοντας τη στρατηγική του από αυτήν της ισορροπίας. Καθώς υπάρχει πλήθος κριτηρίων σταθερότητας και μπορούν να τεθούν διαφορετικοί στόχοι βελτιστοποίησης, έχουν κατά καιρούς προταθεί πολλοί σχετικοί τύποι ισορροπίας. Από το σύνολο των ορισμών των σημείων ισορροπίας, η ισορροπία *Nash* (Nash Equilibrium, NE) είναι η πλέον συχνά χρησιμοποιούμενη στη βιβλιογραφία [12, 116]. Συγκεκριμένα, ένα στρατηγικό προφίλ

$$\mathbf{G}^* = \{G_1^* \times \dots \times G_{|\mathcal{N}|}^*\}, G_i^* \in G_i, \mathbf{G}^* \in \mathcal{G}$$

θεωρείται NE αν καμία *μονόπλευρη* απόκλιση από τη συμπεριφορά ισορροπίας δεν μπορεί να αποφέρει κέρδος σε κάποιο παίκτη, δηλαδή αν¹

$$\pi(G_i^*, \mathbf{G}_{-i}^*) \geq \pi(G_i', \mathbf{G}_{-i}^*), \quad G_i' \in \mathbf{G}_i, \quad \forall n_i \in \mathcal{N} \quad (3.1)$$

Η έννοια της ισορροπίας όπως αυτή αποτυπώνεται μέσω της NE (3.1) αποδείχθηκε ιδιαίτερα δημοφιλής καθώς αποτέλεσε τη βάση συνεχούς ανάπτυξης της θεωρίας παιγνίων καθώς και διαφόρων παραλλαγών αυτής όπως η συνεργατική θεωρία παιγνίων, η εξελικτική θεωρία παιγνίων κ.α.

Περισσότερες πληροφορίες και σχολιασμός σχετικά με την κλασική, μη συνεργατική θεωρία παιγνίων και ενδεχόμενες εφαρμογές της δίδονται στις [8, 116].

3.2 Συνεργατική Θεωρία Παιγνίων

Η κλασική, μη συνεργατική θεωρία παιγνίων διαχειρίζεται τα οφέλη των παικτών όπως αυτά προκύπτουν όταν έχει ορισθεί εκ των προτέρων ένα σύνολο στρατηγικών. Η *συνεργατική* θεωρία παιγνίων μελετά τα πιθανά αποτελέσματα που προκύπτουν όταν οι παίκτες αποφασίζουν να συνεργασθούν δημιουργώντας ομάδες συνεργατικών οντοτήτων. Καίτοι οι ανωτέρω κατηγορίες παιγνίων φαίνονται αμοιβαίως αποκλειόμενες, σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι: πολλά μη συνεργατικά παίγνια εξετάζουν την ενδεχόμενη μεγιστοποίηση του οφέλους των παικτών όταν αυτοί συνεργάζονται. Αντίστοιχα, η έννοια του ανταγωνισμού μεταξύ των συνασπισμών είναι πρωταρχικής σημασίας κατά την ανάλυση των συνεργατικών παιγνίων. Ως εκ τούτου, η βασική διαφορά μεταξύ των μη συνεργατικών και των συνεργατικών παιγνίων είναι ότι τα πρώτα βασίζονται στην ανάλυση των διαδικασιών (procedures) ενώ τα δεύτερα στην ανάλυση των συνδυασμών (combinations) της αλληλεπίδρασης των παικτών [117].

Αντίστοιχα προς τη φύση της συνεργατικής συμπεριφοράς των κόμβων, η συνεργατική θεωρία παιγνίων προσφέρει πλήθος μαθηματικών υποδειγμάτων, όπως τα παίγνια διαπραγματεύσεως (bargaining games), τα κανονικά συνασπιστικά παίγνια (canonical coalitional games), τα παίγνια σχηματισμού συνασπισμών (coalition formation games), τα συνεργατικά παίγνια γράφων (coalitional graph games) κ.α. Στην παρούσα διατριβή, συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 4, εξετάζεται η εφαρμογή των συνασπιστικών παιγνίων καθώς και των παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών στη θεμελίωση ενός σχήματος ομαδοποίησης κόμβων στο πλαίσιο ενός WSN. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες συνεργατικών, ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στην [8].

Στην περίπτωση των συνεργατικών παιγνίων οι παίκτες δρουν αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση της *αξίας* τους, όπως ακριβώς οι παίκτες σε μη συνεργατικά παίγνια επιδιώκουν

¹Στη συνέχεια, ο συμβολισμός x_{-i} θα αναφέρεται στο σύνολο $\mathcal{X} \setminus \{x_i\}$, όπου \mathcal{X} είναι το σύνολο όλων των x_i .

τη μεγιστοποίηση του ατομικού τους οφέλους. Εντούτοις, τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών παιγνίων είναι διαφορετικά. Η αξία ενός συνεργατικού παιγνίου είναι αντίστοιχη του οφέλους των μη συνεργατικών παιγνίων προσμετρώντας, όμως, την ευεργετική επίδραση της συνεργασίας στη λειτουργία των παικτών. Στο πλαίσιο της συνασπιστικής θεωρίας παιγνίων, το αποτέλεσμα της συνεργασίας των κόμβων αποτυπώνεται στο σχηματισμό ομάδων κόμβων που καλούνται *συνασπισμοί*. Έτσι, η έννοια του συνασπισμού αναφέρεται στην *συνειδητή* συμφωνία ενός πλήθους παικτών να συντονίσουν από κοινού τη λειτουργία τους αποσκοπώντας στη βελτιστοποίησή της λειτουργίας τους. Στην παρούσα διατριβή η σχετική ανάλυση περιορίζεται σε έννοιες που αναφέρονται στην κανονική συνασπιστική θεωρία παιγνίων και τη θεωρία παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών.

Στη γενική περίπτωση, τα συνασπιστικά παίγνια χαρακτηρίζονται από μία πλειάδα τιμών $\langle \mathcal{N}, v \rangle$, όπου \mathcal{N} είναι το σύνολο των παικτών που συμμετέχουν στο συνασπιστικό παίγνιο και v είναι συνάρτηση που καθορίζει τη μορφή του παιγνίου. Συχνά, η v καλείται απλώς *παίγνιο* καθώς διαφορετικές v ορίζουν διαφορετικές κατανομές αξίας στους παίκτες. Η πλέον συνηθισμένη μορφή ενός συνασπιστικού παιγνίου είναι η *χαρακτηριστική μορφή* (characteristic form), όπου η αξία ενός συνασπισμού S εξαρτάται αποκλειστικά από τη σύνθεση του συνασπισμού, χωρίς να εξαρτάται από το πώς είναι οργανωμένοι οι παίκτες που ανήκουν στο σύνολο $\mathcal{N} \setminus S$.

Η κατανομή της αξίας του συνασπισμού στα μέλη του καθορίζει επίσης τη μορφή του συνασπιστικού παιγνίου καθώς επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην ανάλυση της αξίας των κόμβων. Η χαρακτηριστική μορφή των συνασπιστικών παιγνίων αναλύθηκε αρχικά από τους von Neumann και Morgenstern το 1944 [10] για μια κατηγορία συνασπιστικών παιγνίων γνωστά ως παίγνια με *μεταφερόμενη ωφέλεια* (Transferable Utility, TU). Η κατανομή της αξίας ενός συνασπισμού S σε ένα TU συνασπιστικό παίγνιο είναι μια πραγματική (χαρακτηριστική) συνάρτηση οριζόμενη ως $v : 2^{\mathcal{N}} \rightarrow \mathbb{R}$. Η χαρακτηριστική συνάρτηση ενός TU συνασπιστικού παιγνίου αντιστοιχεί κάθε δυνατό συνασπισμό $S \subseteq \mathcal{N}$ σε έναν πραγματικό αριθμό που περιγράφει ποσοτικά το όφελος του S από τη συνεργασία των μελών του. Η αντιστοίχιση της αξίας ενός συνασπισμού σε ένα πραγματικό αριθμό συνεπάγεται ότι η αξία του συνασπισμού μπορεί να κατανεμηθεί χωρίς περιορισμό στα μέλη του, δηλαδή παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από την κατανομή της στα μέλη του συνασπισμού. Καίτοι η TU χαρακτηριστική συνάρτηση μπορεί να αντιπροσωπεύσει επιτυχώς πλήθος παιγνίων, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η αξία ενός συνασπισμού δεν μπορεί να αποτυπωθεί ορθά από ένα πραγματικό αριθμό, ή υπάρχουν περιορισμοί ως προς την κατανομή της αξίας στα μέλη του συνασπισμού. Οι καταστάσεις αυτές περιγράφονται μαθηματικά από τα συνασπιστικά παίγνια μη μεταφερόμενης ωφέλειας (Non Transferable Utility games, NTU), τα οποία μελέτησαν για πρώτη φορά οι Aumann και Peleg, κάνοντας χρήση της μη συνεργατικής θεωρίας παιγνίων [116, 118]. Σε ένα NTU παίγνιο η αξία κάθε κόμβου στο πλαίσιο ενός συνασπισμού S εξαρτάται από τις στρατηγικές κινήσεις όλων των παικτών του S . Έτσι, η αξία του S δεν είναι ένας μοναδικός

πραγματικός αριθμός αλλά ένα σύνολο διανυσμάτων $v(\mathcal{S}) \subseteq \mathbb{R}^{|\mathcal{S}|}$, όπου $|\mathcal{S}|$ είναι το πλήθος των μελών του \mathcal{S} . Κάθε στοιχείο x_i ενός διανύσματος $x \in v(\mathcal{S})$ περιγράφει την αξία που λαμβάνει ο παίκτης $n_i \in \mathcal{S}$ συμμετέχοντας στο συνασπισμό \mathcal{S} , όταν ακολουθεί μια συγκεκριμένη στρατηγική. Με βάση τον ορισμό των NTU παιγνίων, εύκολα διαπιστώνεται ότι τα TU παίγνια μπορούν να θεωρηθούν υποκατηγορία των NTU παιγνίων.

Εκτός από τη χαρακτηριστική μορφή της v , υπάρχει και η *μορφή διαμέρισης* (partition form) σύμφωνα με την οποία η αξία ενός συνασπισμού \mathcal{S} εξαρτάται από τη συμπεριφορά των παικτών που ανήκουν στο $\mathcal{N} \setminus \mathcal{S}$ [119]. Σε αυτά τα παίγνια, δεδομένης μια δομής συνασπισμών \mathcal{S} οριζόμενης ως διαμέρισης του \mathcal{N} , δηλαδή συνόλου συνασπισμών $\mathcal{P} = \{\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2, \dots, \mathcal{S}_m\}$ τέτοιων ώστε $\forall i \neq j, \mathcal{S}_i \cap \mathcal{S}_j = \emptyset$ και $\bigcup_{k=1}^m \mathcal{S}_k = \mathcal{P}$, η αξία ενός συνασπισμού $\mathcal{S} \in \mathcal{S}$ ορίζεται ως $v(\mathcal{S}, \mathcal{P})$. Τα παίγνια που εκφράζονται μαθηματικά υπό τη μορφή διαμέρισης δεν απασχολούν την παρούσα διατριβή. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης προτρέπεται να ανατρέξει στις [8, 116, 119] για περισσότερες πληροφορίες και σχετική ανάλυση.

3.2.1 Κανονικά συνασπιστικά παίγνια

Τα κανονικά συνασπιστικά παίγνια αποτελούν τη συχνότερη μορφή συνασπιστικών παιγνίων. Ένα παίγνιο μπορεί να χαρακτηριστεί ως κανονικό όταν ικανοποιεί τις ακόλουθες προδιαγραφές:

1. Το συνασπιστικό παίγνιο είναι σε χαρακτηριστική μορφή, είτε TU είτε NTU.
2. Η συνεργασία, δηλαδή η δημιουργία μεγάλων συνασπισμών, δεν είναι ποτέ επιβλαβής για κανένα από τους εμπλεκόμενους παίκτες. Έτσι, στα κανονικά παίγνια, καμία ομάδα παικτών δεν μπορεί να έχει μεγαλύτερο κέρδος δρώντας μη συνεργατικά από ο,τι δρώντας συνεργατικά.
3. Ο αντικειμενικός στόχος ενός κανονικού παιγνίου είναι η μελέτη των ιδιοτήτων και της σταθερότητας του σχηματισμού του *μεγάλου συνασπισμού* (Grand Coalition, GC), δηλαδή του συνασπισμού που περιλαμβάνει όλους του παίκτες του παιγνίου². Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής μπορεί να εξετάζονται τα οφέλη που προκύπτουν από τη συνεργασία των παικτών και η δίκαιη κατανομή αυτών στους παίκτες του παιγνίου.

Η προδιαγραφή 2 αναφέρεται ουσιαστικά στην ιδιότητα της *υπεραθροιστικότητας* (superadditivity): κάθε παίγνιο κανονικής μορφής πρέπει να είναι υπεραθροιστικό. Για τα NTU παίγνια η έννοια της υπεραθροιστικότητας ορίζεται μέσω της σχέσης

²Καθώς ο GC περιέχει το σύνολο των παικτών \mathcal{N} , οι συμβολισμοί GC και \mathcal{N} θα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια εναλλακτικά ως έχουσες το ίδιο νόημα, εφόσον αυτό είναι δυνατό

$$v(\mathcal{S}_1 \cup \mathcal{S}_2) \supseteq \{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{|\mathcal{S}_1 \cup \mathcal{S}_2|} \mid (\mathbf{x}_i)_{i \in \mathcal{S}_1} \in v(\mathcal{S}_1), (\mathbf{x}_j)_{j \in \mathcal{S}_2} \in v(\mathcal{S}_2) \},$$

$$\forall \mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2 \in \mathcal{N}, \text{ s.t. } \mathcal{S}_1 \cap \mathcal{S}_2 = \emptyset \quad (3.2)$$

Η αντίστοιχη μορφή για τα TU συνασπιστικά παίγνια προκύπτει ως

$$v(\mathcal{S}_1 \cup \mathcal{S}_2) \geq v(\mathcal{S}_1) + v(\mathcal{S}_2), \quad \forall \mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2 \in \mathcal{N}, \text{ s.t. } \mathcal{S}_1 \cap \mathcal{S}_2 = \emptyset \quad (3.3)$$

Με βάση τα ανωτέρω, όταν ένα παίγνιο είναι κανονικής μορφής, τότε ισχύει η υπεραθροιστικότητα. Συνεπώς, ο σχηματισμός μεγαλύτερων συνασπισμών είναι επωφελής για όλους τους παίκτες. Δηλαδή ο GC σχηματίζεται πάντα και η μελέτη των σχετικών παιγνίων περιορίζεται στη διερεύνηση των ιδιοτήτων του GC. Συγκεκριμένα, αντικειμενικούς στόχους μελέτης αποτελούν (i) η εύρεση της κατάλληλης κατανομής αξίας στους παίκτες του παιγνίου προκειμένου αυτοί να μην έχουν κίνητρο να αποχωρήσουν από τον GC (μελέτη σταθερότητας του GC), (ii) η μελέτη της αξίας των κόμβων στο πλαίσιο της συμμετοχής τους στον GC, ώστε να ικανοποιούνται ενδεχόμενα κριτήρια δίκαιης μεταχείρισης κόμβων (μελέτη δικαιοσύνης του GC). Προς τούτο, έχουν προταθεί διάφορες κατανομές αξίας, οι σημαντικότερες των οποίων παρουσιάζονται συνοπτικά στα προσεχή εδάφια.

3.2.1.1 Το σύνολο Core

Το σύνολο Core αποτελεί ένα από τα πλέον συνηθισμένα θέματα μελέτης των συνασπιστικών παιγνίων. Όντας άρρηκτα συνδεδεμένο με τον GC, το Core είναι το σύνολο των κατανομών αξίας που εγγυάται ότι κανένα σύνολο παικτών δεν έχει κίνητρο να αποσπασθεί από τον GC, για να σχηματίσει ένα συνασπισμό $\mathcal{S} \subset \mathcal{N}$. Για τη συνέχεια της ανάλυσης, είναι απαραίτητοι οι κατωτέρω ορισμοί.

Ομαδικά λογικό διάνυσμα απονομής αξίας:

Στο πλαίσιο ενός TU κανονικού παιγνίου, δεδομένου του σχηματισμού του GC, \mathcal{N} , ένα διάνυσμα απονομής αξίας $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{|\mathcal{N}|}$ για το διαμοιρασμό του $v(\mathcal{N})$ είναι *ομαδικά λογικό* (group rational) αν $\sum_{n_i \in \mathcal{N}} x_i = v(\mathcal{N})$.

Ατομικά λογικό διάνυσμα απονομής αξίας:

Στο πλαίσιο ενός TU κανονικού παιγνίου, δεδομένου του σχηματισμού του GC, \mathcal{N} , ένα διάνυσμα απονομής αξίας $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{|\mathcal{N}|}$ για το διαμοιρασμό του $v(\mathcal{N})$ είναι *ατομικά λογικό* (individually rational) εφόσον η απονεμημένη αξία κάθε παίκτη στο πλαίσιο οποιουδήποτε συνασπισμού είναι τουλάχιστον ίση με τη μη συνεργατική του αξία, δηλαδή $x_i \geq v(\{n_i\}), \forall n_i \in \mathcal{N}$.

Ένα διάνυσμα απονομής αξίας αποτελεί αποδεκτή κατανομή αξίας αν είναι ομαδικά και ατομικά λογικό. Στην περίπτωση αυτή, το Core \mathcal{C}_{TU} ενός TU κανονικού παιγνίου ορίζεται ως

$$\mathcal{C}_{TU} = \left\{ \mathbf{x} : \sum_{n_i \in \mathcal{N}} x_i = v(\mathcal{N}) \text{ και } \sum_{n_i \in \mathcal{S}} x_i \geq v(\mathcal{S}), \forall \mathcal{S} \subset \mathcal{N} \right\} \quad (3.4)$$

Η (3.4) καταδεικνύει ότι το Core ενός TU κανονικού παιγνίου αποτελείται από το σύνολο των αποδεκτών κατανομών αξίας για τις οποίες κανένα σύνολο παικτών δεν έχει κίνητρο να εξέλθει του GC. Η έννοια του Core είναι περισσότερο περιοριστική σε σχέση με την έννοια της ισοροπίας Nash, καθώς αποκλείει όχι μόνο τη μεμονωμένη απόκλιση παικτών από την κατάσταση ισοροπίας, αλλά και τη συντονισμένη τους προσπάθεια.

Για τον αντίστοιχο ορισμό για NTU παίγνια απαιτούνται πρόσθετες συνθήκες ως προς τη μορφή και τις ιδιότητες των αντίστοιχων διανυσμάτων απονομής αξίας. Συγκεκριμένα, η $v(\mathcal{S})$ πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες για οποιοδήποτε συνασπισμό \mathcal{S} .

1. Η αξία $v(\mathcal{S})$ οποιοδήποτε συνασπισμού \mathcal{S} πρέπει να αποτελεί κλειστό και κυρτό υποσύνολο του $\mathbb{R}^{|\mathcal{S}|}$.
2. Η αξία $v(\mathcal{S})$ οποιοδήποτε συνασπισμού \mathcal{S} πρέπει να είναι εκτενής (comprehensive), δηλαδή για κατάλληλα $\mathbf{x} \in v(\mathcal{S})$ και $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{|\mathcal{S}|}$, αν $\mathbf{y} \leq \mathbf{x}$ τότε $\mathbf{y} \in v(\mathcal{S})$.
3. Το σύνολο $\{\mathbf{x} | \mathbf{x} \in v(\mathcal{S}) \text{ και } x_i \geq z_i, \forall n_i \in \mathcal{S}\}$ όπου $\mathbf{z} = \max \{y_i | \mathbf{y} \in v(\{n_i\})\} < \infty, \forall n_i \in \mathcal{S}$ πρέπει να είναι φραγμένο υποσύνολο του $\mathbb{R}^{|\mathcal{S}|}$.

Η συνθήκη (2) υπονοεί ότι αν τα μέλη ενός συνασπισμού \mathcal{S} απολαμβάνουν αξία \mathbf{x} , τότε αν αλλάξουν στρατηγική θα έχουν τη δυνατότητα απολαβής αξίας $\mathbf{y} \leq \mathbf{x}$. Η συνθήκη (3) υπονοεί ότι, δεδομένου ενός συνασπισμού $\mathcal{S} \subset \mathcal{N}$, το σύνολο των διανυσμάτων στην $v(\mathcal{S})$ τα οποία αποδίδουν σε κάθε παίκτη του \mathcal{S} τη μέγιστη δυνατή αξία που μπορεί να αποκτήσει μέσω μη συνεργατικής συμπεριφοράς, z_i , είναι πεπερασμένο.

Εφόσον οι ανωτέρω συνθήκες ισχύουν, το Core ενός NTU συνασπιστικού παιγνίου ορίζεται ως

$$\mathcal{C}_{NTU} = \{\mathbf{x} \in v(\mathcal{S}) | \forall \mathcal{S} \subset \mathcal{N}, \nexists \mathbf{y} \in v(\mathcal{S}) \text{ τέτοιο ώστε } y_i > x_i, \forall n_i \in \mathcal{S}\} \quad (3.5)$$

Η βασική διαφορά της έννοιας του Core μεταξύ TU και NTU κανονικών συνασπιστικών παιγνίων έγκειται στο ότι, στην περίπτωση των TU συνασπιστικών παιγνίων η σταθερότητα του GC θεμελιώνεται με βάση την αθροιστική αξία των συνεργατικών κόμβων, ενώ στην NTU περίπτωση η σταθερότητα επιτυγχάνεται σε κάθε παίκτη του παιγνίου, ξεχωριστά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύνολο Core ενός παιγνίου (\mathcal{N}, v) μπορεί να είναι κενό. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον υπολογισμό και τις συνθήκες υπό τις οποίες το σύνολο Core υπάρχει και μπορεί να προσδιορισθεί, δίδονται στις [116, 120].

3.2.1.2 Η κατανομή αξίας του Shapley (Shapley Value)

Ενώ η σταθερότητα του GC που εγγυάται το σύνολο Core είναι επιθυμητή από πολλές εφαρμογές, ο ορισμός του Core παρουσιάζει τρία βασικά μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, το Core μπορεί (i) να είναι κενό, δηλαδή να μην υπάρχει, (ii) να είναι υπερβολικά μεγάλο, δυσκολεύοντας την αξιολόγηση και επιλογή συγκεκριμένης κατανομής από αυτό, και (iii) να οδηγήσει σε άδικη κατανομή αξίας σε ένα ή περισσότερους παίκτες του παιγνίου. Τα μειονεκτήματα αυτά, οδήγησαν τον Shapley στη διατύπωση μίας σειράς συνθηκών, η ικανοποίηση των οποίων μπορεί να εγγυηθεί την ύπαρξη μίας δίκαιης, μοναδικής κατανομής αξίας ϕ στους παίκτες ενός παιγνίου [121]. Οι συνθήκες αυτές, γνωστές και ως *αξιώματα του Shapley* (Shapley Axioms), είναι οι ακόλουθες³:

Αξίωμα αποτελεσματικότητας (Efficiency Axiom)

Πρέπει να ισχύει $\sum_{n_i \in \mathcal{N}} \phi_i(v) = v(\mathcal{N})$, όπου ϕ_i είναι η αξία που αποδίδεται στον παίκτη n_i από την κατανομή του Shapley.

Αξίωμα συμμετρίας (Symmetry Axiom)

Αν υπάρχουν παίκτες n_i και n_j τέτοιοι ώστε $v(\mathcal{S} \cup \{n_i\}) = v(\mathcal{S} \cup \{n_j\})$ για κάθε συνασπισμό \mathcal{S} που δεν περιέχει τους παίκτες n_i και n_j , τότε $\phi_i(v) = \phi_j(v)$.

Αξίωμα μηδενικής αξίας (Dummy Axiom)

Αν υπάρχει παίκτης n_i τέτοιος ώστε $v(\mathcal{S} \cup \{n_i\}) = v(\mathcal{S})$ για κάθε συνασπισμό \mathcal{S} που δεν περιέχει τον παίκτη n_i , τότε $\phi_i(v) = 0$.

Αξίωμα αθροιστικότητας (Additivity Axiom)

Αν v και u είναι χαρακτηριστικές συναρτήσεις, τότε $\phi(v+u) = \phi(u+v) = \phi(v) + \phi(u)$.

Ο Shapley στην [121] απέδειξε ότι υπάρχει πάντα μία μοναδική κατανομή αξίας, η κατανομή αξίας Shapley, $\phi(v)$, που ικανοποιεί τα ανωτέρω αξιώματα. Το αξίωμα της αποτελεσματικότητας υπονοεί ότι η κατανομή Shapley είναι ομαδικά λογική. Το αξίωμα συμμετρίας συνεπάγεται ότι όταν οι συνεισφορές δύο παικτών σε κάποιο συνασπισμό είναι ίσες, οι συνεργατικές τους αξίες πρέπει επίσης να είναι ίσες και, άρα, μια δίκαιη κατανομή αξίας πρέπει να τους αποδώσει ίση αξία. Το αξίωμα του μηδενισμού υπονοεί ότι αν ένας κόμβος δεν μπορεί να προσδώσει κάποιο όφελος σε ένα συνασπισμό με τη συμμετοχή του σε αυτόν, τότε

³Καθώς ο Shapley όρισε τις συνθήκες αυτές για TU κανονικά παίγνια και η επέκταση σε NTU περιπτώσεις δεν είναι απλή, η σχετική ανάλυση περιορίζεται σε TU περιπτώσεις. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την NTU μαθηματική αποτύπωση της κατανομής του Shapley, ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει στην παραπομπή [116].

η αξία που πρέπει να λάβει είναι μηδενική. Τέλος, το αξίωμα της αθροιστικότητας καταδεικνύει τη σύνδεση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ των αξιών που λαμβάνουν οι κόμβοι σε περίπτωση συμμετοχής τους σε περισσότερα του ενός παίγνια (που εκφράζονται μέσω των διαφορετικών v και u), υπονοώντας ότι η κατανομή αξίας που προτείνει η ϕ είναι μοναδική στο πεδίο των συνασπιστικών παιγνίων.

Η κατανομή αξίας του Shapley έχει και μία εναλλακτική θεώρηση, η οποία οδηγεί με απλούστερο τρόπο στον καταρχήν ορισμό της. Η εναλλακτική αυτή θεώρηση λαμβάνει υπόψη της τη σειρά με την οποία οι παίκτες του συνασπιστικού παιγνίου αποφασίζουν τη συμμετοχή τους στο \mathbf{N} (GC). Στην περίπτωση όπου οι παίκτες αποφασίζουν με τυχαία σειρά τη συμμετοχή τους στο GC, η κατανομή αξίας Shapley αποδίδει σε κάθε παίκτη αξία ίση με την *επιπλέον* αξία που προσδίδει στο συνασπισμό ο παίκτης με τη συμμετοχή του. Με βάση αυτή την ερμηνεία της κατανομής αξίας του Shapley, δεδομένου ενός συνασπιστικού παιγνίου (\mathcal{N}, v) , η κατανομή αξίας Shapley, $\phi(v)$, αποδίδει σε κάθε παίκτη $n_i \in \mathcal{N}$ αξία $\phi_i(v)$ που δίδεται από τη σχέση

$$\phi_i(v) = \sum_{S \subseteq \mathcal{N} \setminus \{n_i\}} \frac{|S|! \cdot (|\mathcal{N}| - |S| - 1)!}{|\mathcal{N}|!} \cdot \{v(S \cup \{n_i\}) - v(S)\} \quad (3.6)$$

Στο δεξιό σκέλος της (3.6), ο παράγοντας $v(S \cup \{n_i\}) - v(S)$, ποσοτικοποιεί την επιπλέον αξία που λαμβάνει ο συνασπισμός S μετά την αποδοχή του παίκτη n_i . Καθώς το \mathcal{N} (GC) δημιουργείται με σταδιακή ενσωμάτωση των κόμβων του παιγνίου κατά τυχαία σειρά, ο πρώτος παράγοντας του δεξιού σκέλους της (3.6) αποδίδει την πιθανότητα ο κόμβος n_i να διαπραγματευθεί τη συμμετοχή του στο GC όταν αυτό έχει ακόμα τη μορφή του S .

Γενικά, η κατανομή αξίας του Shapley δεν σχετίζεται άμεσα με το σύνολο Core. Εντούτοις, μπορεί να αποδειχθεί ότι, υπό ορισμένες συνθήκες, η κατανομή Shapley μπορεί να εμπεριέχεται στο Core. Ενδεικτικά, όταν το παίγνιο v είναι κυρτό, η κατανομή Shapley ανήκει στο Core. Περισσότερες λεπτομέρειες παρέχονται στην [116].

Σε κάθε περίπτωση, η κατανομή αξίας του Shapley αποτελεί μία από τις σημαντικότερες λύσεις συνασπιστικών παιγνίων καθώς εγγυάται τη *δίκαιη* απονομή αξίας στους κόμβους ενός παιγνίου, χαρακτηριστικό που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό σε περιπτώσεις όπου η δικαιοσύνη αποτελεί σημαντικό στόχο σχεδίασης ενός συστήματος, όπως είναι η κατανομή πόρων [122, 123], η ομαδοποίηση κόμβων σε WSN (βλ. Κεφάλαιο 4) κ.α.

3.2.1.3 Η κατανομή αξίας Nucleolus

Αντίστοιχα προς την κατανομή αξίας Shapley, η οποία προτείνει μια δίκαιη κατανομή αξίας στους παίκτες ενός συνασπιστικού παιγνίου, ανάλογη μάλιστα με τη συμμετοχή κάθε παίκτη στο σχηματισμό του συνασπισμού στον οποίο ανήκει, η κατανομή αξίας *Nucleolus* προτείνει μια θεώρηση δικαιοσύνης η οποία βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της αδικίας ανάμεσα τους παίκτες του παιγνίου [124]. Η κατανομή Nucleolus, πρώιμη εφαρμογή της οποίας

γινόταν στο πλαίσιο του Talmud στην Αρχαία Βαβυλώνα περίπου το 500 π.Χ. [125, 126], περιγράφεται μαθηματικά κατά σαφή τρόπο στην περίπτωση των TU συνασπιστικών παιγνίων. Αντίστοιχη μαθηματική διατύπωση για NTU παίγνια δεν έχει προς το παρόν προταθεί .

Αντί να εστιάζει στην εφαρμογή συγκεκριμένων κριτηρίων δικαιοσύνης, η κατανομή Nucleolus εστιάζει στην ελαχιστοποίηση της *δυσαρέσκειας* των παικτών από την αξία που τους κατανέμεται στο πλαίσιο ενός συνασπιστικού παιγνίου (\mathcal{N}, v) . Το μέτρο δυσαρέσκειας των παικτών που συμμετέχουν σε ένα συνασπισμό $S \in 2^{\mathcal{N}} \setminus \{\emptyset, \mathcal{N}\}$ η οποία προκύπτει από ένα διάνυσμα απονομής αξίας $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{|S|}$ ορίζεται ως

$$e(\mathbf{x}, S) = v(S) - \sum_{n_i \in S} x_i \quad (3.7)$$

Έστω $e(\mathbf{x})$ το σύνολο των μέτρων δυσαρέσκειας των παικτών σε οποιοδήποτε συνασπισμό $S \in 2^{\mathcal{N}} \setminus \{\emptyset, \mathcal{N}\}$, δηλαδή $e(\mathbf{x}) = (e(\mathbf{x}, S))_{S \in 2^{\mathcal{N}} \setminus \{\emptyset, \mathcal{N}\}}$. Επίσης, έστω $e^*(\mathbf{x})$ αύξουσα λεξικογραφική ταξινόμηση του $e(\mathbf{x})$. Ένα σύνολο $\mathbf{a} = \{a_1, \dots, a_m\}$ θεωρείται λεξικογραφικά μικρότερο από το $\mathbf{b} = \{b_1, \dots, b_m\}$ ($\mathbf{a} \prec_{lex} \mathbf{b}$) αν $\exists k = \{1, \dots, m\} : a_1 = b_1, \dots, a_{k-1} = b_{k-1}, a_k < b_k$. Ένα διάνυσμα απονομής αξίας \mathbf{x} αποτελεί κατανομή αξίας Nucleolus αν ισχύει ότι

$$\forall \mathbf{y} \in \mathbb{R}^{|2^{\mathcal{N}} \setminus \{\emptyset, \mathcal{N}\}}| : e^*(\mathbf{x}) \prec_{lex} e^*(\mathbf{y}) \quad (3.8)$$

Δηλαδή, η κατανομή αξίας Nucleolus είναι η κατανομή αξίας που ελαχιστοποιεί τη δυσαρέσκεια των παικτών, όταν αυτή είναι ταξινομημένη με φθίνουσα λεξικογραφική σειρά. Έτσι, θεωρείται βέλτιστη υπό μια min-max θεώρηση βελτιστοποίησης. Επίσης, είναι ατομικά και ομαδικά λογική και υπάρχει πάντα. Επίσης, είναι *μοναδική*, ανήκει πάντα στο σύνολο Kernel (βλ. εδάφιο 3.2.1.4) και, αν το σύνολο Core δεν είναι κενό, τότε η κατανομή αξίας Nucleolus περιέχεται σε αυτό. Αυτά τα χαρακτηριστικά μαζί με πλήθος άλλων που περιγράφονται αναλυτικά στην [127] καθιστούν την κατανομή Nucleolus μία από τις πλέον σημαντικές κατανομές αξίας για συνασπιστικά παίγνια. Εντούτοις, ο προσδιορισμός της δεν είναι υπολογιστικά απλός και βασίζεται στην επαναληπτική ελαχιστοποίηση της μέγιστης δυσαρέσκειας των παικτών του παιγνίου με τη βοήθεια μεθόδων γραμμικής βελτιστοποίησης, όπως, για παράδειγμα, η Simplex [120].

3.2.1.4 Το σύνολο Kernel

Το σύνολο Kernel παρουσιάστηκε από τους Davis και Maschler στην [128] και εξετάζει τη σταθερότητα των συνασπισμών με βάση την αμοιβαία, ανά ζεύγος, εξάρτηση της αξίας των παικτών. Όπως και στα προηγούμενα δύο εδάφια, έτσι και εδώ η ανάλυση περιορίζεται στην TU περίπτωση καθώς, αν και υπάρχουν NTU προσεγγίσεις, η ανάλυσή τους είναι απαιτητική και θεωρείται εκτός του πλαισίου της διατριβής. Θεωρώντας ένα TU συνασπιστικό

παίγνιο (\mathcal{N}, v) και ένα ζεύγος παικτών $n_i, n_j \in \mathcal{N}$, έστω ότι $s_{i,j}(\mathbf{x})$ είναι το πλεόνασμα (surplus) αξίας του παίκτη n_i έναντι του n_j ως προς το διάνυσμα απονομής αξίας \mathbf{x} , οριζόμενο ως

$$s_{i,j}(\mathbf{x}) = \max_{n_i \in \mathcal{S}, n_j \notin \mathcal{S}} \left\{ v(\mathcal{S}) - \sum_{n_k \in \mathcal{S}} x_k \right\} \quad (3.9)$$

Το πλεόνασμα αξίας $s_{i,j}(\mathbf{x})$ ουσιαστικά εκφράζει τη μέγιστη αξία που μπορεί να λάβει ο παίκτης n_i αν απορρίψει την κατανομή αξίας που προτείνει το \mathbf{x} , χωρίς τη συγκατάθεση του παίκτη n_j . Το σύνολο Kernel \mathcal{K} ενός συνασπιστικού παιγνίου (\mathcal{N}, v) ορίζεται ως

$$\mathcal{K}(\mathcal{N}, v) = \{ \mathbf{x} \mid s_{i,j}(\mathbf{x}) = s_{j,i}(\mathbf{x}) \}, \quad \forall n_i, n_j \in \mathcal{N} \quad (3.10)$$

όπου \mathbf{x} είναι ομαδικά λογικό διάνυσμα απονομής αξίας. Το σύνολο $\mathcal{K}(\mathcal{N}, v)$ ορίζει ουσιαστικά ένα πλήθος από *αμοιβαίες καταστάσεις ισορροπίας*, υπό την έννοια ότι εκμηδενίζει τις απειλές απόκλισης από την κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των παικτών ενός συνασπιστικού παιγνίου.

Καίτοι ταιριάζει περισσότερο με τα συνεργατικά παίγνια που αντιμετωπίζονται με τη βοήθεια του συνόλου διαπραγμάτευσης (bargaining set), η μελέτη του συνόλου Kernel μελετάται συνηθέστερα στο πλαίσιο των συνασπιστικών παιγνίων. Επίσης, παρουσιάζει ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά καθώς υπάρχει πάντα, περιέχει ατομικά λογικά διανύσματα απονομής αξίας (αν το υποκείμενο παίγνιο (\mathcal{N}, v) είναι υπεραθροιστικό), ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει ισότιμη μεταχείριση μεταξύ των παικτών του παιγνίου.

3.2.2 Παίγνια σχηματισμού συνασπισμών

Όπως προαναφέρθηκε, η θεώρηση των κανονικών συνασπιστικών παιγνίων βασίζεται στο σχηματισμό του GC. Εντούτοις, κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό σε πλήθος εφαρμογών όπου η δημιουργία συνασπισμών συνοδεύεται από κάποιο κόστος ή όταν εξωτερικοί παράγοντες καθιστούν δύσκολο ή αδύνατο το σχηματισμό του GC. Στις εφαρμογές αυτές σχηματίζεται πλήθος συνασπισμών αντί του GC. Οι ιδιότητες των σχετικών παιγνίων και οι αρχές που τα καθορίζουν περιγράφονται με τη βοήθεια της θεωρίας παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών. Τα χαρακτηριστικά που καθιστούν ένα συνεργατικό παίγνιο παίγνιο σχηματισμού συνασπισμών, καταγράφονται ακολούθως

1. Το παίγνιο είναι είτε χαρακτηριστικής μορφής είτε μορφής διαμέρισης.
2. Το παίγνιο δεν είναι υπεραθροιστικό ή εξωτερικοί παράγοντες δεν επιτρέπουν το σχηματισμό του GC.
3. Ο σχηματισμός συνασπισμών αποφέρει κέρδη στα μέλη του συνασπισμού αλλά η σχετική διαδικασία επιφέρει επίσης και κάποιο μη αμελητέο κόστος στα μέλη του.

Σε αντίθεση με τα κανονικά συνασπιστικά παίγνια που είναι αποκλειστικά χαρακτηριστικής μορφής, τα παίγνια σχηματισμού συνασπισμών υποστηρίζουν και τη μορφή διαμέρισης, καθιστώντας εφικτή την ανάλυση μεγαλύτερου εύρους συνασπιστικών παιγνίων. Επίσης, ενώ τα κανονικά συνασπιστικά παίγνια προϋποθέτουν συνήθως την ικανοποίηση της συνθήκης υπεραθροιστικότητας (3.2, 3.3), τα παίγνια σχηματισμού συνασπισμών βασίζονται στη μη ικανοποίησή της. Συγκεκριμένα, συχνά θεωρείται ότι η διαδικασία του σχηματισμού συνασπισμών επιφέρει κάποιο κόστος στους παίκτες που εμπλέκονται σε αυτήν. Ενδεικτικά, το κόστος αυτό μπορεί να σχετίζεται με την κατανάλωση πόρων που δεσμεύονται για την ολοκλήρωση της σχετικής διαπραγμάτευσης μεταξύ των παικτών. Άλλοι εξωτερικοί παράγοντες μπορεί επίσης να καθορίζουν ουσιαστικά τη μορφή των σχηματιζόμενων συνασπισμών. Τέτοιοι εξωτερικοί παράγοντες είναι συχνοί σε διάφορους τομείς εφαρμογής της θεωρίας παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών όπως είναι η ανάλυση αγοράς, όπου επιτροπές ανταγωνιστικότητας μπορεί να εμποδίζουν τη δημιουργία καρτέλ επιχειρήσεων [129], η δημιουργία ομάδων κόμβων σε WSN, όπου παράγοντες ακρίβειας δεν επιτρέπουν τον αυθαίρετο σχηματισμό συνασπισμών (βλ. Κεφάλαιο 4), κ.α. Σε κάθε περίπτωση, η μελέτη που αφορά τα παίγνια σχηματισμού συνασπισμών επικεντρώνεται στην τελική δομή συνασπισμών που θα δημιουργηθεί. Δεδομένου ότι δεν μπορεί να σχηματισθεί ο GC, η διαδικασία δόμησης του τελικού σχηματισμού συνασπισμών καθώς και οι ιδιότητες αυτού μελετώνται λαμβάνοντας υπόψη τόσο το κόστος που προκύπτει λόγω της επικοινωνίας των παικτών αλλά και τους ενδεχόμενους εξωτερικούς παράγοντες που περιορίζουν το σχηματισμό των συνασπισμών.

Η μετάβαση από τα κανονικά συνασπιστικά παίγνια στα παίγνια σχηματισμού συνασπισμών επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις κατανομές αξίας (ή σύνολα αυτών) που μελετήθηκαν στα εδάφια 3.2.1.1-3.2.1.4. Καθώς οι κατανομές αξίας αυτές βασίζονται στο σχηματισμό του GC, ο σχηματισμός πολλαπλών συνασπισμών αλλοιώνει τον ορισμό και τη χρήση τους. Οι Aumann και Drèze ήταν οι πρώτοι που διατύπωσαν αναλυτικά τις διαφορές μεταξύ των δύο κατηγοριών συνασπιστικών παιγνίων [130]. Συγκεκριμένα, ένα παίγνιο σχηματισμού συνασπισμών μπορεί να ορισθεί επαρκώς υπό τη μορφή $(\mathcal{N}, v, \mathcal{B})$, όπου $\mathcal{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ είναι η δομή συνασπισμών και $B_i, i = 1, 2, \dots, n$, είναι οι συνασπισμοί. Σύμφωνα με την [130], η φύση των παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών επιβάλλει την αντικατάσταση της έννοιας της ομαδικής λογικής από αυτήν της *σχετικής αποτελεσματικότητας* (relative efficiency), σύμφωνα με την οποία, δεδομένου ενός διανύσματος κατανομής αξίας $x \in \mathbb{R}^{|\mathcal{N}|}$, ισχύει $\sum_{n_i \in B_k} x_i = v(B_k), \forall B_k \in \mathcal{B}$. Με βάση την έννοια της σχετικής αποτελεσματικότητας, οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι ενώ το σύνολο Core και η κατανομή Nucleolus είναι δύσκολο να ενταχθούν στο πλαίσιο των παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών λόγω της εγγενούς σύνδεσής τους με το \mathcal{N} , η κατανομή αξίας του Shapley μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα. Συγκεκριμένα, η κατανομή αξίας του Shapley στο πλαίσιο ενός στατικού παιγνίου σχηματισμού συνασπισμών $(\mathcal{N}, v, \mathcal{B})$ μπορεί να μεταφρασθεί ως ένα διάνυσμα αξιών, γνωστό και ως *\mathcal{B} -αξία* (\mathcal{B} -value) του παιγνίου. Τα αξιώματα του Shapley (βλ.

εδάφιο 3.2.1.2) εξακολουθούν να ισχύουν, εξαιρουμένου του αξιώματος αποτελεσματικότητας που αντικαθίσταται από την έννοια της σχετικής αποτελεσματικότητας. Οι συγγραφείς της [130] αποδεικνύουν ότι, στην περίπτωση όπου ισχύει το αξίωμα της σχετικής αποτελεσματικότητας, η \mathcal{B} -αξία του παιγνίου ικανοποιεί την *περιοριστική ιδιότητα*, σύμφωνα με την οποία μπορεί να εξετασθεί το περιορισμένο παίγνιο $(\mathcal{B}_k, v|_{\mathcal{B}_k}), \forall \mathcal{B}_k \in \mathcal{B}$ αντί του του αντίστοιχου κανονικού συνασπιστικού παιγνίου (\mathcal{N}, v) , όπου $v|_{\mathcal{B}_k}$ είναι η συνάρτηση αξίας του κανονικού συνασπιστικού παιγνίου ορισμένου επί του συνόλου των παικτών που ανήκουν στο \mathcal{B}_k . Η \mathcal{B} -αξία ενός παιγνίου $(\mathcal{N}, v, \mathcal{B})$ μπορεί να υπολογισθεί ως εξής: καταρχάς, εφαρμόζοντας τον ορισμό της κατανομής αξίας του Shapley (3.6) για κάθε περιορισμένο παίγνιο $(\mathcal{B}_k, v|_{\mathcal{B}_k}), \forall \mathcal{B}_k \in \mathcal{B}$ και, έπειτα, σχηματίζοντας το $1 \times |\mathcal{N}|$ διάνυσμα κατανομής αξίας επί του \mathcal{N} . Δυστυχώς, δεν μπορεί να εφαρμοσθεί μια αντίστοιχη προσέγγιση για τις υπόλοιπες λύσεις που αναλύθηκαν (το σύνολο Core, την κατανομή Nucleolus και το σύνολο Kernel), καθώς η εξάρτησή τους από το \mathcal{N} ακυρώνει την ισχύ της περιοριστικής ιδιότητας. Καίτοι έχουν προταθεί σχετικές μέθοδοι που βασίζονται σε μετασχηματισμούς παιγνίων (ενδεικτικά αναφέρεται η [131]), το εύρος εφαρμογής τους είναι περιορισμένο.

3.2.2.1 Δυναμικά παίγνια σχηματισμού συνασπισμών

Τα παίγνια σχηματισμού συνασπισμών μπορεί να είναι είτε *στατικά* είτε *δυναμικά*, αντίστοιχα προς τη φύση των παραγόντων που επηρεάζουν την κατάσταση των παικτών και, επομένως, τις ιδιότητες των παιγνίων. Ένα παίγνιο καλείται στατικό όταν τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος του παιγνίου παραμένουν αμετάβλητα στη διάρκεια του χρόνου. Σε αντίθετη περίπτωση, καλείται δυναμικό.

Καίτοι η μέχρι τώρα ανάλυση περιορίστηκε στη μελέτη στατικών παιγνίων, η ανάγκη για ανάπτυξη κατάλληλων μαθηματικών υποδειγμάτων ικανών να διαχειρισθούν δυναμικά παίγνια σχηματισμού συνασπισμών είναι αδιαμφισβήτητη. Εντούτοις, η σχετική ανάλυση δεν έχει ωριμάσει ακόμη, αφού έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία μόνο προσεγγίσεις που αφορούν συγκεκριμένα σενάρια και εφαρμογές. Τα σχετικά συγκεντρωτικά σχήματα παρουσιάζουν συνήθως αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Έτσι, είναι, γενικά, επιθυμητή η ανάπτυξη κατανεμημένων προσεγγίσεων [129]. Μία από τις πλέον αναγνωρίσιμες προτάσεις αναφορικά με την ανάλυση δυναμικών παιγνίων σχηματισμού συνασπισμού παρουσιάζεται στην [132]. Σε αυτήν παρουσιάζεται ένα σύνολο κανόνων, η εφαρμογή των οποίων μπορεί να οδηγήσει στον ορισμό δυναμικών σχημάτων κατανεμημένης εύρεσης της βέλτιστης δομής συνασπισμών. Για τη διαμόρφωση τέτοιων σχημάτων προτείνεται ότι πρέπει να έχουν σαφώς οριστεί κατάλληλες:

1. διατάξεις για τη σύγκριση δομών συνασπισμών ως προς το όφελος των παικτών που τις αποτελούν ή μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτές,
2. διαδικασίες για τη συνένωση και διάσπαση συνασπισμών,

3. μέθοδοι που να επιτρέπουν τον καθορισμό και επαλήθευση της σταθερότητας της εκάστοτε δομής συνασπισμών.

Στην [132] προτείνονται πλήθος διατάξεων για τη σύγκριση δομών συνασπισμών, εκ των οποίων οι πλέον σημαντικές είναι η *ωφελμιστική* διάταξη (utilitarian order) και η διάταξη *Pareto* (Pareto order). Σύμφωνα με την ωφελμιστική διάταξη, μία δομή συνασπισμών \mathcal{W} θεωρείται προτιμότερη σε σύγκριση με μία άλλη δομή \mathcal{S} αν η συνολική συνεργατική αξία που επιτυγχάνεται στο πλαίσιο της \mathcal{W} είναι μεγαλύτερη από αυτήν που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της δομής \mathcal{S} , δηλαδή αν

$$\sum_{\mathbf{w}_i \in \mathcal{W}} v(\mathbf{w}_i) > \sum_{\mathbf{s}_j \in \mathcal{S}} v(\mathbf{s}_j). \quad (3.11)$$

Αντίθετα, η διάταξη Pareto ορίζει ότι η δομή συνασπισμών \mathcal{W} είναι προτιμότερη της \mathcal{S} αν υπάρχει τουλάχιστον ένας παίκτης που μπορεί να λάβει μεγαλύτερη αξία μέσω της συμμετοχής του στην \mathcal{W} σε σχέση με την \mathcal{S} , χωρίς να μειώνει την αξία οποιουδήποτε άλλου παίκτη.

Χρησιμοποιώντας τις ανωτέρω διατάξεις, ορίζονται δύο απλοί κανόνες για τη συνένωση και διάσπαση συνασπισμών. Η βασική ιδέα πίσω από τον κανόνα συνένωσης είναι ότι οι συνασπισμοί που ανήκουν σε μία δομή αμοιβαίως αποκλειόμενων συνασπισμών $\{\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2, \dots, \mathcal{S}_k\}$, $\mathcal{S}_i \cap \mathcal{S}_j = \emptyset, \forall \mathcal{S}_i \neq \mathcal{S}_j, \mathcal{S}_i \subset \mathcal{N}, i, j = 1, 2, \dots, k$, μπορούν να συμφωνήσουν να συνεργασθούν σχηματίζοντας ένα μεγαλύτερο συνασπισμό $\mathcal{S} = \bigcup_{i=1}^k \mathcal{S}_i$ αν ο σχηματισμός του \mathcal{S} είναι επωφελής για τους εμπλεκόμενους παίκτες υπό μία εκ των δύο προαναφερθεισών διατάξεων. Ο κανόνας διάσπασης ορίζεται κατά τρόπο αντίθετο του κανόνα συνένωσης: ένας συνασπισμός $\mathcal{S} = \bigcup_{i=1}^k \mathcal{S}_i$ διασπάται σε k μοναδιαίους συνασπισμούς –συνασπισμούς που αποτελούνται από ένα παίκτη– αν μία τέτοια κίνηση εξασφαλίζει μεγαλύτερη αξία στους εμπλεκόμενους παίκτες, σύμφωνα με τη διάταξη που υιοθετείται.

Ανεξάρτητα από τη χρησιμοποιούμενη διάταξη, οι συγγραφείς της [132] αποδεικνύουν ότι μία δομή συνασπισμών του \mathcal{N} σχηματίζεται σε κάθε περίπτωση. Επίσης, προτείνουν δύο έννοιες σταθερότητας, την \mathbb{D}_{hp} και την \mathbb{D}_c σταθερότητα. Όταν η δομή συνασπισμών είναι \mathbb{D}_{hp} σταθερή, τα μέλη των συνασπισμών δεν έχουν κανένα κίνητρο να προχωρήσουν σε περαιτέρω συνενώσεις ή διασπάσεις συνασπισμών. Η \mathbb{D}_c σταθερότητα μπορεί να επιτευχθεί δυσκολότερα αλλά συνοδεύεται από μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα καθώς, εξ ορισμού, εγγυάται το σχηματισμό μιας *μοναδικής* δομής συνασπισμών του \mathcal{N} , την οποία κανένας παίκτης δεν έχει το κίνητρο να απορρίψει επιλέγοντας τη δημιουργία μιας διαφορετικής, αφού η αξία που θα λάβει σε αυτήν την περίπτωση θα είναι χαμηλότερη από αυτή που μπορεί να του εγγυηθεί η \mathbb{D}_c σταθερή δομή.

Στο Κεφάλαιο 4 προτείνεται μία μέθοδος ομαδοποίησης κόμβων WSN που βασίζεται στους κανόνες σχηματισμού συνασπισμών που εισήγαγε η [132].

3.3 Παίγνια ελλιπούς πληροφόρησης

Η κλασική θεωρία παιγνίων βασίζεται στη συμμετοχή *λογικών* παικτών οι οποίοι δρουν έχοντας *πλήρη* γνώση του περιβάλλοντός τους. Επίσης, θεωρεί ότι οι παίκτες δεν γνωρίζουν τις αποφάσεις των υπόλοιπων παικτών του παιγνίου, δηλαδή οι αποφάσεις τους λαμβάνονται *παράλληλα* και κατά *κατανεμημένο* τρόπο.

Σύμφωνα τη θεωρία παιγνίων ένας παίκτης θεωρείται *λογικός* όταν οι αποφάσεις του αποσκοπούν στη *μεγιστοποίηση* του προσωπικού του οφέλους. Καθώς το περιβάλλον του παιγνίου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το όφελος που οι διαθέσιμες στρατηγικές αποφέρουν στους παίκτες, η ικανότητα των παικτών να λαμβάνουν λογικές αποφάσεις εξαρτάται *αποφασιστικά* από την αντίληψη που διαθέτουν για το περιβάλλον τους, δηλαδή την κατάσταση του παιγνίου. Ενώ σε πολλές περιπτώσεις η πλήρης γνώση του παιγνίου από τους παίκτες είναι δυνατή, υπάρχουν περιπτώσεις όπου κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό. Στις περιπτώσεις όπου οι παίκτες έχουν *ελλιπή* πληροφόρηση ως προς τις κινήσεις των υπολοίπων παικτών του παιγνίου, τα παίγνια καλούνται *παίγνια ελλιπούς πληροφόρησης* (games of incomplete information).

Ο τρόπος με τον οποίο οι παίκτες διαχειρίζονται την ελλιπή τους γνώση διαμορφώνει τις στρατηγικές που επιλέγουν, επηρεάζοντας σημαντικά την ανάλυση των παιγνίων ελλιπούς πληροφόρησης.

3.3.1 Ισορροπία Bayes

Η *ισορροπία Bayes* (Bayesian equilibrium) αντιπροσωπεύει τη συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο διαχείρισης της αβεβαιότητας των παικτών σε σχέση με το παίγνιο στο οποίο συμμετέχουν. Ισορροπία Bayes προκύπτει όταν οι παίκτες δεν έχουν στη διάθεσή τους τα χαρακτηριστικά των άλλων παικτών. Σύμφωνα με τον Harsanyi [133] ένα παίγνιο ελλιπούς πληροφόρησης μπορεί να αναλυθεί μαθηματικά με τη θεώρηση του *περιβάλλοντος* ως παίκτη του παιγνίου. Το περιβάλλον αντιστοιχεί σε κάθε παίκτη μία *τυχαία* μεταβλητή που μπορεί να λάβει τιμές από ένα σύνολο *τύπων* (types) που αντιπροσωπεύουν την άποψη του παίκτη για την άποψη που έχουν για το παίγνιο οι υπόλοιποι παίκτες. Κατά τη διάρκεια του παιγνίου, το περιβάλλον επιλέγει *τυχαία* τον τύπο κάθε παίκτη, αντίστοιχα προς τη κατανομή πυκνότητας πιθανότητας που καθορίζει το σύνολο των τύπων που είναι διαθέσιμοι στον παίκτη. Η σχετική μαθηματική διατύπωση επιτρέπει την έμμεση μετατροπή των παιγνίων ελλιπούς πληροφόρησης σε *παίγνια ατελούς πληροφόρησης* (games of imperfect information), δηλαδή παίγνια στα οποία οι παίκτες δεν έχουν επίγνωση των στρατηγικών κινήσεων που έχουν ήδη κάνει οι υπόλοιποι παίκτες του παιγνίου. Η μετατροπή αυτή βασίζεται στην έννοια της *κοινής εκ των προτέρων υπόθεσης* (common prior assumption) η οποία εκφράζει ότι οι διαφορές στην αντίληψη του παιγνίου από τους διάφορους παίκτες του οφείλεται στις διαφορές τους σε όρους πληροφόρησης και εμπειρίας [134]. Ουσιαστικά, ο Harsanyi μετέφρασε την *άγνοια*

των παικτών σε όρους τυχειότητας.

Τα παίγνια αυτού του είδους καλούνται παίγνια Bayes λόγω της πιθανοτικής ανάλυσης που καθορίζει τη διερεύνηση του παίγνιου. Βασιζόμενοι σε κάποιες αρχικές εκτιμήσεις τους ως προς τους τύπους (δηλαδή την εκτίμησή τους για την κατάσταση του παίγνιου) των υπόλοιπων παικτών (όπου η εκτίμηση αυτή εκφράζεται σε όρους κατανομής πιθανοτήτων), οι παίκτες βελτιώνουν τις εκτιμήσεις τους σύμφωνα με το νόμο του Bayes καθώς το παίγνιο εξελίσσεται, δηλαδή οι εκτιμήσεις των παικτών ανανεώνονται ανάλογα με τις κινήσεις των υπόλοιπων παικτών.

Με βάση τα προηγούμενα, ένα παίγνιο Bayes αποτελείται από

- Ένα σύνολο παικτών \mathcal{N}
- Ένα σύνολο κινήσεων (καθαρών στρατηγικών) για κάθε παίκτη $n_i \in \mathcal{N}$, $S_i \in \mathcal{S}$
- Ένα σύνολο τύπων για κάθε παίκτη $n_i \in \mathcal{N}$, $\theta_i \in \Theta_i$
- Μία συνάρτηση ωφέλειας για κάθε παίκτη n_i : $\pi_i(s_1, \dots, s_{|\mathcal{N}|}, \theta_1, \dots, \theta_{|\mathcal{N}|})$
- Μία κατανομή πιθανότητας $p(\theta_1, \dots, \theta_N)$ ορισμένη επί του συνόλου των διαθέσιμων τύπων των παικτών.

Σε πλήρη αντιστοιχία με τον ορισμό της ισορροπίας Nash, ένα στρατηγικό προφίλ S καλείται ισορροπία Bayes όταν για $\forall s_i(\theta_i) \in \mathcal{S}, \forall n_i \in \mathcal{N}, \forall \theta_i \in \Theta_i$ ισχύει ότι

$$s_i(\theta_i) \in \arg \max_{s'_i \in \mathcal{S}_i} \sum_{\theta_{-i}} p(\theta_{-i} | \theta_i) \cdot \pi_i(s'_i, s_{-i}(\theta_{-i}), \theta_i, \theta_{-i}) \quad (3.12)$$

όπου $s_i(\theta_i)$ είναι το στρατηγικό προφίλ του παίκτη $n_i \in \mathcal{N}$ όταν ο τύπος του είναι $\theta_i \in \Theta_i$.

Δηλαδή, μία ισορροπία Bayes είναι ένας συνδυασμός στρατηγικών προφίλ και πεποιθήσεων των παικτών για τις πεποιθήσεις των υπόλοιπων παικτών ο οποίος μεγιστοποιεί το αναμενόμενο όφελός τους δεδομένων των πεποιθήσεών τους και των (γνωστών) στρατηγικών κινήσεων των υπόλοιπων παικτών.

Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με την ισορροπία Bayes δίδονται στις παραπομπές [8, 116, 133].

3.3.2 Συσχετισμένη ισορροπία

Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο διαφοροποίησης της ισορροπίας Bayes από την απλή ισορροπία Nash είναι ότι η πρώτη εμμέσως θεωρεί ότι οι παίκτες μπορούν να ενημερώνονται για τις κινήσεις των υπόλοιπων παικτών του παίγνιου. Η *συσχετισμένη ισορροπία* (correlated equilibrium) αποτελεί ελαφρά διαφοροποίηση τόσο της ισορροπίας Nash όσο και της ισορροπίας Bayes κατά την οποία οι παίκτες επιδιώκουν τη μεγιστοποίηση του εκτιμώμενου

οφέλους τους. Η έννοια της συσχετισμένης ισορροπίας παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Robert J. Aumann [135].

Καίτοι η ισορροπία Nash είναι η πλέον συχνά χρησιμοποιούμενη έννοια ισορροπίας στη θεωρία παιγνίων, εντούτοις βασίζεται στην υπόθεση ότι όλοι οι παίκτες του παιγνίου λαμβάνουν τις στρατηγικές τους αποφάσεις έχοντας πλήρη γνώση του παιγνίου στο οποίο συμμετέχουν και αναλογιζόμενοι ότι όλοι οι παίκτες δρουν αποκλειστικά με τρόπο ώστε να είναι γνωστό σε όλους ποιά στρατηγική θα επιλέξουν, χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει συγκεκριμένη διαδικασία σχετικής πληροφόρησης. Επίσης, είναι ουσιαστικά ανακόλουθη με την αντικειμενική θεώρηση των παιγνίων που προωθεί η προσέγγιση Bayes, σύμφωνα με την οποία οι παίκτες υπολογίζουν τη βέλτιστη στρατηγική τους λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των πιθανών εξελίξεων του παιγνίου (όλους τους τύπους των παικτών). Στην παραπομπή [135] ορίζεται η συσχετισμένη ισορροπία ως άμεση προσπάθεια προσαρμογής στην πράξη των ισορροπιών Nash και Bayes.

3.3.2.1 Ορισμός της συσχετισμένης ισορροπίας

Έστω παίγνιο Γ αποτελούμενο από ένα σύνολο παικτών $\mathcal{N} = \{n_1, \dots, n_N\}$, $N = |\mathcal{N}|$ και ένα σύνολο καθαρών στρατηγικών $\mathcal{S} = \{S_1, \dots, S_N\}$ όπου S_i το σύνολο των διαθέσιμων καθαρών στρατηγικών του παίκτη n_i . Επίσης, έστω $\pi(n_i, s)$ το όφελος του παίκτη n_i δεδομένου του διανύσματος στρατηγικών που ακολουθούν οι παίκτες, $s = \{s_1, \dots, s_N\}$ και ας θεωρηθεί το σύνολο $\mathfrak{S} = S_1 \times \dots \times S_N$ ως το σύνολο όλων των πιθανών συνδυασμών των στρατηγικών των παικτών. Ως *συσχετισμένη στρατηγική* (correlated equilibrium) του παιγνίου Γ ορίζεται μια συνάρτηση f από ένα πεπερασμένο σύνολο των πιθανοτήτων \mathcal{P} στο \mathfrak{S} [135].

Η έννοια της συσχετισμένης στρατηγικής αποτελεί ουσιαστικά γενίκευση της μικτής στρατηγικής: και στις δύο περιπτώσεις, οι παίκτες λαμβάνουν τις αποφάσεις τους με βάση την παρατήρηση (φαινομενικά) τυχαίων γεγονότων. Εντούτοις, στο πλαίσιο των μικτών στρατηγικών τα τυχαία αυτά γεγονότα λογίζονται ως ανεξάρτητα, ενώ στην περίπτωση των συσχετισμένων στρατηγικών αυτό δεν ισχύει. Αντίθετα, οι παίκτες καθορίζουν τη στρατηγική τους βασιζόμενοι στην κοινή παρατήρηση μιας ή περισσότερων τυχαίων μεταβλητών $p \in \mathcal{P}$ ή αλλιώς *σημάτων* (signals). Στην απλούστερη περίπτωση, πλήρης συσχέτιση υπάρχει όταν όλοι παίκτες ενός παιγνίου βασίζονται στις αποφάσεις τους στην παρατήρηση αποκλειστικά ενός τυχαίου σήματος. Γενικότερα, πάντως, οι παρατηρήσεις των παικτών δεν είναι απαραίτητα πανομοιότυπες ή ανεξάρτητες μεταξύ τους: ένα τυχαίο σήμα p επιλέγεται τυχαία από το χώρο πιθανοτήτων \mathcal{P} και στη συνέχεια προτείνεται⁴ στους παίκτες η λήψη της απόφασης $f_i(p)$. Αν όλοι οι παίκτες ακολουθήσουν την πρόταση που τους έγινε, προκύπτει η συσχετισμένη στρατηγική $f(p) = \{f_1(p), \dots, f_N(p)\}$. Όπως γίνεται αντιληπτό, η συνάρτηση f ορίζεται ως μία

⁴Στο πλαίσιο της ανάλυσης Bayes η επιλογή του σήματος και η πρόταση στρατηγικής συμπεριφοράς προς τους παίκτες γίνεται με τυχαίο τρόπο από τον παίκτη-περιβάλλον.

πλειάδα (tuple) N τιμών. Αν ο παίκτης n_i αποφασίσει να μην ακολουθήσει την πρόταση που του έγινε και επιλέξει τη στρατηγική $f'_i(p)$, τότε η συσχετισμένη στρατηγική η

$$g(p) = (f_{-i}(p), f'_i(p)) = \{f_1(p), \dots, f_{i-1}(p), f'_i(p), f_{i+1}(p), \dots, f_N(p)\}$$

Σύμφωνα με τον ορισμό των παιγνίων Bayes, αν f είναι μία συσχετισμένη στρατηγική, τότε το όφελος ενός παίκτη προκύπτει από μια συνάρτηση $\pi(n_i, f) \in \mathbb{R}$ η οποία είναι, επίσης, τυχαία μεταβλητή, αφού η f ορίζεται επί του συνόλου τυχαίων μεταβλητών \mathcal{P} . Η f καλείται *συσχετισμένη ισορροπία* του Γ αν ισχύει

$$E\{\pi(n_i, f)\} \geq E\{\pi(n_i, (f_{-i}, f'_i))\}, \quad \forall n_i \in \mathcal{N}, f'_i \neq f_i \quad (3.13)$$

όπου η ποσότητα $E\{\pi(n_i, f)\}$ αντιπροσωπεύει το εκτιμώμενο κέρδος του παίκτη n_i δεδομένης της συσχετισμένης στρατηγικής f .

3.3.2.2 Σχολιασμός της συσχετισμένης ισορροπίας

Συχνά, για λόγους ευκολίας διατύπωσης και ανάλυσης ορίζεται ως *κατανομή* μιας συσχετισμένης στρατηγικής f μια συνάρτηση που αντιστοιχεί σε κάθε πλειάδα στρατηγικών s την πιθανότητα $Prob\{f^{-1}(s)\}$, η οποία αντιστοιχεί στην πιθανότητα επιλογής κάποιας εκ των πιθανών $f(s)$. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατός ο διαχωρισμός μεταξύ διαφορετικών συσχετισμένων στρατηγικών με τη βοήθεια των αντίστοιχων κατανομών πιθανότητας που αποδίδονται ανά στρατηγική και ανά παίκτη, ακριβώς όπως και στην περίπτωση των μικτών στρατηγικών. Με βάση την εναλλακτική αυτή έκφραση των συσχετισμένων στρατηγικών, αποδεικνύεται ότι οποιοσδήποτε *κυρτός* συνδυασμός ισορροπιών Nash αποτελεί αποδεκτή συσχετισμένη ισορροπία [135]. Έτσι, είναι δυνατή η εύρεση των συσχετισμένων στρατηγικών για πλήθος καλά μελετημένων παιγνίων, όπως το δίλημμα των φυλακισμένων (prisoners dilemma), το παίγνιο αετός-περιστέρι (hawk-dove game), η μάχη των φύλων (battle of the sexes) κ.α. [116].

Γενικά, η έννοια της συσχετισμένης στρατηγικής ενός παιγνίου είναι απλούστερη συγκριτικά με την ισορροπία Nash. Καίτοι πολλοί αλγόριθμοι, όπως ο Max^n , ο Paranoid ή ο MP-MIX [136, 137], έχουν προταθεί για τον υπολογισμό των ισορροπιών Nash ενός παιγνίου πολλών παικτών, εντούτοις βασίζονται κυρίως σε ευριστικές μεθόδους και δεν μπορούν να εγγυηθούν συστημική σταθερότητα. Επιπλέον, καθώς η έννοια της συσχετισμένης ισορροπίας δεν απαιτεί την ικανοποίηση όλων των περιορισμών της ισορροπίας Nash, ικανοποίηση που ενδεχομένως είναι ιδιαίτερα δύσκολη, ειδικά σε περιπτώσεις όπου εξωτερικοί παράγοντες επιβάλλουν πρόσθετους περιορισμούς, η εύρεση των συσχετισμένων ισορροπιών ενός παιγνίου είναι υπολογιστικά ευκολότερη σε σχέση με τις ισορροπίες Nash. Συγκεκριμένα, οι υποθέσεις ύπαρξης *λογικών* παικτών ή πλήρους γνώσης του παιγνίου συχνά δεν ισχύουν για όλους τους παίκτες του. Ενδεικτικά, στην περίπτωση της σχεδίασης ενός WSN, όπου οι

περιορισμοί στην κατανάλωση ενέργειας των κόμβων επιβάλλουν την ελαχιστοποίηση του πλήθους μηνυμάτων που ανταλλάσσουν μεταξύ τους, η πλήρης γνώση του δικτύου (άρα και του σχετικού παίγνιου) δεν είναι δυνατή.

Μια άλλη διαφοροποίηση της συσχετισμένης ισορροπίας σε σύγκριση με την ισορροπία Nash έγκειται στον τρόπο με τον οποίο λαμβάνονται οι αποφάσεις των παικτών. Σε αντίθεση με την ισορροπία Nash όπου οι παίκτες αποφασίζουν ταυτόχρονα τις στρατηγικές τους κινήσεις, η συσχετισμένη ισορροπία υπονοεί την ύπαρξη ενός μηχανισμού παραγωγής σημάτων (ανταλλαγής πληροφοριών) ο οποίος ενημερώνει τους παίκτες σχετικά με γεγονότα που μπορούν να επηρεάσουν τις στρατηγικές τους αποφάσεις. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η συσχέτιση μεταξύ των στρατηγικών των παικτών. Στο πλαίσιο των ενεργειακά περιορισμένων WSN, οι κόμβοι αναμένεται να δρουν με βάση τις πληροφορίες που διαθέτουν σχετικά με τη γειτονιά τους. Έτσι, είναι εύκολο να διαπιστωθεί η ισχύς των ιδιοτήτων εξαρτημένης ανεξαρτησίας Markov (Markov conditional independence properties) [138] που επιτρέπουν τη μαθηματική περιγραφή της στρατηγικής συμπεριφοράς των κόμβων ως *τοπικών τυχαίων πεδίων Markov* (Markov Random Fields, MRF). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγγραφείς της [139] αποδεικνύουν ότι ένα παίγνιο με χαρακτηριστικά τοπικών MRF μπορεί να ανιχνεύσει όλες τις δυνατές συσχετισμένες ισορροπίες. Έτσι, αποδεικνύεται ότι η ισότητα των κερδών των προσδοκωμένων οφελών των κόμβων σε γειτονιές κόμβων αρκεί για τη διασφάλιση της επίτευξης μιας συσχετισμένης ισορροπίας.

Βάσει των ανωτέρω ορισμών και παρατηρήσεων, στο Κεφάλαιο 5 προτείνεται η εφαρμογή της θεωρίας των συσχετισμένων στρατηγικών σε WSN πολλαπλών υπηρεσιών, αποσκοπώντας στη δίκαιη κατανομή των κόμβων του WSN στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες.

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή της Συνεργατικής Θεωρίας Παιγνίων στην Ομαδοποίηση Κόμβων

4.1 Εισαγωγή

Στο τέταρτο κεφάλαιο προτείνεται μία μέθοδος ομαδοποίησης κόμβων βασισμένη στη συνεργατική θεωρία παιγνίων που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.2.2. Η προτεινόμενη μέθοδος ομαδοποίησης αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας (lifetime) ενός WSN μέσω της ελαχιστοποίησης των εκπομπών μηνυμάτων πληροφοριών από τους κόμβους που το απαρτίζουν. Σύμφωνα με τη γενική λογική της χωρικής ομαδοποίησης κόμβων (βλ. εδάφιο 2.5.4), η μέθοδος που θα παρουσιασθεί αξιοποιεί την ύπαρξη χωρικής συσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων γειτονικών κόμβων αποσκοπώντας στη δημιουργία ομάδων συνεργατικών κόμβων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός WSN προσεγγίζεται ως πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης ομαδοποίησης κόμβων με στόχο τη μεγιστοποίηση του συνολικού οφέλους (αξίας) του δικτύου.

4.2 Διατύπωση του προβλήματος

Έστω ένα ετερογενές WSN αποτελούμενο από κόμβους δύο τύπων. Ο πρώτος τύπος περιλαμβάνει τυπικούς WS χαμηλών υπολογιστικών δυνατοτήτων οι οποίοι στη συνέχεια θα αποκαλούνται, όπως συνηθίζεται, απλώς *κόμβοι*. Ο δεύτερος τύπος κόμβων περιλαμβάνει κόμβους αυξημένων υπολογιστικών δυνατοτήτων και διάρκειας ζωής. Στη συνέχεια του κεφαλαίου οι κόμβοι αυτοί θα αποκαλούνται *αντιπρόσωποι*. Όπως αναλύεται στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια της έναρξης λειτουργίας του WSN ο κάθε κόμβος αντιστοιχίζεται αποκλειστικά σε έναν αντιπρόσωπο στον οποίο θα αναφέρει τις μετρήσεις του. Λόγω των αυξημένων υπολογιστικών και ενεργειακών δυνατοτήτων τους, οι αντιπρόσωποι μπορούν να δρουν είτε ως τοπικοί κόμβοι συγκέντρωσης (sink nodes), συλλέγοντας πληροφορίες από τους συνδεδε-

μένους σε αυτούς κόμβους, είτε ως συντονιστές των λειτουργιών των συνδεδεμένων προς αυτούς κόμβους ή ομάδων αυτών. Σε κάθε περίπτωση, οι συλλεγόμενες πληροφορίες/μετρήσεις μεταφέρονται κατά ad hoc τρόπο στην πύλη του WSN ή σε άλλους, συνολικούς κόμβους συγκέντρωσης. Το σύνολο των κόμβων συμβολίζεται ως $\mathcal{N} = \{n_1, \dots, n_N\}$, ενώ το σύνολο των αντιπροσώπων ως $\mathcal{R} = \{r_1, \dots, r_R\}$.

Η αξία $v_o(n_i, r_j)$ ενός μη συνεργατικού κόμβου $n_i \in \mathcal{N}$ που βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης ενός αντιπροσώπου $r_j \in \mathcal{R}$ ορίζεται ως ο αριθμός των δυνατών μεταδόσεων πληροφορίας από τον n_i στον r_j και συνδέεται προς την εκάστοτε διαθέσιμη ενέργειά του $E^r(n_i)$ μέσω της σχέσης

$$v_o(n_i, r_j) = \frac{E^r(n_i)}{E^t(n_i, r_j)} \quad (4.1)$$

όπου $E^t(n_i, r_j)$ είναι η ενέργεια που απαιτείται κατά μέσο όρο για τη μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας από τον κόμβο n_i σε κάποιο γειτονικό κόμβο του με απώτερο αποδέκτη τον αντιπρόσωπο r_j . Είναι φανερό ότι ο αριθμός των αντιπροσώπων $|\mathcal{R}|$ και η πυκνότητα της κατανομής των κόμβων επηρεάζουν σημαντικά τη γενικότερη σχεδίαση ενός WSN, καθώς οι δύο αυτοί παράγοντες καθορίζουν από κοινού τη μέση απόσταση μεταξύ των κόμβων, άρα και τη μέση τιμή της $E^t(n_i, r_j)$. Η προδιαγραφή ενός σχήματος δρομολόγησης είναι εκτός του στόχου της τρέχουσας διατριβής. Εντούτοις, οποιοδήποτε σχήμα δρομολόγησης με εφαρμογή σε αρχιτεκτονικές ομαδοποιημένων WSN μπορεί να εφαρμοσθεί παράλληλα με τον προτεινόμενο σχήμα για να βελτιώσει περαιτέρω τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου, μέσω της κατάλληλης επιλογής γειτόνων και, ακολούθως, κατάλληλης επιλογής τεχνικών προώθησης μηνυμάτων.

Στο πλαίσιο των μη συνεργατικών WSN, οι κόμβοι αναφέρουν τις μετρήσεις τους είτε περιοδικά είτε όταν η διαφορά μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Αν $L(n_i, r_j)$ και $F_t(n_i, r_j)$ είναι η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής και η απαιτούμενη συχνότητα εκπομπών του κόμβου n_i προς τον αντιπρόσωπο r_j , αντίστοιχα, τότε η μέση διάρκεια ζωής του κόμβου n_i δίδεται από τη σχέση

$$L(n_i, r_j) = \frac{v_o(n_i, r_j)}{F_t(n_i, r_j)} \quad (4.2)$$

Στην πλειοψηφία των εφαρμογών των WSN οι λαμβανόμενες από τους κόμβους μετρήσεις παρουσιάζουν έντονη χωροχρονική συσχέτιση (spatiotemporal correlation) [140], [141]. Η χρονική συσχέτιση επιτρέπει την εκτίμηση των μετρήσεων ενός κόμβου τη χρονική στιγμή t_x , με βάση σχετικές μετρήσεις που λήφθηκαν κάποια χρονική στιγμή προηγούμενη της t_x . Στην παρούσα διατριβή τα φαινόμενα χρονικής συσχέτισης που χαρακτηρίζουν τα φυσικά φαινόμενα που ελέγχονται από τους κόμβους δεν εξετάζονται. Εντούτοις, γίνεται η υπόθεση της χωροχρονικής εργοδικότητας των φαινομένων υπό παρακολούθηση: η σχέση μεταξύ των μετρήσεων δύο κοντινών κόμβων θεωρείται ότι παραμένει αναλλοίωτη στη διάρκεια μικρών

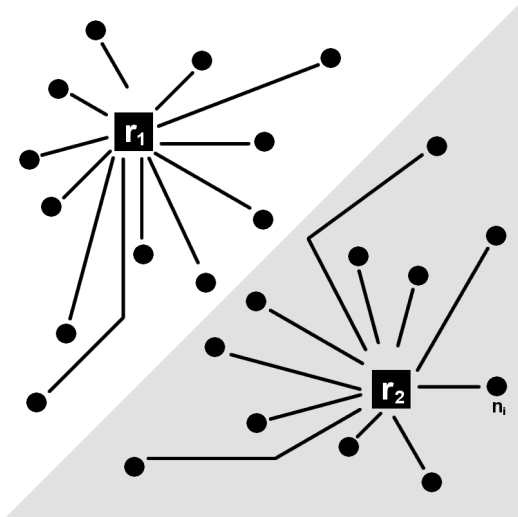
χρονικών διαστημάτων. Η ύπαρξη χωρικής συσχέτισης αναφέρεται στη δυνατότητα υπολογισμού μιας προσέγγισης αποδεκτής ακρίβειας των μετρήσεων ενός κόμβου με βάση τις αναφερόμενες μετρήσεις ενός άλλου κόμβου, υπό την προϋπόθεση ότι οι δύο κόμβοι είναι τοποθετημένοι σε επαρκώς μικρή απόσταση. Εξαιρώντας την περίπτωση ιδιόμορφων εδαφικών διαταραχών (όπως π.χ. σπηλαίων ή κρημνών) και υποθέτοντας συνεχή, ευκλείδειο χώρο, μία εναλλακτική ερμηνεία της χωρικής συσχέτισης βασίζεται στο ότι μετρήσεις κόμβων που βρίσκονται σε μικρή μεταξύ τους απόσταση παρουσιάζουν έντονη συσχέτιση. Συνήθως, ανάλογα με τη φύση του υπό παρακολούθηση φαινομένου, η συσχέτιση των μετρήσεων ακολουθεί συγκεκριμένη κατανομή ως προς την απόσταση μεταξύ των κόμβων. Έτσι, δεδομένης της διασφάλισης της επαρκούς ακρίβειας των μετρήσεων ομαδοποιημένων κόμβων, η ομαδοποίηση γειτονικών κόμβων μπορεί να οργανωθεί κατά τρόπο ώστε, όταν απαιτείται, μόνο ένας κόμβος-μέλος κάποιας ομάδας να αποστέλλει τις μετρήσεις του, εκπροσωπώντας τους υπόλοιπους κόμβους-μέλη της ίδιας ομάδας. Ο τρόπος σύμφωνα με τον οποίο οι περιορισμοί ακριβείας καθορίζουν το επιτρεπόμενο μέγεθος (πλήθος κόμβων) των ομάδων καθώς και τη συχνότητα αποστολής μετρήσεων από τα μέλη τους εξαρτάται από την κατανομή της χωρικής συσχέτισης που χαρακτηρίζει το φυσικό υπό παρακολούθηση φαινόμενο.

Η μετάβαση από τη μη συνεργατική στη συνεργατική συμπεριφορά των κόμβων επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην ανάλυση που σχετίζεται με την αξία των κόμβων. Όταν κάποιος κόμβος είναι μέλος μιας ευρύτερης οντότητας (ομάδας), η αξία του προκύπτει από την *πρόσθετη* αξία την οποία η συνεργατική του δράση προσφέρει στο σύνολο των υπόλοιπων μελών της ομάδας και, επομένως, στο WSN συνολικά. Συνεπώς, η συνεργατική αξία ενός μη συνεργατικού κόμβου είναι μηδενική και η εγγενής αξία του είναι, ενδεχομένως, θετική. Εξάλλου, η αξία ενός συνεργατικού κόμβου-μέλους μιας ομάδας εξαρτάται από το πόσο τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας επωφελούνται από τη συμμετοχή του κόμβου στην ομάδα. Ακολουθώντας την ορολογία της συνασπιστικής θεωρίας παιγνίων, οι ομάδες κόμβων, οι οποίες δημιουργούνται ως αποτέλεσμα της διάδρασης και συνεργασίας των κόμβων του WSN, στη συνέχεια θα ονομάζονται συνασπισμοί (βλ. εδάφιο 3.2.2).

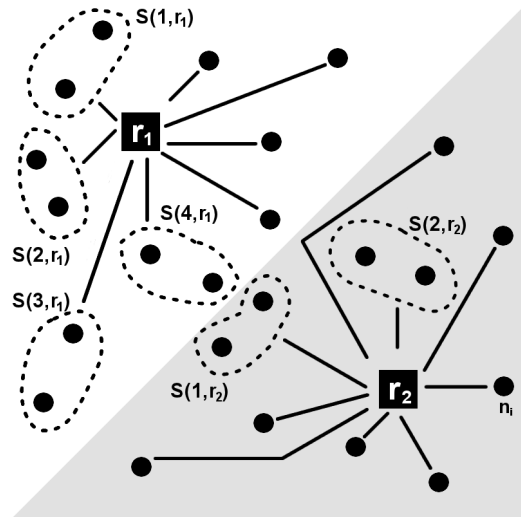
Η θεμελίωση και δυναμική αυτού του είδους συνεργασίας μεταξύ των κόμβων στο πλαίσιο της προσπάθειας δημιουργίας συνασπισμών αποτελεί το αντικείμενο της προτεινόμενης μεθόδου η οποία χαρακτηρίζεται από τρεις διακριτές φάσεις, συγκεκριμένα τις φάσεις έναρξης (λειτουργίας), βελτιστοποίησης και σταθερής λειτουργίας. Η εξέλιξη της προτεινόμενης διαδικασίας ομαδοποίησης των κόμβων απεικονίζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 4.1, ενώ η σχετική ορολογία παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.

4.3 Η φάση έναρξης λειτουργίας

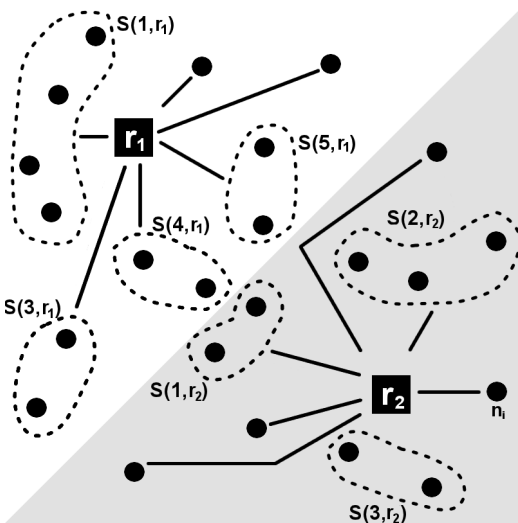
Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής, οι αντιπρόσωποι αποστέλλουν μηνύματα μικρού μεγέθους για να ειδοποιήσουν τους κόμβους σχετικά με την ύπαρξή τους. Ακολουθώντας, κάθε



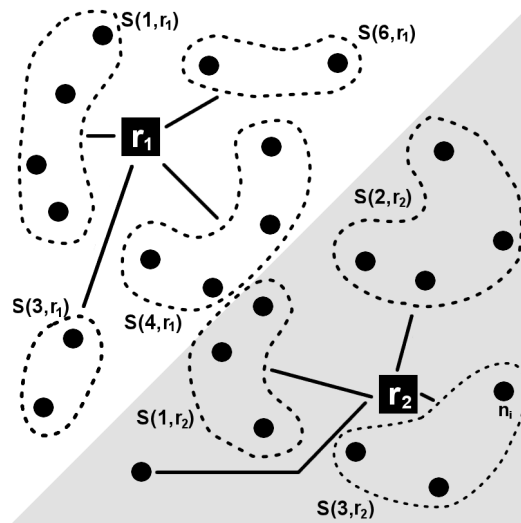
(α) Αρχική εγκατάσταση του WSN.



(β) Κατά τη φάση της έναρξης λειτουργίας δημιουργούνται οι πρώτοι συνασπισμοί.



(γ) Οι κόμβοι δεν έχουν πλέον τη δυνατότητα να ενσωματωθούν σε διαφορετικό συνασπισμό από αυτόν όπου ήδη ανήκουν. Έναρξη της φάσης βελτιστοποίησης.



(δ) Τέλος της φάσης βελτιστοποίησης. Η βέλτιστη ομαδοποίηση κόμβων έχει ήδη επιτευχθεί, σηματοδοτώντας την έναρξη της φάσης σταθερής λειτουργίας.

Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση της προτεινόμενης διαδικασίας σχηματισμού συνασπισμών. Οι κόμβοι αναπαριστώνται από κύκλους, ενώ τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε αντιπροσώπους.

Συμβολισμός	Περιγραφή
\mathcal{N}	Το σύνολο όλων των κόμβων του WSN
\mathcal{S}	Το σύνολο όλων των συνασπισμών
q	Παράμετρος ποιότητας υπηρεσίας που καθορίζει την ελάχιστη αποδεκτή ακρίβεια των αναφορών των μετρήσεων των κόμβων
n_i	Κόμβος με ταυτότητα i .
r_j	Αντιπρόσωπος με ταυτότητα j
$\mathcal{S}(k, r_j)$	Συνασπισμός με ταυτότητα k , περιέχων κόμβους που αναφέρουν τις μετρήσεις τους στον αντιπρόσωπο r_j
$v_o(n_i, r_j)$	Μη συνεργατική αξία του κόμβου n_i , ο οποίος αναφέρει τις μετρήσεις του στον αντιπρόσωπο r_j
$v(n_i, k, r_j)$	Αξία του κόμβου n_i , υπαγόμενου στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$
$V(k, r_j)$	Αξία του συνασπισμού $\mathcal{S}(k, r_j)$
$f(d(n_i, k), q)$	Σχετική ακρίβεια των μετρήσεων του κόμβου n_i , όταν αυτός υπάγεται στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$
$d(n_i, k)$	Βαθμός διαφοροποίησης πληροφορίας μεταξύ των μετρήσεων του κόμβου n_i και του κόμβου-εκκινήτη του συνασπισμού $\mathcal{S}(k, r_j)$
X_i	Μέτρηση του κόμβου n_i
$C(x)$	Βαθμός ομοιότητας πληροφορίας ως συνάρτηση της απόστασης x μεταξύ δύο κόμβων του WSN
\hat{x}	Εκτίμηση της ποσότητας x
$ x $	Βαθμός της οντότητας x

Πίνακας 4.1: Ορολογία κεφαλαίου

κόμβος προσδιορίζει τον πλησιέστερο σε πλήθος βημάτων αντιπρόσωπο, προς στον οποίο θα προσδεθεί λειτουργικά και θα αποστέλλει τις μετρήσεις του. Ταυτόχρονα, οι κόμβοι αναμεταδίδουν σύντομα μηνύματα με σκοπό να εντοπίσουν το σύνολο των κόμβων που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς τους, οι οποίοι στη συνέχεια θα ονομάζονται γείτονες. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αναγνώρισης των γειτόνων τους, οι κόμβοι λαμβάνουν μία μέτρηση επί του φαινομένου που παρακολουθούν. Έπειτα, κάθε κόμβος εκπέμπει προς τους γείτονές του μηνύματα διαπραγμάτευσης στην προσπάθεια δημιουργίας των πρώτων συνασπισμών. Τα μηνύματα αυτά περιέχουν πληροφορίες σχετικές με τη μέτρηση του κόμβου-αποστολέα, το πλήθος των γειτόνων του, το οποίο στη συνέχεια θα ονομάζεται *βαθμός* του κόμβου, καθώς και την απόστασή του, μετρούμενη σε πλήθος βημάτων, από τον κόμβο που εκκίνησε τη δημιουργία του συνασπισμού όπου ανήκει ο κόμβος-αποστολέας¹. Κάθε μήνυμα διαπραγμάτευσης αποτελεί πρόσκληση από τον κόμβο αποστολέα για συμμετοχή στο συν-

¹Στην περίπτωση όπου ένας κόμβος ορίζει ένα συνασπισμό με ένα μόνο μέλος –τον ίδιο τον κόμβο– η απόσταση αυτή είναι μηδενική.

ασπισμό όπου αυτός υπάγεται. Οι κόμβοι που λαμβάνουν τα μηνύματα διαπραγμάτευσης καλούνται να αποφασίσουν αν θα κάνουν αποδεκτή τη σχετική πρόταση συμμετοχής στο συνασπισμό, ή αν θα την απορρίψουν, ακολουθώντας τον απλό κανόνα συγχωνεύσεων που παρουσιάζεται στην παραπομπή [132]. Έτσι, κατά τη διάρκεια της έναρξης λειτουργίας δεν είναι δυνατή η συγχώνευση δύο μη μοναδιαίων συνασπισμών, δηλαδή ένας μη μοναδιαίος συνασπισμός έχει το δικαίωμα να απορροφήσει μόνο ένα μοναδιαίο συνασπισμό (μεμονωμένο κόμβο) κάθε φορά. Η συγχώνευση μεταξύ δύο μοναδιαίων συνασπισμών είναι δυνατή. Σε κάθε περίπτωση, οι κόμβοι που δεν ανήκουν σε κάποιο συνασπισμό λογίζονται ως μοναδιαίοι συνασπισμοί. Πρέπει, επίσης, να επισημανθεί ότι και οι δύο οντότητες που λαμβάνουν μέρος σε μία συγχώνευση πρέπει να αναφέρονται στον ίδιο αντιπρόσωπο.

Έστω ότι μία διαδικασία διαπραγμάτευσης πραγματοποιείται μεταξύ ενός μη συνασπισμένου κόμβου $n_i \in \mathcal{N}$ που ορίζει το μοναδιαίο συνασπισμό $\mathcal{S}(i, r_j)$ και ενός εκ των γειτόνων του, έστω κόμβου n_p , που ανήκει στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$, $|\mathcal{S}(k, r_j)| \geq 1$. Στο πλαίσιο της διαπραγμάτευσης, ο κόμβος n_i υπολογίζει την *εκτιμώμενη αξία* (συνεργατικό κέρδος) $\hat{v}(n_i, k, r_j)$ που θα αποκομίσει εφόσον συγχωνευθεί στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$. Αν αυτή είναι μεγαλύτερη από την τρέχουσα αξία του (μη συνεργατικό κέρδος) $v_o(n_i, r_j)$, ο n_i αντιλαμβάνεται τη συγχώνευση ως επωφελή. Αντίστοιχα, ο κόμβος n_p υπολογίζει την προσδοκώμενη διαφορική αξία του συνασπισμού $\mathcal{S}(k, r_j)$ στην περίπτωση όπου ο κόμβος n_i συμμετάσχει στο συνασπισμό. Εφόσον αυτή η διαφορική αξία είναι θετική, η συγχώνευση είναι επωφελής και για το συνασπισμό. Αν και οι δύο διαπραγματευόμενες οντότητες θεωρούν επωφελή τη συγχώνευση, ο κόμβος n_i γίνεται αποδεκτός στο συνασπισμό. Στην αντίθετη περίπτωση, η διαπραγμάτευση είναι άκαρπη και ο n_i παραμένει σε μη συνεργατική κατάσταση. Στην περίπτωση επιτυχούς διαπραγμάτευσης, η αξία του προηγουμένως μη συνεργατικού κόμβου γίνεται $\hat{v}(n_i, k, r_j)$. Μετά την επιτυχή διαπραγμάτευση και ενσωμάτωσή του στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$, ο n_i , όπως και οι υπόλοιποι κόμβοι-μέλη του $\mathcal{S}(k, r_j)$, εκπέμπει μηνύματα διαπραγμάτευσης προς τους γείτονές του, στην προσπάθεια επέκτασης του συνασπισμού, προσδοκώντας περαιτέρω αύξηση της δικής του, συνεργατικής πλέον, αξίας. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι όλοι οι κόμβοι να έχουν διαπραγματευθεί τουλάχιστον μία φορά με όλους τους γείτονές τους την αποδοχή τους σε κάποιο συνασπισμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι κόμβος που ανήκει σε κάποιο συνασπισμό μπορεί να λάβει πρόσκληση να συμμετάσχει σε άλλο συνασπισμό και ενδεχομένως αποχωρήσει από αυτόν στον οποίο ήδη ανήκει. Στην περίπτωση αυτή, η προηγούμενη ανάλυση ισχύει χωρίς διαφοροποίηση.

Η διαδικασία διαπραγμάτευσης για τη δημιουργία συγχωνεύσεων ακολουθεί την ωφελιμιστική διάταξη καθώς λαμβάνεται υπόψη μόνο η συνολική συνεργατική αξία των διαπραγματευομένων οντοτήτων. Η προτίμηση στην ωφελιμιστική διάταξη έναντι της Pareto διάταξης βασίζεται στην εν γένει αρχιτεκτονική του WSN και στο σύνολο των στόχων βελτιστοποίησης που έχει το προτεινόμενο σχήμα ομαδοποίησης. Καθώς τα σημεία ισορροπίας δυναμικών παιγνίων δεν χαρακτηρίζονται από ταχεία σύγκλιση και σταθερότητα [129], η

σχεδίαση δυναμικών σχημάτων ομαδοποίησης που χαρακτηρίζονται από ταχεία σύγκλιση και συστημική σταθερότητα δεν είναι εύκολη. Αντίστοιχα προς την εφαρμογή, η σχεδίαση ενός WSN θα ευνοεί είτε την αυξημένη ικανότητα προσαρμογής του στις αλλαγές του εσωτερικού ή εξωτερικού του περιβάλλοντος είτε την ταχεία σύγκλιση και σταθερότητά του. Σύμφωνα με την οργανωτική συμπεριφορά κατά Pareto, οποιοσδήποτε κόμβος ενός συνασπισμού θα μπορούσε να εμποδίσει την ενσωμάτωση ενός άλλου κόμβου εφόσον η ενσωμάτωση αυτή είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της αξίας του. Κάτι τέτοιο θα μείωνε το πλήθος των διαθέσιμων επιλογών συγχώνευσης, οδηγώντας σε σχήματα ομαδοποίησης ταχύτατης σύγκλισης στο σημείο ισορροπίας της λειτουργίας του WSN, αλλά μειωμένης επίδοσης, καθώς θα προέκυπταν πολυάριθμοι, μικροί σε πλήθος κόμβων συνασπισμοί. Αντίστοιχα, καθώς η δυνατότητα των κόμβων να αποκλείουν άλλους κόμβους με κριτήριο το ατομικό τους όφελος επηρεάζει σημαντικά τη συνολική εξέλιξη της διαδικασίας ομαδοποίησης, η τελευταία θα ήταν ιδιαίτερα σταθερή. Εντούτοις, σε δυναμικά περιβάλλοντα όπου οι επιδόσεις των WSN καθορίζονται κατά κύριο λόγο από την ικανότητα προσαρμογής τους, η συμπεριφορά των κόμβων που επιβάλλεται από την οργανωτική συμπεριφορά κατά Pareto θα περιόριζε τα προσδοκώμενα κέρδη από την εφαρμογή του σχήματος ομαδοποίησης. Εξάλλου, η μεγιστοποίηση της συνολικής αξίας ενός συνασπισμού που προτείνεται από την ωφελμιστική διάταξη είναι καταλληλότερη για δυναμικά περιβάλλοντα, καθώς η δυνατότητα αποκλεισμού νέων κόμβων περιέρχεται στην πλειοψηφία των κόμβων, χαλαρώνοντας τους περιορισμούς που καθορίζουν τη διαπραγμάτευση για την αποδοχή νέων κόμβων. Κατ' αυτό τον τρόπο, η διαδικασία ομαδοποίησης οδηγείται στη δημιουργία μεγαλύτερων συνασπισμών ενώ, παράλληλα, διατηρείται ακέραιη η δυνατότητα προσαρμογής της λειτουργίας του WSN στις μεταβολές του περιβάλλοντος. Μία άλλη σημαντική παρενέργεια της οργανωτικής συμπεριφοράς κατά Pareto είναι απόρροια της δυνατότητας κάθε συνασπισμένου κόμβου να αποκλείει την αποδοχή νέων: ένας συνασπισμένος κόμβος μπορεί να αποφασίσει αν μία συγχώνευση τον ευνοεί ή όχι μόνο όταν έχει πλήρη γνώση τόσο του συνολικού συνασπισμού όσο και των χαρακτηριστικών του υποψήφιου προς ενσωμάτωση κόμβου. Αυτό απαιτεί την αύξηση των εκπομπών μηνυμάτων πληροφορίας που ανταλλάσσονται από τους κόμβους, επίπτωση που βρίσκεται σε αντίθεση προς την ανάγκη ελαχιστοποίησης της διακινούμενης πληροφορίας. Συμπερασματικά, καθώς η διαδικασία αποδοχής σύμφωνα με την ωφελμιστική οργανωτική συμπεριφορά ευνοεί την προσαρμοστικότητα του WSN, σε αντίθεση με την προσέγγιση απόρριψης που εκφράζει η οργανωτική συμπεριφορά κατά Pareto που ευνοεί τη σταθερότητα και την ταχεία σύγκλιση σε βάρος της δυνατότητας άμεσης προσαρμογής στις αλλαγές του εξωτερικού ή εσωτερικού περιβάλλοντος του WSN, η υιοθέτηση της ωφελμιστικής διάταξης προτιμάται όταν επιζητείται σχηματισμός δυναμικών συνασπισμών κόμβων.

4.3.1 Ανάλυση της αξίας των κόμβων

Για να ληφθούν υπόψη οι αντιτιθέμενοι παράγοντες που καθορίζουν το σχηματισμό συνασπισμών, η εκτιμώμενη αξία $\hat{v}(n_i, k, r_j)$ ενός κόμβου n_i μετά την αποδοχή του στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ γράφεται

$$\hat{v}(n_i, k, r_j) = (|\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_i} - 1) \cdot f(d(n_i, k), q) \quad (4.3)$$

όπου $|\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_i}$ είναι η εκτίμηση του κόμβου n_i σχετικά με το μέγεθος του συνασπισμού $\mathcal{S}(k, r_j)$ και $f(d(n_i, k), q)$ συνάρτηση που συνδέει την αξία ενός κόμβου με την απαιτούμενη ακρίβεια της πληροφορίας. Η παράμετρος $d(n_i, k)$ της $f(d(n_i, k), q)$ καταδεικνύει την απόκλιση της μέτρησης του κόμβου n_i από την αντίστοιχη του κόμβου-εκκινήτη του $\mathcal{S}(k, r_j)$, ενώ η παράμετρος q υλοποιεί τον περιορισμό ακρίβειας που ορίζει την αποδεκτή λειτουργία του WSN. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη συνάρτηση $f(d(n_i, k), q)$ παρέχονται στο εδάφιο 4.3.2.

Ο πρώτος παράγοντας στη (4.3) ποσοτικοποιεί το κίνητρο των κόμβων να επεκτείνουν το συνασπισμό στον οποίο υπάγονται ενώ ο δεύτερος παράγοντας ποσοτικοποιεί τον τρόπο με τον οποίο η απαιτούμενη ακρίβεια των αναφορών των κόμβων περιορίζει την επέκταση των συνασπισμών. Το προτεινόμενο παίγνιο δημιουργίας συνασπισμών αποσκοπεί στη διαχείριση της αντίθετης συμπεριφοράς των δύο αυτών παραγόντων καθώς ο πρώτος ευνοεί την επέκταση των συνασπισμών ενώ ο δεύτερος καθορίζει το εύρος (μέγεθος) της επέκτασης αυτής, σύμφωνα με τα κριτήρια ποιότητας που ορίζουν τη λειτουργία του WSN.

Καθώς ο παράγοντας ακρίβειας $f(d(n_i, k), q)$ δεν είναι μεταβιβάσιμος και εξαρτάται από τις μετρήσεις του κόμβου n_i και του κόμβου-εκκινήτη του συνασπισμού $\mathcal{S}(k, r_j)$, η (4.3) συνεπάγεται ότι, κατά τη διάρκεια της έναρξης λειτουργίας το υπό διατύπωση συνασπιστικό παίγνιο είναι NTU (βλ. εδάφιο 3.2.2). Επιπλέον, ενώ υπάρχει μια σειρά προτίμησης σε σχέση με τους διάφορους συνασπισμούς στους οποίους ο n_i μπορεί να προσχωρήσει, ο τελευταίος δεν έχει τη δυνατότητα, λόγω του παράγοντα ακρίβειας, να υπολογίσει με ακρίβεια αυτή τη σειρά προτίμησης. Ενδεικτικά, ο κόμβος n_i μπορεί να προτιμά την προσχώρησή του στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ αντί του συνασπισμού $\mathcal{S}(m, r_j)$. Δεν μπορεί, όμως, να προσδιορίσει πόσο περισσότερο προτιμά τον $\mathcal{S}(k, r_j)$ έναντι του $\mathcal{S}(m, r_j)$, καθώς ένα οριστικό, εκ των προτέρων γνωστό, μέτρο σύγκρισης (metric) που θα μπορούσε να επιτρέψει τη μεταφορά αξίας ή έστω τον ακριβή υπολογισμό της αξίας ενός συνασπισμού, δεν είναι διαθέσιμο στους κόμβους.

Η διατύπωση μαθηματικού υποδείγματος –μοντέλου– για το συνασπιστικό παίγνιο ως NTU προϋποθέτει ότι το παίγνιο \mathcal{V} αποδίδει στους κόμβους ένα σύνολο τιμών που εξαρτώνται από κοινού από τις αποφάσεις των κόμβων του WSN και από το μαθηματικό υπόδειγμα που περιγράφει την κατανομή των μετρήσεων των κόμβων του WSN. Σύμφωνα με την [8], ένα παίγνιο NTU ορίζεται ως μία πλειάδα οντοτήτων $\langle \mathcal{N}, \mathcal{X}, \mathcal{V}, (\succ_i)_{i \in \mathcal{N}} \rangle$ όπου \mathcal{N} είναι το

σύνολο των παικτών (κόμβων), \mathbf{X} είναι το σύνολο των δυνατών κατανομών αξίας, v είναι είναι συνάρτηση που αποδίδει σε κάθε πιθανό συνασπισμό \mathbf{S} ένα διάνυσμα αξιών $\mathcal{V}(\mathbf{S}) \subseteq \mathbf{X}$ και $(\succ_i)_{i \in \mathcal{N}}$ είναι μια σειρά προτίμησης του παίκτη i στο σύνολο των δυνατών κατανομών αξίας.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, το παίγνιο \mathcal{V} εκφράζεται μέσω της

$$\mathcal{V}(\mathbf{S}(k, r_j)) = \left\{ \hat{v}(n_i, k, r_j) \mid n_i \in \mathbf{S}(k, r_j), \mathbf{S}(k, r_j) \in \tilde{\mathcal{S}}, r_j \in \mathcal{R} \right\} \quad (4.4)$$

όπου $\tilde{\mathcal{S}}$ είναι το σύνολο όλων των δυνατών συνασπισμών. Η σειρά προτίμησης $(\succ_i)_{i \in \mathcal{N}}$ των κόμβων προκύπτει αμέσως από τον ορισμό της (4.3). Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια των πρώτων βημάτων της έναρξης λειτουργίας, όταν οι κόμβοι δεν έχουν αλληλεπιδράσει με όλους τους γείτονες, η γνώση αυτής της σειράς προτίμησης από τους κόμβους είναι ελλιπής. Καθώς η φάση της έναρξης λειτουργίας συνεχίζεται και οι κόμβοι αποκτούν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη γειτονιά τους, η γνώση της $(\succ_i)_{i \in \mathcal{N}}$ σταδιακά αποκαθίσταται στους κόμβους.

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση που είχε ως στόχο να δείξει πώς μπορεί να αξιοποιηθεί η χωρική συσχέτιση των υπό παρατήρηση φαινομένων, είναι δυνατή η υπόθεση ότι κάποια τυχαία χρονική στιγμή, όλα τα μέλη ενός συνασπισμού έχουν λάβει παραπλήσιες μετρήσεις. Το μέγεθος της διαφοράς αυτών των μετρήσεων εξαρτάται από: (1) τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της χωρικής συσχέτισης που καταδεικνύει τη φύση του υπό παρακολούθηση φαινομένου και (2) από την ακρίβεια των μετρήσεων που καθιστά αποδεκτή τη λειτουργία του WSN. Λόγω της χωρικής συσχέτισης του υπό παρακολούθηση φαινομένου, δεν είναι απαραίτητο σε κάθε χρονική στιγμή αναφοράς να αναφέρονται οι μετρήσεις όλων των κόμβων που συμμετέχουν στον ίδιο συνασπισμό και, ακολούθως, να εφαρμόζονται τεχνικές συγκέντρωσης πληροφορίας (in-line aggregation). Αντίθετα, για κάθε χρονική στιγμή αναφοράς, αρκεί ο αντιπρόσωπος κάθε συνασπισμού να λαμβάνει τη μέτρηση ενός μόνο κόμβου-μέλους του. Η επιλογή του κόμβου που θα αναφέρει σε κάθε χρονική στιγμή αναφοράς τη μέτρησή του στον αντιπρόσωπό του γίνεται πιθανοτικά, με πιθανότητα αναφοράς ομοιόμορφα κατανομημένη στη διάρκεια ενός κύκλου αναφορών των κόμβων-μελών του συνασπισμού. Η διάρκεια αυτού του κύκλου αυξάνει γραμμικά με το μέγεθος του συνασπισμού $|\mathbf{S}(k, r_j)|$. Καίτοι τα μέλη ενός συνασπισμού πραγματοποιούν τις μετρητικές τους δραστηριότητες περιοδικά με συχνότητα F_{th} , δεν μεταδίδουν τα σχετικά δεδομένα μετά το πέρας κάθε μέτρησης. Στην πραγματικότητα, οι κόμβοι αναφέρουν τις μετρήσεις τους πολύ λιγότερο συχνά σε σχέση με τη μη συνεργατική λειτουργία τους, και μάλιστα με μέση πιθανότητα αποστολής p_t αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους του συνασπισμού στον οποίον ανήκουν, δηλαδή $p_t = 1/|\mathbf{S}(k, r_j)|$. Έτσι, η μέση συχνότητα αναφοράς των κόμβων μειώνεται σε $F_{th}/|\mathbf{S}(k, r_j)|$, βελτιώνοντας σημαντικά τη συνολική ενεργειακή αυτονομία του WSN τόσο λόγω των σημαντικά μειωμένων σε πλήθος εκπομπών μηνυμάτων όσο και λόγω της αποφυγής των λειτουργιών συγκέντρωσης πληροφορίας.

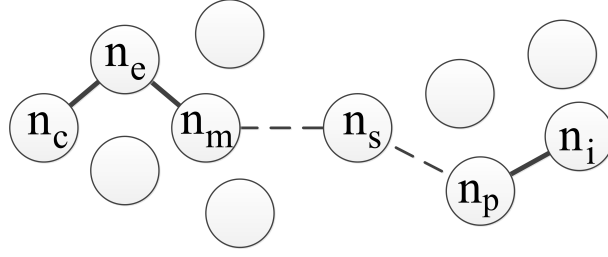
Ο παράγοντας $|\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_i} - 1$ που εμφανίζεται στη (4.3) υλοποιεί την προτεινόμενη διαδικασία αναφοράς μετρήσεων καταδεικνύοντας ότι κάθε κόμβος-μέλος μπορεί να προσφέρει στα υπόλοιπα μέλη του συνασπισμού αξία ανάλογη του μεγέθους του τελευταίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, λαμβάνεται ποσοτικά υπόψη η πολλαπλασιαστική φύση της αύξησης της αξίας των κόμβων στο πλαίσιο της συνεργατικής τους συμπεριφοράς που απορρέει από την αξιοποίηση της χωρικής συσχέτισης του υπό παρακολούθηση φαινομένου.

Η εκτίμηση του μεγέθους του συνασπισμού βασίζεται στην υπόθεση ότι οι θέσεις των κόμβων εντός της περιοχής κάλυψης περιγράφονται ως τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν τη σημειακή κατανομή Poisson (Poisson point process) [142]. Ως εκ τούτου, οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα μιας αποδεκτά ακριβούς εκτίμησης σχετικά με το μέσο βαθμό των κόμβων που απαρτίζουν το WSN. Υποθέτοντας ότι n_i είναι ο τελευταίος κόμβος που ενσωματώθηκε στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ και ότι βρίσκεται σε απόσταση m βημάτων από τον κόμβο-εκκινήτη, $n_c = n_c(k, r_j)$, το εκτιμώμενο από τον κόμβο n_i μέγεθος του συνασπισμού προκύπτει $|\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_i} = |n_i| \cdot m^2$ [143]. Προκειμένου να γίνει η εκτίμηση του $|\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_i}$ λιγότερο εξαρτημένη από τοπικές διαταραχές της πυκνότητας των κόμβων, προτείνεται μια απλή αναδρομική σχέση η οποία αποσκοπεί στην περισσότερο ρεαλιστική προσέγγιση του μέσου βαθμού των κόμβων στο WSN. Ας υποτεθεί ότι ο κόμβος n_i προσχωρεί στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ μετά από πρόσκληση του μέλους n_p . Επίσης, έστω ότι οι κόμβοι n_i και n_p βρίσκονται σε απόσταση m και $m - 1$ βημάτων από τον κόμβο n_c , αντίστοιχα. Τότε, ο n_i εκτιμά το μέσο βαθμό, $|\widehat{n_i}|$, των κόμβων που ανήκουν στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ (συμπεριλαμβανομένου και του εαυτού του), βασιζόμενος στον εκτιμώμενο βαθμό του n_p , $\widehat{n_p}$, και στο δικό του *πραγματικό* βαθμό, $|n_i|$, μέσω της σχέσης

$$|\widehat{n_i}| = \lambda \cdot |\widehat{n_p}| + (1 - \lambda) \cdot |n_i|, \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (4.5)$$

Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό, η τιμή του $|\widehat{n_i}|$ ενσωματώνει, μέσω του $|\widehat{n_p}|$, τον πραγματικό βαθμό όλων των κόμβων που έχουν μέχρι εκείνη τη στιγμή γίνει αποδεκτοί από τον $\mathcal{S}(k, r_j)$ και αποτελούν μέρος της διαδρομής που συνδέει τον n_i με τον n_c . Με βάση το Σχήμα 4.2 που απεικονίζει την εξέλιξη ενός συνασπισμού η δημιουργία του οποίου ξεκίνησε από τον κόμβο-εκκινήτη n_c και επεκτάθηκε μέχρι την αποδοχή του κόμβου n_i , η (4.5) μπορεί διαδοχικά να γραφεί ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} |\widehat{n_i}| &= \lambda \cdot |\widehat{n_p}| + (1 - \lambda) \cdot |n_i| \\ &= \lambda^2 \cdot |\widehat{n_s}| + \lambda(1 - \lambda) \cdot |n_p| + (1 - \lambda) \cdot |n_i| \\ &\dots \\ &= \lambda^{m-1} \cdot |\widehat{n_c}| + \lambda^{m-1}(1 - \lambda) \cdot |n_e| + \dots + \lambda(1 - \lambda) \cdot |n_p| + (1 - \lambda) \cdot |n_i| \\ &= \lambda^{m-1} \cdot |n_c| + \lambda^{m-1}(1 - \lambda) \cdot |n_e| + \dots + \lambda(1 - \lambda) \cdot |n_p| + (1 - \lambda) \cdot |n_i| \end{aligned} \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.2: Εξέλιξη ενός συνασπισμού ο σχηματισμός του οποίου εκκίνησε από τον κόμβο n_c και επεκτάθηκε μέχρι την αποδοχή του κόμβου n_i

Η εκτίμηση του μέσου βαθμού του κόμβου-εκκινήτη του συνασπισμού είναι ο πραγματικός του βαθμός ($\widehat{|n_c|} = \lambda \cdot |n_c| + (1 - \lambda) \cdot |n_c| = |n_c|$). Βάσει της εκτίμησης του βαθμού των κόμβων που έχουν ήδη γίνει αποδεκτοί στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$, η (4.5) καθιστά την εκτίμηση της αξίας των κόμβων μέσω της (4.3) λιγότερο εξαρτημένη από τοπικές διαταραχές πυκνότητας κόμβων και, άρα, περισσότερο ακριβή. Η αποδοχή του κόμβου n_i θέτει προσωρινά την ακτίνα του συνασπισμού ίση με m βήματα. Επομένως, το εκτιμώμενο μέγεθος του συνασπισμού προκύπτει

$$|\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_i} = \widehat{|n_i|} \cdot m^2 \quad (4.7)$$

4.3.2 Ανάλυση ακρίβειας

Μέσω του παράγοντα ακρίβειας $f(d(n_i, k), q)$, ο οποίος εφεξής θα ονομάζεται *συνάρτηση ακρίβειας*, η (4.3) ποσοτικοποιεί την ακρίβεια των δεδομένων που προκύπτουν όταν, εκπροσωπώντας το σύνολο των κόμβων που μετέχουν στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$, ο κόμβος n_i αναφέρει τις μετρήσεις του στον αντιπρόσωπο r_j . Όταν ο κόμβος βρίσκεται κοντά στο γεωγραφικό κέντρο του συνασπισμού, οι μετρήσεις του αναμένεται να εκπροσωπούν σχετικά πιστά τη μέση τιμή των μετρήσεων των υπόλοιπων μελών του συνασπισμού. Αντίθετα, όταν ο κόμβος n_i βρίσκεται κοντά στο θεωρητικό σύνορο του συνασπισμού, όπως αυτό προσδιορίζεται από τον περιορισμό ποιότητας υπηρεσίας που προσδιορίζει την αποδεκτή ακρίβεια των αναφερόμενων πληροφοριών, οι μετρήσεις του αναμένεται να είναι οριακά αποδεκτές.

Η παράμετρος $d(n_i, k)$ αντικατοπτρίζει τη διαφοροποίηση μεταξύ των μετρήσεων του n_i και του κόμβου-εκκινήτη του συνασπισμού $\mathcal{S}(k, r_j)$ n_c . Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κάθε μήνυμα διαπραγμάτευσης περιέχει πληροφορίες σχετικές με τις μετρήσεις του κόμβου-εκκινήτη του συνασπισμού. Έτσι, κάθε κόμβος n_i που λαμβάνει πρόσκληση από τον κόμβο $n_p \in \mathcal{S}(k, r_j)$ μπορεί εύκολα να επαληθεύσει αν η πιθανή συμμετοχή του στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ ικανοποιεί τον περιορισμό ποιότητας υπηρεσίας που προδιαγράφει την αποδεκτή λειτουργία του WSN. Αν X_i και X_c είναι οι μετρήσεις των κόμβων n_i και n_c , αντίστοιχα, τότε το μέτρο διαφοροποίησης $d(n_i, k)$ δίδεται από τη σχέση

$$d(n_i, k) = |(X_i - X_c)/X_c| \quad (4.8)$$

Η δεύτερη παράμετρος που εμφανίζεται στη συνάρτηση ακρίβειας, δηλαδή η q , σχετίζεται με την ελάχιστη ακρίβεια που απαιτείται από τις μετρήσεις των μελών ενός συνασπισμού, αντανakλώντας την προδιαγραφή ποιότητας υπηρεσίας σχετικά με την αποδεκτή λειτουργία του WSN. Η διαφοροποίηση των μετρήσεων που αναφέρονται από τους κόμβους ενός συνασπισμού από τις μετρήσεις του κόμβου-εκκινητή δεν πρέπει ποτέ να υπερβαίνει την τιμή $(1 - q) \times 100\%$. Εφεξής, αυτό θα αναφέρεται ως κανόνας q .

Για να εξασφαλισθεί η αποδεκτή λειτουργία του WSN, η συνάρτηση ακρίβειας πρέπει να απορρίπτει την αποδοχή κόμβων που οδηγούν στη δημιουργία συνασπισμών μειωμένης ακρίβειας. Καθώς οι συνασπισμοί επεκτείνονται ακτινικά ως προς τον κόμβο-εκκινητή τους και οι τελευταίοι κόμβοι που γίνονται αποδεκτοί δεν γνωρίζουν τις μετρήσεις των υπολοίπων, η επέκταση των συνασπισμών πρέπει να συνεχίζεται μόνον εφόσον ικανοποιείται ο κανόνας q . Στην περίπτωση όπου η αποδοχή ενός κόμβου συνεπάγεται την παράβαση του κανόνα q , η αποδοχή του πρέπει να απορρίπτεται καθώς σε αντίθετη περίπτωση η αξιοπιστία του συνασπισμού υπολείπεται της προδιαγραφής. Ένας απλός τρόπος για να διασφαλισθεί η ικανοποίηση του κανόνα q είναι η απόδοση αρνητικής αξίας στους κόμβους η αποδοχή των οποίων συνεπάγεται την παράβαση του κανόνα q .

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η συνάρτηση ακρίβειας μπορεί να γραφεί υπό τη μορφή

$$f(d(n_i, k), q) = \begin{cases} 1 - d(n_i, k), & d(n_i, k) \leq 1 - q \\ -1, & d(n_i, k) > 1 - q \end{cases} \quad (4.9)$$

Οποιαδήποτε άλλη λογική που οδηγεί στον ορισμό μιας αντίστοιχης συνάρτησης ακρίβειας μπορεί να υιοθετηθεί, αρκεί να είναι συνεπής με τις κατωτέρω αρχές:

1. Η αποδοχή κόμβων που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συνασπισμών που παραβιάζουν τον κανόνα q πρέπει να αποφεύγεται.
2. Δεδομένης μιας κατανομής πυκνότητας πιθανότητας της χωρικής συσχέτισης του υπό παρακολούθηση φαινομένου, μικροί (ολιγομελείς) συνασπισμοί αναμένεται να παρέχουν περισσότερο αξιόπιστες μετρήσεις σε σύγκριση με μεγάλους (πολυμελείς) συνασπισμούς.
3. Οι μοναδιαίοι συνασπισμοί αναφέρουν πλήρως ακριβείς μετρήσεις, $f(d(n_i, k), q) = 1, \forall k : |S(k, r_j)| = 1$. Όμως, δεν συμμετέχουν στη γενικότερη διαδικασία δημιουργίας συνασπισμών, οπότε η συνεργατική αξία τους είναι μηδενική.

Η πρώτη αρχή σχετίζεται άμεσα με τον περιορισμό ποιότητας υπηρεσίας που προδιαγράφει τη λειτουργία του WSN καθώς η αποδοχή στο συνασπισμό $S(k, r_j)$ ενός κόμβου για

τον οποίο ισχύει ότι $d(n_i, k) > 1 - q$ θα οδηγούσε, όπως έχει προαναφερθεί, σε μη αποδεκτή ακρίβεια πληροφορίας. Η δεύτερη αρχή είναι διαισθητική: λαμβάνοντας υπόψη ότι η έκταση ενός συνασπισμού ορίζεται από τα μέλη που βρίσκονται στα γεωγραφικά σύνορα της κάλυψής του, οι συνασπισμοί που αποτελούνται από μικρό πλήθος μελών αναμένεται να έχουν μικρότερο μέγεθος από συνασπισμούς με μεγαλύτερο πλήθος μελών. Έτσι, οι μικροί συνασπισμοί αναμένεται να χαρακτηρίζονται από μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των κόμβων-μελών και του κόμβου εκκινήτη. Καθώς η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της χωρικής συσχέτισης είναι στη γενική περίπτωση φθίνουσα συνάρτηση της απόστασης, οι μικρότεροι συνασπισμοί αναμένεται να παρέχουν περισσότερο ακριβείς πληροφορίες σε σχέση με συνασπισμούς που αποτελούνται από μεγαλύτερο αριθμό κόμβων. Η τρίτη αρχή εξασφαλίζει ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι ομογενής σε σχέση με το μέγεθος των συνασπισμών. Η σχετική λογική βασίζεται στην ατομική θεώρηση των κόμβων ως μοναδιαίων συνασπισμών, ή ισοδύναμα, ως συνασπισμών που εκφράζουν μη συνεργατική συμπεριφορά. Καθώς οι μεμονωμένοι κόμβοι εκπροσωπούν μόνο τους εαυτούς τους, οι μετρήσεις τους είναι πλήρως ακριβείς. Όταν ένας κόμβος n_i λαμβάνεται υπόψη ως μοναδιαίος συνασπισμός, η αξία του, θέτοντας $|\mathcal{S}(k, r_j)| = 1$ στη (4.3), προκύπτει μηδενική, δηλαδή $\hat{v}(n_i, k, r_j) = 0$. Κατ' αυτό τον τρόπο, η θεμελιώδης σχέση του προτεινόμενου σχήματος (4.3) έχει ισχύ για κάθε μέγεθος συνασπισμού.

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, η αλγοριθμική περιγραφή της διαδικασίας διαπραγμάτευσης ενός κόμβου όπως αυτή υλοποιείται από το παρόν σχήμα δίδεται από τον Αλγόριθμο 1, όπου έχει γίνει η υπόθεση ότι ένας μη συνασπισμένος κόμβος n_i δέχεται μια πρόσκληση από τον κόμβο $n_p \in \mathcal{S}(k, r_j)$.

4.3.3 Επέκταση συνασπισμών

Έχοντας ολοκληρώσει την ανάλυση που αφορά την αξία των κόμβων, απομένει να αναλυθούν οι προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου ένας κόμβος, έστω n_i , έχει το κίνητρο να εγκαταλείψει κάποιο συνασπισμό $\mathcal{S}(m, r_j)$ για να ενσωματωθεί σε άλλο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$. Μια τέτοια κίνηση αποφασίζεται μόνο όταν είναι προς όφελος και των δύο πλευρών κάτω από την ωφελμιστική διάταξη. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα μέλη του συνασπισμού $\mathcal{S}(w, r_j) = \mathcal{S}(k, r_j) \cup \{n_i\}$ δεν έχουν επαρκή πληροφόρηση αναφορικά με αυτήν τη διαδικασία συγχώνευσης και –εφόσον δεν παραβιάζεται ο κανόνας q – είναι πάντα θετικά διακεείμενοι στην προσχώρηση νέων κόμβων στο συνασπισμό, η εκτιμώμενη διαφορική αξία του κόμβου n_i , υποθέτοντας ότι γίνεται αποδεκτός στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ προς δημιουργία του μεγαλύτερου συνασπισμού (υπερσυνασπισμού) $\mathcal{S}(w, r_j)$, δίδεται από τη σχέση

$$\Delta \hat{v}(n_i) = \hat{v}(n_i, w, r_j) - \hat{v}(n_i, m, r_j)$$

Αλγόριθμος 1: Διαπραγματεύση ενός μεμονωμένου κόμβου n_i με έναν κόμβο n_p που ανήκει στο συνασπισμό $S(k, r_j)$.

Είσοδος:

$\widehat{r_j}$: Πλησιέστερος αντιπρόσωπος του n_i και του συνασπισμού $S(k, r_j)$
 $\widehat{|n_p|}$: Εκτίμηση του βαθμού των μελών του συνασπισμού $S(k, r_j)$ από τον κόμβο n_p
 n_c : Κόμβος-εκκινητής του συνασπισμού $S(k, r_j)$
 m : Απόσταση του κόμβου n_i από τον n_c εκφρασμένη σε πλήθος βημάτων
 X_c : Μέτρηση του κόμβου-εκκινητή n_c
 X_i : Μέτρηση του κόμβου n_i
 $v_o(n_i, r_j)$: Τρέχουσα αξία του κόμβου n_i
 q : Απαιτούμενη QoS ως προς την ακρίβεια των μετρήσεων

Έξοδος: Ναι αν ο κόμβος n_i θέλει να συμμετάσχει στο συνασπισμό $S(k, r_j)$

Αποδοχή = Όχι;

if $(n_i) \neq r_j$ or $d(n_i, k) > (1 - q)$ ή n_i ανήκει ήδη στο συνασπισμό **then**

 | **Επέστρεψε** Αποδοχή;

end

Υπολόγισε την $\widehat{|n_i|}$ και την $|\widehat{S}(k, r_j)|_{n_i}$ μέσω των (4.5) και (4.7), αντίστοιχα;

Υπολόγισε την $f(d(n_i, k), q)$ μέσω της (4.8) και της (4.9);

Υπολόγισε την $\widehat{v}(n_i, k, r_j)$ μέσω της (4.3);

if $\widehat{v}(n_i, k, r_j) \geq v_o(n_i, r_j)$ **then**

 | Τρέχουσα αξία του κόμβου $n_i = \widehat{v}(n_i, k, r_j)$;

 | Αποδοχή = Ναι;

else

 | Αποδοχή = Όχι;

end

if Αποδοχή = Ναι **then**

 | **for** κάθε κόμβο n_e που είναι γείτονας του n_i **do**

 | Προσκάλεσε $(n_e, \widehat{|n_i|}, m + 1, X_c, q)$;

 | **end**

end

Επέστρεψε Αποδοχή;

$$= (|\widehat{S}(w, r_j)|_{n_i} - 1)f(d(n_i, w), q) - (|\widehat{S}(m, r_j)|_{n_i} - 1)f(d(n_i, m), q) \quad (4.10)$$

Ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από την (4.10) σχετικά με το πώς η συνάρτηση ακρίβειας σχετίζεται με το μέγεθος του συνασπισμού. Ας υποθεθεί ότι το υπό παρακολούθηση φαινόμενο χαρακτηρίζεται από μια κανονικοποιημένη κατανομή ομοιότητας πληροφορίας, $C(x) : \mathbb{R}_+ \mapsto (0, 1], C(0) = 1, \lim_{x \rightarrow \infty} C(x) \rightarrow 0$ και ότι η μεταβλητή x δηλώνει την απόσταση μεταξύ ενός κόμβου, έστω n_i , υποψήφιου για αποδοχή σε ένα συνασπισμό και του κόμβου-εκκινητή του συνασπισμού αυτού. Ας υποθεθεί, αντίστοιχα, ότι η απόσταση του n_i από τους κόμβους-εκκινητές των συνασπισμών $S(k, r_j)$ και $S(m, r_j)$ είναι x_1 και x_2 , $x_1 > x_2$, αντίστοιχα. Επίσης, έστω ένας μετασχηματισμός της συνάρτησης ακρίβειας $f(d(n_i, k), q)$, $F(x) : [0, C^{-1}(q)] \mapsto (0, 1]$, ο οποίος συνδέει στατιστικά την απόσταση x με την προσδοκώμενη ομοιότητα μεταξύ των μετρήσεων δύο κόμβων. Τότε, από

τις (4.8) και (4.9) συνάγεται ότι η $F(x)$ συγκλίνει στοχαστικά στη $C(x)$, $\forall x \in [0, C^{-1}(q)]$, δηλαδή

$$F(x) = 1 - \frac{|X_i/X_c - 1|}{1} = C(x), x \in [0, C^{-1}(q)] \quad (4.11)$$

Καθώς το εκτιμώμενο μέγεθος ενός συνασπισμού $\mathbf{S}(w, r_j)$ σε σχέση με την απόσταση x δίνεται από την $E\{|\mathbf{S}(w, r_j)|\} = N\pi x^2/L^2$, προκειμένου να διασφαλισθεί ότι ο κόμβος n_i θα αποχωρήσει από ένα συνασπισμό $\mathbf{S}(1, r_j)$ για να συμμετάσχει στο συνασπισμό $\mathbf{S}(2, r_j)$, πρέπει να ισχύει

$$\Delta\hat{v}(n_i) \geq 0 \stackrel{(4.10)}{\Rightarrow} \frac{C(x_1)}{C(x_2)} \leq \frac{N\pi x_2^2 - L^2}{N\pi x_1^2 - L^2}, \quad (4.12)$$

Θεωρώντας, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι $|\widehat{\mathbf{S}(2, r_j)}|_{n_i} \geq |\widehat{\mathbf{S}(1, r_j)}|_{n_i} \Rightarrow x_2 \geq x_1$, τότε η (4.12) υπονοεί ότι ο n_i θα αποφασίσει να μεταβεί από το συνασπισμό $\mathbf{S}(1, r_j)$ στο συνασπισμό $\mathbf{S}(2, r_j)$ αν η μείωση της ακρίβειας της μετρήσεων που μπορεί να παρέχει που συνεπάγεται η συμμετοχή του στον (πολυπληθέστερο) συνασπισμό $\mathbf{S}(2, r_j)$ είναι τέτοια ώστε να αντισταθμίζεται από μια μεγαλύτερη αύξηση στην εκτιμώμενη βελτίωση της διάρκειας λειτουργίας του, χωρίς να παραβιάζεται ο κανόνας q .

Εναλλακτικά, σε μια γενικότερη προσέγγιση, η επέκταση των συνασπισμών διασφαλίζεται στατιστικά εφόσον η εκτιμώμενη αξία των κόμβων είναι αύξουσα συνάρτηση της απόστασης x . Αν η εκτιμώμενη αξία των κόμβων ήταν φθίνουσα συνάρτηση της απόστασης, τότε η διαδικασία επέκτασης συνασπισμών δε θα ξεκινούσε ποτέ, καθώς η συνεργασία μεταξύ έστω και δύο κόμβων για το σχηματισμό ενός πρωταρχικού συνασπισμού θα είχε ως αποτέλεσμα την παραβίαση του κανόνα q . Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβαίνει στην περίπτωση όπου η χωρική συσχέτιση του υπό παρακολούθηση φυσικού φαινομένου ήταν εξαιρετικά μικρή. Εντούτοις, συνήθως τα φυσικά φαινόμενα παρουσιάζουν έντονη χωρική συσχέτιση, καθιστώντας την απαίτηση της μορφής της εκτιμώμενης αξίας των κόμβων ως αύξουσας συνάρτησης της απόστασης ρεαλιστική. Στην περίπτωση αυτή, $\Delta\hat{v}(n_i) \geq 0$ όταν $x_1 > x_2$:

$$\begin{aligned} \frac{dv(n_i, k, r_j)}{dx} &\geq 0 \Rightarrow \frac{d\{(N\pi x^2/L^2 - 1) \cdot F(x)\}}{dx} \geq 0 \Rightarrow \\ C'(x) &\geq \frac{-2N\pi x}{N\pi x^2 - L^2} \cdot C(x) \Rightarrow \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$C'(x) \geq \frac{-2\pi NL^2 x}{(N\pi x^2 - L^2)^2}, x \in (L/\sqrt{N\pi}, C^{-1}(q)] \quad (4.14)$$

καθώς η ολοκλήρωση της (4.13) έχει ως αποτέλεσμα $C(x) = A/(N\pi x^2 - L^2)$, $A \in \mathbb{R}_+$.

Στην περίπτωση όπου ισχύει η ισότητα στην (4.14), οι κόμβοι είναι, κατά μέσο όρο, αδιάφοροι ως προς ενδεχόμενη επέκταση των συνασπισμών, καθώς το διαφορικό τους κέρδος προκύπτει μηδενικό. Συνεπώς, όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο έχουν την ίδια αξία, ανεξάρτητα

από το συνασπισμό στον οποίο συμμετέχουν. Σε αυτήν την περίπτωση, η άρση της αδιαφορίας των κόμβων προκύπτει με την αποδοχή των αιτήσεων από κόμβους που συμμετέχουν σε μεγαλύτερους συνασπισμούς.

Στην περίπτωση όπου η (4.13) δεν ισχύει, οι κόμβοι θεωρούν ότι η επέκταση των συνασπισμών δεν είναι συμφέρουσα, οπότε δεν δημιουργούνται συνασπισμοί κατά τη διάρκεια της φάσης έναρξης λειτουργίας.

4.4 Η φάση βελτιστοποίησης

Για να εξοικονομήσουν ενέργεια κατά τη διάρκεια της φάσης έναρξης λειτουργίας, οι κόμβοι επικοινωνούν μόνο με τους άμεσους γείτονές τους. Επιπλέον, καθώς οι κόμβοι δεν γνωρίζουν επακριβώς τη διαμέριση του WSN σε συνασπισμούς, δρουν κατά κοντόφθαλμο τρόπο, μη έχοντας τη δυνατότητα να υλοποιήσουν αυτόνομα τη βέλτιστη διαμέριση του WSN σε συνασπισμούς². Επομένως, η βελτιστοποίηση της αρχικής διαμέρισης του WSN αφήνεται να ολοκληρωθεί από τους αντιπρόσωπους.

Η φάση βελτιστοποίησης εκκινεί με την αποστολή μηνυμάτων ελέγχου από τους κόμβους που ανήκουν σε συνασπισμούς που δημιουργήθηκαν κατά τη φάση της έναρξης λειτουργίας στους αντιπροσώπους τους, με στόχο να τους ενημερώσουν αναφορικά με την αρχική διαμέριση του WSN σε συνασπισμούς. Κάθε τέτοιο μήνυμα περιλαμβάνει την ταυτότητα και την τρέχουσα μέτρηση του κόμβου-αποστολέα του μηνύματος καθώς και την ταυτότητα του συνασπισμού στον οποίο ανήκει. Επιπλέον, αν κάποιος κόμβος βρίσκεται κοντά στο σύνορο του συνασπισμού του, εκπέμπει και ένα κατάλογο με τις ταυτότητες των συνασπισμών των γειτόνων του που ανήκουν σε διαφορετικούς συνασπισμούς.

Μετά τη λήψη των μηνυμάτων ελέγχου, οι αντιπρόσωποι επιδιώκουν τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαμέρισης του WSN σε συνασπισμούς, εφαρμόζοντας τον κανόνα συγχώνευσης και διαίρεσης που προτείνεται στην [132]. Η βέλτιστη διαμέριση είναι αυτή που μεγιστοποιεί τη συνολική αξία του WSN και, συνεπώς, της διάρκειας ζωής του. Ο αρχικός σχηματισμός συνασπισμών που πραγματοποιείται κατά τη φάση έναρξης λειτουργίας μειώνει τον αριθμό των πιθανών διαμερίσεων που πρέπει να εξετάσουν οι αντιπρόσωποι κατά τη διάρκεια της φάσης βελτιστοποίησης επιταχύνοντας κατ' αυτό τον τρόπο την ολοκλήρωση της φάσης βελτιστοποίησης.

Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, οι συνασπισμοί δεν αντιμετωπίζονται ως σύνολα κόμβων του WSN. Αντίθετα, λογίζονται ως μεμονωμένες οντότητες. Αυτό καθιστά επιτακτική την περιγραφή ενός συνασπισμού μέσω της πλειάδας τιμών $\langle k, V_k, X_k^{min}, X_k^{max}, X_k^c \rangle$, όπου k είναι η ταυτότητα του συνασπισμού, V_k η αξία του, X_k^{min} και X_k^{max} οι ελάχιστες και

²Μια περισσότερο διορατική συμπεριφορά των κόμβων μπορεί να επιτευχθεί αν οι τελευταίοι ενημερώνονται υπόλοιπα μέλη του συνασπισμού τους σχετικά με τις διαπραγματεύσεις τους με άλλους κόμβους. Όμως, κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε αύξηση του ρυθμού ανταλλαγής μηνυμάτων που θα μείωνε τα οφέλη από τη δημιουργία συνασπισμών

μέγιστες τιμές μετρήσεων, αντίστοιχα, που αναφέρθηκαν στον αντιπρόσωπο από τα μέλη του συνασπισμού και X_k^c είναι η μέτρηση του κόμβου-εκκινητή του συνασπισμού. Καθώς όλα τα μέλη των ήδη δημιουργημένων συνασπισμών ικανοποιούν τον κανόνα q , οι τιμές των μετρήσεων που αναφέρονται στους αντιπροσώπους ικανοποιούν τις προδιαγραφές ακρίβειας που ορίζουν την καλή λειτουργία του WSN. Έτσι, η αξία ενός συνασπισμού καθορίζεται αποκλειστικά από την επιπλέον χρονική διάρκεια κατά την οποία τα μέλη του μπορούν να λειτουργούν κανονικά (δηλαδή να αναφέρουν τις μετρήσεις τους) σε σχέση με τη μη συνεργατική περίπτωση. Αφού κάθε κόμβος που ανήκει στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ αναφέρει τις μετρήσεις του πιθανοτικά με μέση πιθανότητα $p_t = 1/|\mathcal{S}(k, r_j)|$, η διάρκεια της λειτουργικής του δραστηριότητας αυξάνεται στατιστικά κατά $|\mathcal{S}(k, r_j)| - 1$ φορές σε σχέση με τη μη συνεργατική λειτουργία. Επομένως, κατά τη διάρκεια της φάσης βελτιστοποίησης, η συνεργατική αξία κάθε συνασπισμού εξαρτάται μόνο από το μέγεθός του και δίδεται από τη σχέση

$$V(k, r_j) = \sum_{n_i \in \mathcal{S}(k, r_j)} (|\mathcal{S}(k, r_j)| - 1) = |\mathcal{S}(k, r_j)| \cdot (|\mathcal{S}(k, r_j)| - 1) \quad (4.15)$$

Η σχέση (4.15) συνεπάγεται ότι όλοι οι κόμβοι που συναποτελούν ένα συνασπισμό απολαμβάνουν την ίδια συνεργατική αξία και ότι η συνολική αξία του συνασπισμού μοιράζεται εξίσου σε όλα τα μέλη του. Στο Παράρτημα Α παρέχονται πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες του προτεινόμενου συνασπιστικού παιχνιδιού και του προτεινόμενου σχήματος ισομερούς κατανομής αξίας στους κόμβους.

Λόγω του ότι κάθε αντιπρόσωπος, κατά τη διάρκεια της φάσης βελτιστοποίησης, έχει πλήρη γνώση των συνασπισμών που αναφέρουν σε αυτόν, οι ποσότητες $|\mathcal{S}(k, r_j)|$ και $V(k, r_j)$ είναι ντετερμινιστικά προσδιορισμένες. Επομένως, η αξία κάθε συνασπισμού μπορεί να υπολογισθεί κατά μοναδικό τρόπο. Επιπλέον, η πιθανοτική δραστηριότητα αναφοράς των κόμβων δεν θέτει κανένα περιορισμό ως προς τον ακριβή τρόπο με τον οποίο η αξία του συνασπισμού μπορεί να κατανεμηθεί στα μέλη του. Ο ντετερμινιστικός ορισμός της αξίας των συνασπισμών σε συνδυασμό με την έλλειψη περιορισμών σε σχέση με τον ακριβή τρόπο καταμερισμού της αξίας αυτής στα μέλη των συνασπισμών, επιτρέπουν τη διατύπωση του προβλήματος ως ενός TU παιχνιδιού δημιουργίας συνασπισμών, σε αντίθεση με την απαραίτητη NTU διατύπωση του αντίστοιχου προβλήματος κατά τη διάρκεια της φάσης έναρξης λειτουργίας (βλ. [8] και Κεφ. 3 για λεπτομέρειες και σχετικούς ορισμούς).

Για τη συνέχεια του παρόντος εδαφίου, έστω ότι το σύνολο $\tilde{\mathcal{S}} = \{\mathcal{S}_1, \dots, \mathcal{S}_n\}^3$ είναι το σύνολο των συνασπισμών που έχουν ως αντιπρόσωπο τον r_j και δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της φάσης έναρξης λειτουργίας. Τότε, ο r_j πρέπει να εξετάσει αν δύο από αυτούς τους συνασπισμούς, έστω οι \mathcal{S}_k and \mathcal{S}_m , μπορούν να συγχωνευθούν. Κατά τη διαδικασία των

³Για λόγους απλοποίησης του συμβολισμού, ο συμβολισμός $\mathcal{S}(k, r_j)$ αναγράφεται ως \mathcal{S}_k , καθώς η ανάλυση στο πλαίσιο του εδαφίου υποθέτει τη μελέτη των διαδικασιών βελτιστοποίησης εκ μέρους του αντιπροσώπου r_j .

συγχωνεύσεων ακολουθείται το ίδιο σκεπτικό με τη φάση έναρξης λειτουργίας σε σχέση με την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας που χαρακτηρίζει το WSN. Έτσι, κάθε ζεύγος συνασπισμών υποψήφιων για συγχώνευση πρέπει να ικανοποιεί τον κανόνα q , ως αν επρόκειτο για μοναδιαίους συνασπισμούς (μεμονωμένους κόμβους). Ο κανόνας q μπορεί να εκφρασθεί ως δυαδικός περιορισμός υπό τη μορφή

$$\phi_n(\mathbf{S}_k, \mathbf{S}_m) = \begin{cases} 1 & \text{if } X_m^{max}/X_k^c \leq 2 - q & X_k^c < X_m^c \\ 1 & \text{if } X_m^{min}/X_k^c \geq q & X_k^c > X_m^c \\ 1 & \text{if } X_k^c = X_m^c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.16)$$

Η σχέση (4.16) διατυπώνει τον κανόνα q επί του συνόλου των συνασπισμών που έχουν κοινό αντιπρόσωπο και δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της φάσης βελτιστοποίησης. Όταν $\phi_n = 1$, τότε οι συνασπισμοί \mathbf{S}_k και \mathbf{S}_m μπορούν να συγχωνευθούν και να δημιουργήσουν υπερσυνασπισμό ο οποίος επίσης ικανοποιεί τον κανόνα q . Όταν $\phi_n = 0$, η συγχώνευση οδηγεί σε υπερσυνασπισμό που ενδεχομένως προσφέρει μετρήσεις μη αποδεκτής ακρίβειας (βλ. Παράρτημα Β για λεπτομέρειες και απόδειξη). Καθώς κάθε αντιπρόσωπος έχει πλήρη γνώση των συνασπισμών που αναφέρουν σε αυτόν, μπορεί να πραγματοποιήσει έρευνα βελτιστοποίησης για να προσδιορίσει τη δομή συνασπισμών που μεγιστοποιεί την αθροιστική αξία των τελικών συνασπισμών.

Ένας άλλος παράγοντας που περιορίζει τη διαδικασία δημιουργίας συνασπισμών σχετίζεται με τη συνεκτικότητα των συνασπισμών. Ένας συνασπισμός \mathbf{S}_m μπορεί να συγχωνευθεί με έναν άλλο συνασπισμό \mathbf{S}_k μόνο εφόσον κάτι τέτοιο είναι δυνατό μέσω μιας διαδοχής χωρικών επεκτάσεων του \mathbf{S}_k , δηλαδή μόνο αν υπάρχει τουλάχιστον μία δυνατή ακολουθία συγχωνεύσεων γειτονικών συνασπισμών που εκκινεί από τον \mathbf{S}_k και καταλήγει στην απορρόφηση του \mathbf{S}_m . Δηλαδή, αν $\phi_n(\mathbf{S}_k, \mathbf{S}_m) = 1$, τότε η συγχώνευση επιτρέπεται μόνο αν υπάρχει τουλάχιστον μία ακολουθία συγχώνευσης συνασπισμών που επιτρέπει τη συγχώνευση των \mathbf{S}_k και \mathbf{S}_m χωρίς να περιέχει συνασπισμούς που δεν ικανοποιούν τη (4.16). Ο σχετικός περιορισμός μπορεί να εκφρασθεί υπό τη μορφή

$$\phi_p(\mathbf{S}_k, \mathbf{S}_m) = \begin{cases} 1, & \exists \mathcal{L} \subseteq \tilde{\mathcal{S}} : \forall \mathbf{S}_i \in \mathcal{L}, \exists \mathbf{S}_p \in \mathcal{C}(\mathbf{S}_i), \{\mathbf{S}_k, \mathbf{S}_m\} \in \mathcal{L} \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.17)$$

όπου $\mathcal{C}(k)$ είναι το σύνολο των γειτονικών συνασπισμών του \mathbf{S}_k .

4.4.1 Διάσπαση του προβλήματος βελτιστοποίησης της δομής συνασπισμών

Ας υποθεθεί ότι ένα σύνολο συνασπισμών $\Gamma_i \subseteq \tilde{\mathcal{S}}$ συγχωνεύονται για να σχηματίσουν ένα νέο υπερσυνασπισμό, έστω B_i . Τότε, $CS = \{B_1, \dots, B_m\}$, $B_i = \bigcup_{S_k \in \Gamma_i} S_k$, $B_i \cap B_l = \emptyset$, $\forall B_i \neq B_l$, $B_i, B_l \in CS$ είναι μια δομή συνασπισμών που προκύπτει από μία ακολουθία συγχωνεύσεων. Επίσης, έστω ότι $\tilde{CS} = \{CS_1, CS_2, \dots, CS_w\}$ είναι το σύνολο όλων των δυνατών σχηματισμών συνασπισμών που μπορούν να προκύψουν μέσω μιας ακολουθίας συγχωνεύσεων και διασπάσεων εφαρμοσμένων επί του $\tilde{\mathcal{S}}$. Η βέλτιστη δομή συνασπισμών, CS^* , καθορίζεται από τη λύση του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$CS^* = \operatorname{argmax}_{CS_i \in \tilde{CS}} \sum_{B_k \in CS_i} V(k, r_j)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\begin{aligned} \phi_n(S_k, S_m) &= 1, \forall S_k, S_m \in B_i, \forall B_k \in CS_i, \\ \phi_p(S_k, S_m) &= 1, \forall S_k, S_m \in B_i, \forall B_k \in CS_i \end{aligned} \quad (4.18)$$

Το ανωτέρω πρόβλημα μπορεί να λυθεί εφαρμόζοντας τεχνικές μικτού ακέραιου προγραμματισμού (Mixed Integer Programming, *MIP*) [144], [145].

Καίτοι το πρόβλημα (4.4.1) μπορεί να λυθεί με κατάλληλη εφαρμογή τεχνικών MIP, ο αντιπρόσωπος πρέπει στην ουσία να εξετάσει ένα μεγάλο πλήθος πιθανών διαμερίσεων του WSN, ο αριθμός των οποίων είναι υπερ-εκθετικός ως προς τον αριθμό των συνασπισμών που αναφέρουν σε αυτόν. Συγκεκριμένα, το πλήθος διαμερίσεων ενός συνόλου που αποτελείται από n μέλη δίδεται από τον αριθμό *Bell* B_n [146]. Αν, για παράδειγμα, το πλήθος των συνασπισμών που αναφέρουν στον αντιπρόσωπο είναι 20, ο τελευταίος πρέπει να εξετάσει $B_{20} \approx 51.7 \cdot 10^{12}$ διαφορετικές διαμερίσεις για να υπολογίσει τη βέλτιστη διαμέριση CS^* . Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αντιπρόσωποι έχουν και αυτοί περιορισμένες υπολογιστικές ικανότητες, δεν είναι πρακτικά εφικτός ο υπολογισμός του (4.4.1), ιδιαίτερα στην περίπτωση πολύ μεγάλων WSN.

Οι συγγραφείς της [147] προτείνουν μία μέθοδο μείωσης της υπολογιστική πολυπλοκότητας του προσδιορισμού της βέλτιστης δομής συνασπισμών στο πλαίσιο δημιουργίας συνασπισμών υπό περιορισμούς (Constrained Coalition Formation, *CCF*). Σύμφωνα με την [147], όταν η δημιουργία συνασπισμών υπόκειται σε εξωγενείς περιορισμούς, αρκεί να εξετασθούν μόνο οι *εφικτές* δομές συνασπισμών, δηλαδή εκείνες που συμμορφώνονται με ένα σύνολο *θετικών* και *αρνητικών* περιορισμών. Η κατηγοριοποίηση ενός περιορισμού ως θετικού ή αρνητικού εξαρτάται από το αν η εφαρμογή του περιορισμού σε μια δομή συνασπισμών έχει ευεργετικές ή αρνητικές συνέπειες. Μία διαμέριση θεωρείται εφικτή όταν ικανοποιεί ολόκληρο το σύνολο των θετικών περιορισμών ενώ, ταυτόχρονα, δεν ικανοποιείται κανένας

από τους αρνητικούς περιορισμούς. Επιπλέον, η [147] παρέχει μία μέθοδο η οποία αρχικά διασπά το αρχικό πρόβλημα σε μικρότερα σύμφωνα με την αρχή «διαίρει και βασίλευε» και, έπειτα, λύνει το αρχικό πρόβλημα αναδρομικά. Ο αριθμός των διαμερίσεων που προκύπτουν προς εξέταση από αυτή τη διαδικασία είναι μειωμένος κατά τάξεις μεγέθους, καθιστώντας την ανωτέρω προσέγγιση πολύ ελκυστική για χρήση στα WSN.

Για την αποτελεσματική εφαρμογή αυτής της μεθόδου στο τρέχον σχήμα δημιουργίας συνασπισμών, οι δυαδικοί περιορισμοί ϕ_p και ϕ_n πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα σε αρνητικούς και θετικούς περιορισμούς, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, ο ϕ_p πρέπει να μετατραπεί σε θετικό περιορισμό καθώς καθοδηγεί την εξέταση της δημιουργίας των υπερσυνασπισμών. Αντίστοιχα, ο ϕ_n πρέπει να μετατραπεί σε αρνητικό περιορισμό καθώς διερευνά αν ένας πιθανός υπερσυνασπισμός πρέπει να απορριφθεί λόγω έλλειψης ακρίβειας. Οι περιορισμοί σε ένα παίγνιο CCF καθορίζονται στη μορφή υποσυνόλων συνασπιστικών οντοτήτων, συνδεδεμένων με κάθε υποσύνολο περιορισμών με τη βοήθεια κατάλληλα διατυπωμένων συναρτήσεων που ακολουθούν τις αρχές του προτασιακού λογισμού (propositional calculus) (βλ. [147] για λεπτομέρειες). Επιπλέον, έστω ότι το $A(\mathcal{E}_l) = \{a(B_i, \mathcal{E}_l) | B_i\}$ υποδηλώνει ένα σύνολο δυαδικών μεταβλητών σχετιζόμενων με την παρουσία του υπερσυνασπισμού B_i σε ένα σύνολο \mathcal{E}_l ώστε αν $a(B_i, \mathcal{E}_l) = 1$, τότε $B_i \in \mathcal{E}_l$.

Ο μετασχηματισμός του περιορισμού ϕ_p , όπως αυτός ορίζεται μέσω της (4.17), σε ένα σύνολο θετικών περιορισμών βασίζεται στην επέκτασή του ως συνόλου περιορισμών που αφορούν μεμονωμένους *μοναδιαίους* υπερσυνασπισμούς. Ειδικότερα, ο αναδρομικός ορισμός του περιορισμού ϕ_p μπορεί να εκφραστεί ως εξής: «Ο υπερσυνασπισμός B_m μπορεί να συγχωνευθεί με τον B_k , καθώς ο B_m είναι γείτονας του B_{m-1} , ο οποίος είναι γείτονας του B_{m-2} , ..., ο οποίος είναι γείτονας του B_l ο οποίος είναι γείτονας του B_k ». Με άλλα λόγια, χρησιμοποιώντας το συμβολισμό της (4.17), $\phi_n(B_k, B_m) = 1$, αν $B_m \in \mathcal{C}(\mathcal{C}(\mathcal{C}(\dots(\mathcal{C}(B_k))))))$. Με βάση αυτόν τον αναδρομικό ορισμό του ϕ_p , το σύνολο των θετικών περιορισμών, \mathcal{PC} , αποτελείται από τους γείτονες του υπερσυνασπισμού B_i , δηλαδή

$$\mathcal{PC} = \{\mathcal{C}(B_1), \mathcal{C}(B_2), \dots, \mathcal{C}(B_m)\} \quad (4.19)$$

Τότε, η αντίστοιχη προτασιακή συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί ως

$$\phi'_p(\mathcal{C}(B_i)) = \bigvee_{B_m \in \mathcal{C}(B_i)} a(B_m, \mathcal{C}(B_i)), \forall \mathcal{C}(B_i) \in \mathcal{PC} \quad (4.20)$$

όπου το σύμβολο \bigvee καταδεικνύει την εφαρμογή ενός λογικού «H» (OR) επί των μελών του συνόλου δυαδικών μεταβλητών $A(\mathcal{C}(B_i))$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, ακολουθώντας την ανάλυση της [147], οι θετικοί περιορισμοί πρέπει να ικανοποιούνται διαζευκτικά (disjunctively), δηλαδή τουλάχιστον ένας περιορισμός πρέπει να ικανοποιείται για κάθε μέλος μίας εφικτής διαμέρισης του WSN. Μία συζευκτική (conjunctive) προσέγγιση θα οδηγούσε στο συμπέρασμα ότι η μοναδική εφικτή δομή συν-

ασπισμών είναι ο GC. Αυτό, εκτός των άλλων, επικυρώνει τη χρήση του ϕ_p υπό τη μορφή ενός θετικού περιορισμού.

Το σύνολο των αρνητικών περιορισμών, \mathcal{NC} , προκύπτει από τον ϕ_n ορίζοντας κατάλληλα το σύνολο των συνόλων των αμοιβαίως αποκλειόμενων υπερσυνασπισμών, έστω $\mathcal{NC} = \{E(B_1), E(B_2), \dots, E(B_n)\}$. Επίσης, έστω ότι ο τελεστής E συσχετίζει σε κάθε υπερσυνασπισμό B_i ένα σύνολο από υπερσυνασπισμούς $E(B_i)$ έτσι ώστε ο B_i να μη μπορεί να συμπεριληφθεί σε κάποιον υπερσυνασπισμό στον οποίο συμμετέχει επίσης οποιοδήποτε μέλος του $E(B_i)$ για λόγους περιορισμένης ακρίβειας. Με βάση τον ορισμό του E , προκύπτει ότι

$$\mathcal{NC} = \{E(B_i) | \forall B_p \in E(B_i), \phi_a(B_i, B_p) = 0\} \quad (4.21)$$

Η σχετική προτασιακή συνάρτηση δίνεται από τη σχέση

$$\phi'_n(E(B_i)) = \neg \bigwedge_{B_m \in E(B_i)} a(B_i, E(B_i)), \forall E(B_i) \in \mathcal{NC} \quad (4.22)$$

όπου το σύμβολο \bigwedge είναι ένας τελεστής σύζευξης (λογικό «KAI», OR) επί των μελών του $A(E(B_i))$ και ο τελεστής \neg δηλώνει άρνηση. Ο συζευκτικός συνδυασμός που παρουσιάζεται μέσω της (4.22) μεταφράζεται σε έναν αρνητικό περιορισμό καθώς ένας υπερσυνασπισμός που δεν τηρεί τον περιορισμό ακρίβειας δεν πρέπει να αποτελεί μέρος μίας γενικότερης, βελτιστοποιημένης δομής συνασπισμών.

Έχοντας ορίσει τους θετικούς και αρνητικούς περιορισμούς και τις αντίστοιχες προτασιακές συναρτήσεις, η μέθοδος που προτείνεται στην [147] μπορεί να εφαρμοσθεί κατά άμεσο τρόπο στο παρόν πρόβλημα για την εύρεση της βέλτιστης διαμέρισης του WSN, CS^* .

4.4.2 Βέλτιστη αναδόμηση διαμέρισης

Μετά τον καθορισμό της βέλτιστης δομής συνασπισμών, οι αντιπρόσωποι εκπέμπουν έναν αριθμό μηνυμάτων συγχώνευσης στα μέλη των αρχικώς δημιουργημένων συνασπισμών, αποσκοπώντας, μετά από τις κατάλληλες συγχωνεύσεις, στη δημιουργία των βέλτιστων υπερσυνασπισμών. Κάθε τέτοιο μήνυμα περιέχει πληροφορίες σχετικά με την ταυτότητα του κόμβου-παραλήπτη, την ταυτότητα του νέου υπερσυνασπισμού στον οποίο ο κόμβος-παραλήπτης εφεξής θα ανήκει καθώς και το ανανεωμένο και ακριβές μέγεθος του υπερσυνασπισμού.

Μετά τη λήψη ενός μηνύματος συγχώνευσης, οι κόμβοι που ανήκουν σε υπό συγχώνευση συνασπισμούς αντικαθιστούν το εκτιμώμενο μέγεθος του συνασπισμού τους με το αντίστοιχο που αναγράφεται στο μήνυμα και ρυθμίζουν αντίστοιχα την πιθανότητα αποστολής αναφοράς p_t .

Όπως είναι αναμενόμενο, το πλήθος των αντιπροσώπων σε ένα WSN είναι καθοριστικό

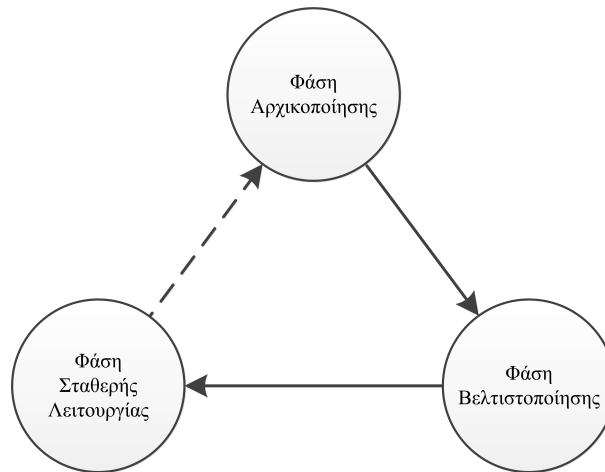
για τη διαδικασία δημιουργίας συνασπισμών, καθώς ένα μεγάλο πλήθος αντιπροσώπων παρέχει αυξημένη διάρκεια ζωής για το WSN λόγω του μικρότερου πλήθους εκπομπών των κόμβων. Κάθε αντιπρόσωπος $r_j \in \mathcal{R}$ είναι υπεύθυνος για μια περιοχή που καλύπτεται από ένα σύνολο κόμβων και συνασπισμών που αναφέρουν σε αυτόν. Όταν δρουν ως συντονιστές, οι αντιπρόσωποι μεγιστοποιούν τη σωρευτική αξία των συνασπισμών τους οποίους συντονίζουν. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια λειτουργίας ενός WSN, πρέπει, ιδανικά, να δημιουργηθεί ένας GC γύρω από κάθε αντιπρόσωπο. Κάτι τέτοιο, όμως, δεν είναι συνήθως δυνατό λόγω περιορισμών ακρίβειας. Το πλήθος των αντιπροσώπων πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά. Η χρήση μεγάλου πλήθους αντιπροσώπων οδηγεί σε ταχεία εύρεση της βέλτιστης διαμέρισης του WSN και, συνεπώς, σε ταχεία εφαρμογή των σχετικών συγχωνεύσεων, καθιστώντας το WSN προσαρμοστικό στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Αντίθετα, παρά τη μείωση του πλήθους των εκπομπών των κόμβων για την υλοποίηση της βέλτιστης διαμέρισης, η ύπαρξη μεγάλου πλήθους αντιπροσώπων μπορεί να οδηγήσει στην υπερδιαμέριση του WSN, γεγονός που έχει αρνητικό αντίκτυπο στο πλήθος των συνασπισμών που προκύπτουν μετά την ολοκλήρωση της φάσης βελτιστοποίησης. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί από το Σχήμα 4.1(β), όπου η συγχώνευση των συνασπισμών $S(4, r_1)$ και $S(1, r_2)$ θα μπορούσε ενδεχομένως να βελτιώσει τη διάρκεια ζωής του WSN που απεικονίζεται στο σχήμα. Εντούτοις, αυτή η συγχώνευση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί αφού οι δύο συνασπισμοί ελέγχονται από διαφορετικούς αντιπροσώπους. Καθώς το πλήθος των αντιπροσώπων σε ένα WSN αυξάνει, οι παρενέργειες της υπερδιαμέρισης γίνονται εντονότερες, μειώνοντας το συνολικό κέρδος από την εφαρμογή της δημιουργίας συνασπισμών.

4.5 Φάση σταθερής λειτουργίας

Κατά τη διάρκεια της φάσης σταθερής λειτουργίας οι αντιπρόσωποι επεξεργάζονται τις μετρήσεις που λαμβάνουν από τα μέλη των συνασπισμών που ελέγχουν και πραγματοποιούν τους ελέγχους ακρίβειας που είναι απαραίτητοι για να διατηρήσουν βέλτιστη τη συνασπιστική λειτουργία του WSN, λαμβάνοντας υπόψη τους ενδεχόμενες αλλαγές στην τοπολογία του WSN ή στα υπό παρακολούθηση φυσικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα, οι αντιπρόσωποι συγκρίνουν διαδοχικά λαμβανόμενες μετρήσεις από κόμβους που ανήκουν στον ίδιο συνασπισμό και ελέγχουν αν ικανοποιείται ο κανόνας q στο πεδίο του χρόνου. Θεωρώντας μετρήσεις από τους κόμβους-μέλη του $S(k, r_j)$ σε χρονικές στιγμές εντός του χρονικού παραθύρου $[t - w, t]$, οι έλεγχοι ακρίβειας που πραγματοποιούνται από τον αντιπρόσωπο r_j εκφράζονται μέσω της χρονικής εκδοχής του κανόνα q , δηλαδή

$$\frac{|X_i^t - X_m^{t-l}|}{X_m^{t-l}} \leq 1 - q, \forall l \in (0, w], n_i, n_m \in S(k, r_j) \quad (4.23)$$

όπου X_i^t είναι η μέτρηση του κόμβου n_i τη χρονική στιγμή t . Αν η (4.23) παραβιάζεται, τότε



Σχήμα 4.3: Οι τρεις φάσεις του προτεινόμενου σχήματος δημιουργίας συνασπισμών.

η προδιαγραφή ακρίβειας δεν ικανοποιείται από τουλάχιστον ένα κόμβο του $S(k, r_j)$. Ως εκ τούτου, ο αντιπρόσωπος αντιλαμβάνεται ότι η συμπεριφορά του υπό παρακολούθηση φυσικού φαινομένου εμφανίζει αξιοσημείωτη αλλαγή και αποστέλλει ένα γενικευμένο μήνυμα διάσπασης στους κόμβους-μέλη του. Στην περίπτωση αυτή, ο $S(k, r_j)$ πρέπει να διασπασθεί και οι κόμβοι του να επαναδιαπραγματευθούν τη συμμετοχή τους σε κάποιον άλλο συνασπισμό. Έτσι, εκκινεί μια νέα διαδικασία δημιουργίας συνασπισμών από τους κόμβους του διασπασμένου συνασπισμού, ακολουθώντας τις τρεις φάσεις που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.

Επειδή οι συνασπισμοί σχηματίζονται κάθε φορά ακολουθώντας τον κανόνα συγχωνεύσεων και διασπάσεων της [132], η διαμέριση του WSN είναι εγγυημένα σταθερή κατά \mathbb{D}_{hp} .

4.6 Θέματα δίκαιης μεταχείρισης κόμβων

Η αξία ενός κόμβου που συμμετέχει σε κάποιο συνασπισμό εξαρτάται από τη φάση της διαδικασίας σχηματισμού συνασπισμών. Στο πλαίσιο της αξιοποίησης του εγγενούς αμοιβαίου συμβιβασμού που πρέπει να υπάρξει σε σχέση με τη βελτιστοποίηση είτε της δικαιοσύνης μεταξύ των συνεργατικών κόμβων είτε της απόδοσης αυτού [148], προτείνεται η διαφορετική αντιμετώπιση της δικαιοσύνης μεταξύ των κόμβων σε κάθε φάση του σχήματος σχηματισμού συνασπισμών. Επιπλέον, η έννοια της δικαιοσύνης ορίζεται με διαφορετικό τρόπο όταν εξετάζεται υπό ενδο-συνασπιστική θεώρηση σε σχέση με δια-συνασπιστική θεώρηση.

4.6.1 Ενδο-συνασπιστική δικαιοσύνη

Κατά τη διάρκεια της φάσης έναρξης λειτουργίας του σχήματος και όπως προκύπτει από την (4.3), η αξία ενός κόμβου εξαρτάται καθοριστικά από τη σειρά αποδοχής του σε κάποιο

συνασπισμό. Έστω ότι οι κόμβοι n_i και n_m εξασφαλίζουν τη συμμετοχή τους στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ τις χρονικές στιγμές $t_i, t_m, t_i < t_m$, αντίστοιχα. Καθώς κατά τη φάση της έναρξης λειτουργίας οι συνασπισμοί αποκτούν σταδιακά μεγαλύτερο πλήθος κόμβων κατά μέσο όρο, ισχύει ότι $|\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_i} \leq |\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_m}$. Συνεπώς, θεωρώντας ότι ισχύει η (4.13), ισχύει και η

$$\frac{\widehat{v}(n_i, k, r_j)}{\widehat{v}(n_m, k, r_j)} = \frac{(|\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_i} - 1) \cdot f(d(n_i, k), q)}{(|\widehat{\mathcal{S}(k, r_j)}|_{n_m} - 1) \cdot f(d(n_m, k), q)} \leq 1 \quad (4.24)$$

Η (4.24) φανερώνει ότι, καίτοι οι κόμβοι n_i και n_m συμμετέχουν στον ίδιο συνασπισμό, η αξία τους μπορεί να μην είναι ίδια κατά τη φάση έναρξης του σχηματισμού συνασπισμών στο WSN. Ακολουθώντας μια λογική παρόμοια με αυτήν που παρουσιάστηκε στο εδάφιο 4.3.3 και λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνεργατική αξία ενός κόμβου προκύπτει από το όφελος το οποίο η συμμετοχή του σε ένα συνασπισμό αποφέρει στα υπόλοιπα μέλη του τελευταίου, καθώς διευρύνονται οι συνασπισμοί, οι κόμβοι που γίνονται αποδεκτοί αργότερα αναμένεται να λάβουν μεγαλύτερη αξία σε σχέση με τους κόμβους που έγιναν αποδεκτοί νωρίτερα, αφού η συνεισφορά τους αναμένεται να είναι μεγαλύτερη. Στην πραγματικότητα, η βασισμένη σε κίνητρα αυτοβελτιστοποίησης συνεργασία είναι η γενεσιουργός αιτία για τη δημιουργία των αρχικών συνασπισμών.

Κατά τη διάρκεια των φάσεων βελτιστοποίησης και σταθερής λειτουργίας οι οριακές συνεισφορές όλων των κόμβων είναι ίσες, καθώς όλες οι μετρήσεις των κόμβων θεωρούνται επαρκώς ακριβείς. Έτσι, η δια-συνασπιστική δικαιοσύνη είναι εγγυημένη καθώς οι αξίες δύο κόμβων που ανήκουν στον ίδιο συνασπισμό, έστω $n_i, n_m \in \mathcal{S}(k, r_j)$, είναι ίσες, δηλαδή

$$v(n_i, k, r_j) = |\mathcal{S}(k, r_j)| - 1 = v(n_m, k, r_j) \quad (4.25)$$

Η δικαιοσύνη στο αντίστοιχο TU παίγνιο δημιουργίας συνασπισμών είναι επίσης εγγυημένη λόγω της συμμόρφωσής του με τα βασικά αξιώματα του Shapley, όπως αποδεικνύεται στο παράρτημα Α.

Η διαφορετική αντιμετώπιση της ακρίβειας στις διάφορες φάσεις σχηματισμού συνασπισμών βασίζεται στο ότι κατά τη διάρκεια της φάσης έναρξης λειτουργίας, οπότε το παίγνιο χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή πληροφόρηση των παικτών-κόμβων, οι κόμβοι έχουν ως μοναδικό κίνητρο τη συμμετοχή τους σε κάποιο συνασπισμό για να μεγιστοποιήσουν το όφελός τους, χωρίς να γνωρίζουν τη σειρά αποδοχής τους. Από την άλλη πλευρά, κατά τη διάρκεια των φάσεων της βελτιστοποίησης και της σταθερής λειτουργίας, οπότε υπάρχει πλήρης πληροφόρηση σχετικά με τη δομή συνασπισμών του WSN, οι αξίες των κόμβων αντανακλούν την πραγματική συνεισφορά τους στο WSN.

4.6.2 Δια-συνασπιστική δικαιοσύνη

Παρά το γεγονός ότι η ενδο-συνασπιστική δικαιοσύνη είναι εγγυημένη στη φάση σταθερής λειτουργίας, η δια-συνασπιστική δικαιοσύνη δεν είναι, αφού οι κόμβοι που ανήκουν σε διαφορετικούς συνασπισμούς λαμβάνουν, στη γενική περίπτωση, διαφορετικά συνεργατικά οφέλη. Γενικώς, το προτεινόμενο σχήμα σχηματισμού συνασπισμών οδηγεί, σε διαφορετικού μεγέθους συνασπισμούς, επιβάλλοντας προς τούτο την άδικη κατανομή συνεργατικής αξίας στους κόμβους σε δια-συνασπιστικό επίπεδο. Καίτοι η μη ομοιόμορφη ομαδοποίηση κόμβων έχει ερευνηθεί εκτενώς στη σχετική με τα WSN βιβλιογραφία, όπως π.χ. στις παραπομπές [100] and [149], η δικαιοσύνη στο πλαίσιο αυτού του είδους ομαδοποίησης δεν έχει ερευνηθεί.

Συνοψίζοντας, το προτεινόμενο παίγνιο δημιουργίας συνασπισμών προωθεί την αποτελεσματικότητα αντί της δια-συνασπιστικής δικαιοσύνης, ενώ ισορροπεί βέλτιστα τις δύο έννοιες υπό ενδο-συνασπιστική θεώρηση.

4.7 Αριθμητικά αποτελέσματα και συζήτηση

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που αφορούν την επίδοση του προτεινόμενου σχήματος σχηματισμού συνασπισμών έχουν προκύψει θεωρώντας ένα υποθετικό WSN αποτελούμενο από N κόμβους με ακτίνα εκπομπής T_r καθώς και R αντιπροσώπους, ανεπτυγμένο επί τετραγωνικής περιοχής διαστάσεων $H \times H$. Σύμφωνα με την παραπομπή [150], ένα WSN χαρακτηρίζεται ως *πλήρως συνδεδεμένο* όταν ο μέσος βαθμός των κόμβων του $d = \overline{\deg(n_i)}$ είναι μεγαλύτερος του 6, όπου $\deg(n_i) = \rho\pi T_r^2$ και ρ είναι η πυκνότητα κόμβων του δικτύου [151]. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν, θεωρούνται WSN σχεδόν πλήρως σύνδεσης ($d \approx 5.6$), εκτός των περιπτώσεων όπου ρητά αναφέρεται διαφορετικότητα. Η παράμετρος λ που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του σταθμισμένου βαθμού κόμβων του WSN μέσω της (4.5) έχει τεθεί ίση με 0.75.

Το υπό παρακολούθηση φαινόμενο θεωρείται ότι ακολουθεί την κατανομή Gauss ως προς την απόσταση x μεταξύ δύο κόμβων (βλ. εδάφιο 4.3.3 για λεπτομέρειες και συζήτηση), δηλαδή

$$C(x) = e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (4.26)$$

όπου σ είναι η τυπική απόκλιση που χαρακτηρίζει τις μετρήσεις του υπό παρακολούθηση φυσικού φαινομένου. Μεγάλες τιμές τυπικής απόκλισης καταδεικνύουν ότι οι μετρήσεις από γειτονικούς κόμβους χαρακτηρίζονται από υψηλή χωρική συσχέτιση. Για τις προσομοιώσεις έχει θεωρηθεί ότι $\sigma = H/15$, εκτός αν ρητά αναφέρεται διαφορετικά. Η υιοθέτηση της κανονικής κατανομής για τη στατιστική περιγραφή της χωρικής συσχέτισης των μετρήσεων είναι εύλογη καθώς έχει χρησιμοποιηθεί και σε άλλες περιπτώσεις της πρόσφατης σχετικής

βιβλιογραφίας ([140] και [152]). Εντούτοις, κάθε ρεαλιστική συνάρτηση μαθηματικής περιγραφής της χωρικής συσχέτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί, χωρίς να επηρεάζει την ορθότητα της ανωτέρω ανάλυσης.

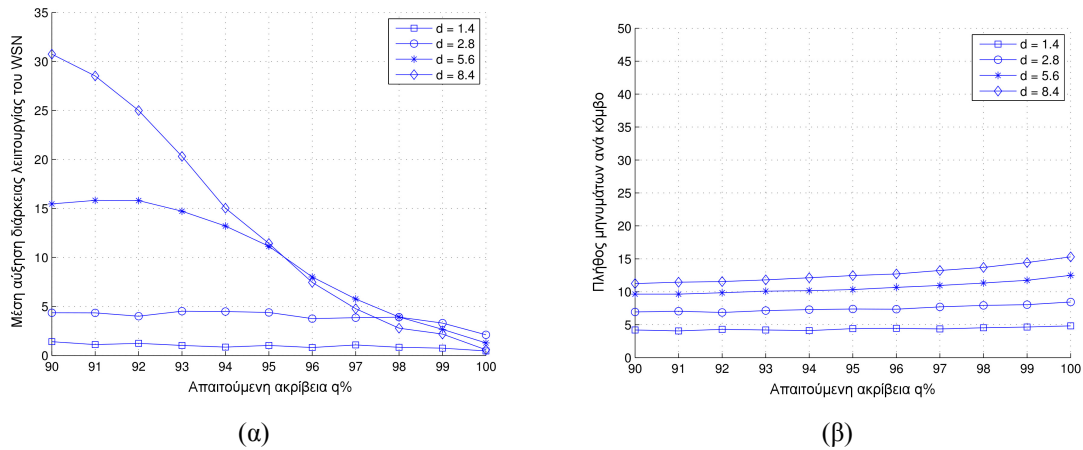
Καθώς το συνολικό κέρδος λόγω σχηματισμού συνασπισμών ποσοτικοποιείται από το άθροισμα της αξίας των βελτιστοποιημένων δομών συνασπισμών, η συνολική αύξηση της διάρκειας λειτουργίας του WSN (WSN Lifetime Increase, WLI) μπορεί να εκφρασθεί μέσω της σχέσης

$$WLI = \sum_{r_j \in R} \left\{ \sum_{S(k, r_j) \in CS^*(r_j)} \frac{V(k, r_j)}{N} \right\} \quad (4.27)$$

όπου η αξία $V(k, r_j)$ προκύπτει από την (4.15) και $CS^*(r_j)$ είναι η βέλτιστη δομή συνασπισμών όπως προσδιορίστηκε από τον αντιπρόσωπο r_j κατά τη διάρκεια της φάσης βελτιστοποίησης.

Αρχικά, εξετάζεται η εξάρτηση της επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος σχηματισμού συνασπισμών από το μέσο βαθμό των κόμβων του WSN. Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η WLI και το μέσο πλήθος μηνυμάτων που αποστέλλονται από τους κόμβους συναρτήσει της ακρίβειας q . Όπως αναμενόταν, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.4(α) επιβεβαιώνουν ότι η επίδοση του σχήματος εξαρτάται δραστικά από την ελάχιστη αποδεκτή ακρίβεια που προδιαγράφει την αποδεκτή λειτουργία του WSN. Σχετικά χαμηλές τιμές του q επιτρέπουν τη δημιουργία μεγαλύτερων συνασπισμών, αυξάνοντας τη μέση διάρκεια ζωής του WSN. Ένα άλλο ενδιαφέρον συμπέρασμα που εξάγεται από το Σχήμα 4.4(α) είναι ότι μείωση της ακρίβειας των μετρήσεων των κόμβων ενός συνασπισμού από το 97% στο 93% οδηγεί σε σημαντική μεταβολή της αύξησης της διάρκειας ζωής του WSN από περίπου 5 φορές σε 15 φορές, όταν $d = 5.6$, ή σε 20 φορές, όταν $d = 8.4$. Αυτό οφείλεται στην απότομη κλίση που εμφανίζει η καμπύλη της WLI στην περιοχή από $q = 92\%$ ως και $q = 97\%$ όταν $d = 5.6$ ή $d = 8.4$. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για να προσδώσει αυξημένη διάρκεια λειτουργίας σε WSN με χαλαρούς περιορισμούς ακρίβειας. Όταν $q \rightarrow 100\%$, οι κόμβοι τείνουν να καταπιέσουν κάθε συνεργατική συμπεριφορά και η λειτουργία του WSN γίνεται σταδιακά αμιγώς μη-συνεργατική, μια κατάσταση δηλαδή κατά την οποία υπάρχουν κυρίως μοναδιαίοι συνασπισμοί. Σε αυτήν την εξαιρετική περίπτωση, η μέση WLI δεν είναι αξιόλογη. Σε κάθε περίπτωση, αύξηση του μέσου βαθμού των κόμβων οδηγεί, γενικά, σε αύξηση της διάρκειας λειτουργίας του WSN, καθώς το μέσο πλήθος κόμβων των συνασπισμών αυξάνεται προς όφελος της συνεργατικής τους αξίας και, συνεπώς, της διάρκειας λειτουργίας του WSN.

Στη συνέχεια, η τηλεπικοινωνιακή επιβάρυνση (επιπλέον τηλεπικοινωνιακή κίνηση) που προκαλείται λόγω της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου εξετάζεται συναρτήσει του μέσου βαθμού των κόμβων του WSN. Από το Σχήμα 4.4(β) προκύπτει ότι το πλήθος των μηνυμάτων που αποστέλλονται ανά κόμβο κατά τη διάρκεια του σχηματισμού συνασπισμών



Σχήμα 4.4: Επίδοση του προτεινόμενου σχήματος καθώς μεταβάλλεται ο μέσος βαθμός των κόμβων του WSN.

(α) Μέση αύξηση της διάρκειας λειτουργίας του WSN.

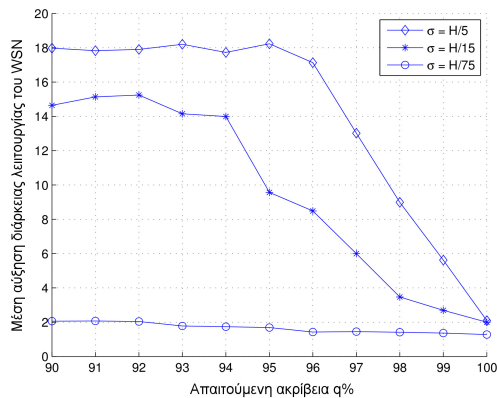
(β) Πλήθος μηνυμάτων ανά κόμβο κατά τη διάρκεια του σχηματισμού συνασπισμών.

δεν επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα κόμβων του WSN, δηλαδή η πολυπλοκότητα σε όρους αποστολής μηνυμάτων ανά κόμβο της προτεινόμενης μεθόδου είναι $O(1)$ και η συνολική σχετική πολυπλοκότητα του WSN είναι $O(N)$.

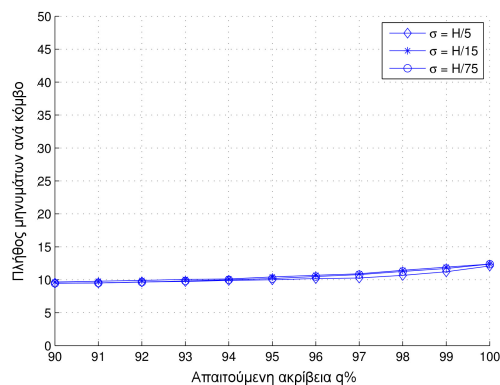
Η εξάρτηση της επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος από το βαθμό της χωρικής συσχέτισης εξετάζεται στο Σχήμα 4.5. Καθώς η ύπαρξη υψηλής χωρικής συσχέτισης εξασφαλίζει ότι το φυσικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από μικρή χωρική μεταβλητότητα, η εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αύξηση της διάρκειας ζωής του WSN σε σύγκριση με φαινόμενα που χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές χωρικής συσχέτισης. Αυτό προκύπτει άμεσα από το Σχήμα 4.5(α). Επιπλέον, όπως συνάγεται από τις καμπύλες του Σχήματος 4.5(β), το μέσο πλήθος των μηνυμάτων που αποστέλλονται από τους κόμβους του (συνεργατικού) WSN εξαρτάται ελάχιστα από τη χωρική συσχέτιση που χαρακτηρίζει το υπό παρακολούθηση φυσικό φαινόμενο.

Όπως αναφέρεται στο εδάφιο 4.2, το πλήθος των αντιπροσώπων σε ένα WSN επηρεάζει τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του. Καίτοι το μεγάλο πλήθος αντιπροσώπων αυξάνει τη διαθέσιμη υπολογιστική δύναμη του WSN, ενδεχομένως περιορίζει το αναμενόμενο όφελος από τη δημιουργία συνασπισμών καθώς μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό μεγάλου πλήθους συνασπισμών. Στο Σχήμα 4.6 εξετάζεται η επίδοση του WSN όταν μεταβάλλεται η πυκνότητα των αντιπροσώπων οριζόμενη ως $\rho_R = N/R$. Οι προσομοιώσεις επιβεβαιώνουν τη διαίσθηση, αφού αύξηση της τιμής της ρ_R οδηγεί σε σημαντική μείωση της WLI χωρίς να προσφέρει ουσιαστική μείωση της τηλεπικοινωνιακής επιβάρυνσης των κόμβων.

Από το Σχήμα 4.6(α) είναι ενδεχόμενο να εξαχθεί το λανθασμένο συμπέρασμα ότι η χρήση του χαμηλότερου δυνατού πλήθους αντιπροσώπων αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή για



(α)

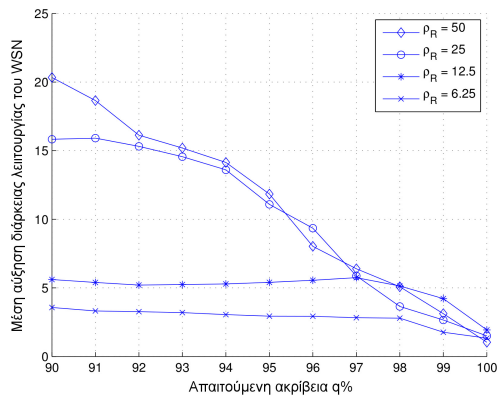


(β)

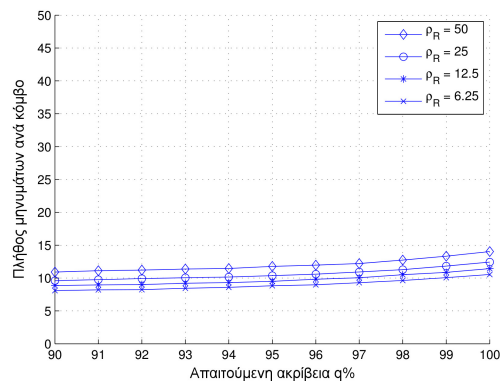
Σχήμα 4.5: Επίδοση του προτεινόμενου σχήματος καθώς μεταβάλλεται ο μέσος βαθμός χωρικής συσχέτισης του υπό παρακολούθηση φαινομένου.

(α) Μέση αύξηση της διάρκειας λειτουργίας του WSN.

(β) Πλήθος μηνυμάτων ανά κόμβο κατά τη διάρκεια του σχηματισμού συνασπισμών.



(α)

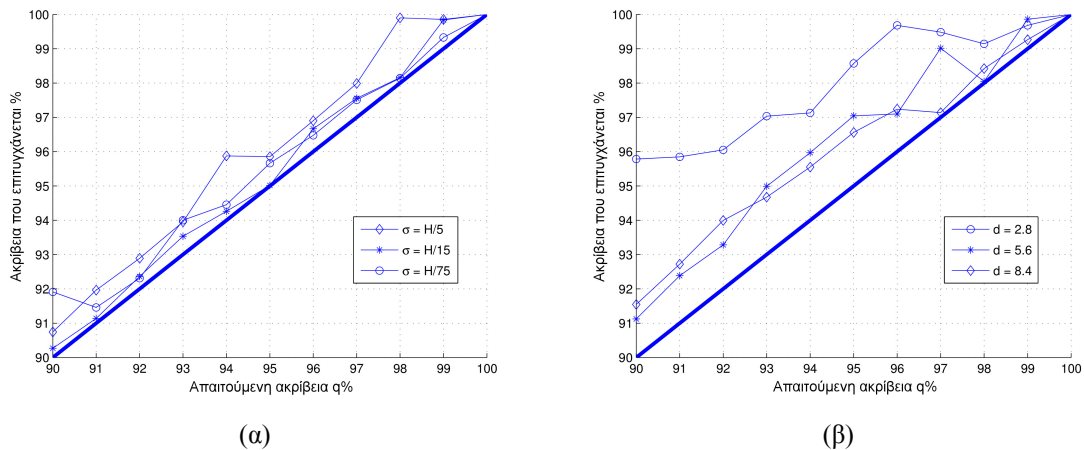


(β)

Σχήμα 4.6: Επίδοση του προτεινόμενου σχήματος δημιουργίας συνασπισμών όταν μεταβάλλεται το πλήθος των αντιπροσώπων.

(α) Μέση αύξηση της διάρκειας λειτουργίας του WSN.

(β) Πλήθος μηνυμάτων ανά κόμβο κατά τη διάρκεια του σχηματισμού συνασπισμών.

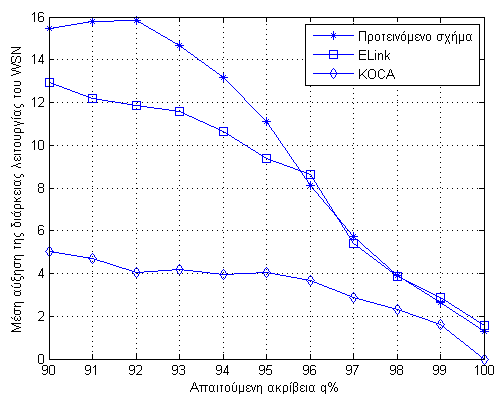


Σχήμα 4.7: Ακρίβεια που επιτυγχάνεται από το προτεινόμενο σχήμα. Η έντονη γραμμή καταδεικνύει την ελάχιστη απαιτούμενη ακρίβεια.
 (α) Συναρτήσε του βαθμού χωρικής συσχέτισης.
 (β) Συναρτήσε του μέσου βαθμού των κόμβων του WSN.

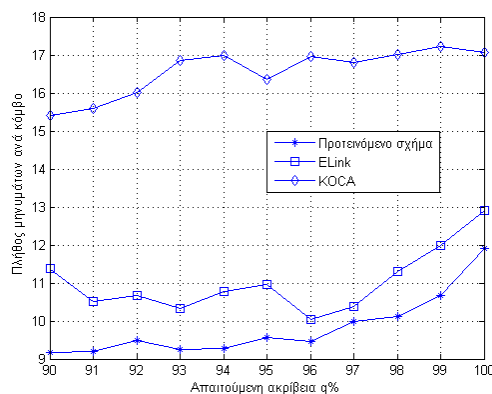
κάθε WSN ανεξαρτήτως μεγέθους. Εντούτοις, η χρήση περισσότερων αντιπροσώπων καθιστά εφικτή την ταχεία προσαρμογή της συνεργατικής λειτουργίας του WSN στις δικτυακές ή περιβαλλοντικές αλλαγές, σε βάρος της ελεγχόμενης μείωσης της αύξησης της διάρκειας ζωής του WSN.

Μία προσομοίωση με ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφορά την πραγματική ακρίβεια των μετρήσεων που επιτυγχάνεται μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχηματισμού συνασπισμών. Το Σχήμα 4.7 δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η χωρική συσχέτιση του φυσικού φαινομένου τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται σε σχέση με την ελάχιστη αποδεκτή. Από το Σχήμα 4.7(β) προκύπτει ότι ο σχηματισμός συνασπισμών σε WSN με χαμηλή πυκνότητα κόμβων οδηγεί σε αναφορές μετρήσεων που είναι αρκετά ακριβέστερες σε σχέση με την ελάχιστη αποδεκτή καθώς δεν είναι δυνατή η πλήρης αξιοποίηση της χωρικής συσχέτισης του υπό παρακολούθηση φαινομένου, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει σε WSN με υψηλή πυκνότητα κόμβων.

Τέλος, το προτεινόμενο σχήμα δημιουργίας συνασπισμών συγκρίνεται με το σχήμα ELink που παρουσιάζεται στην [102] και το σχήμα KOCA που προτείνεται στην [143]. Η σύγκριση γίνεται ως προς το μέγεθος WLI και την τηλεπικοινωνιακή επιβάρυνση που επιφέρει η εφαρμογή των ανωτέρω σχημάτων. Για τις σχετικές προσομοιώσεις υποτίθεται $d = 5.6$. Οι παράμετροι που αφορούν τον καθορισμό της συμπεριφοράς του KOCA, δηλαδή η πιθανότητα ενός κόμβου να είναι CH, p , και το μέγιστο πλήθος βημάτων που καθορίζει την ακτίνα μίας ομάδας, k , καθορίστηκαν με βάση τα σχετικά αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από την εφαρμογή της προτεινόμενης από τη διατριβή μεθόδου σχηματισμού συνασπισμών. Αν το προτεινόμενο σχήμα καταλήγει στο σχηματισμό u συνασπισμών, έκαστος των οποίων περιλαμβάνει κατά μέσο όρο \bar{n}_u κόμβους, τότε, με βάση την (5) της [143], οι παράμετροι για την



(α)



(β)

Σχήμα 4.8: Σύγκριση του προτεινόμενου σχήματος με τα σχήματα ELink και KOCA.

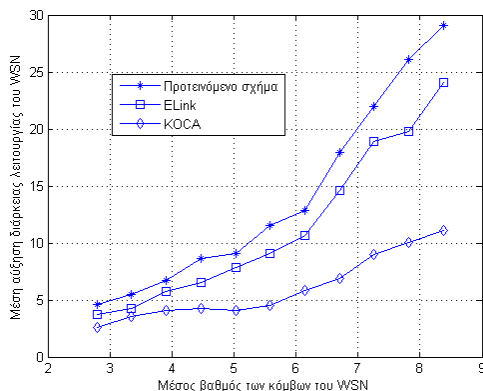
(α) Μέση αύξηση της διάρκειας ζωής του WSN.

(β) Μέσο πλήθος μηνυμάτων ανά κόμβο κατά τη διάρκεια του σχηματισμού συνασπισμών.

εφαρμογή του αντίστοιχου σχήματος KOCA προκύπτουν $p = 1/u$ και $k = \left\lceil \sqrt{\frac{\overline{n_u}}{\text{deg}(n_u)}} \right\rceil$.

Το Σχήμα 4.8(α) καταδεικνύει ότι η εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος αποφέρει σημαντικά αυξημένη WLI σε σύγκριση με το KOCA και μεγαλύτερη από το ELink όταν $q < 0.96$. Επιπλέον, το προτεινόμενο σχήμα δεν χρειάζεται a priori πληροφορία για να προσαρμοσθεί στα χαρακτηριστικά του WSN και λειτουργεί αυτόνομα χωρίς να χρειάζεται πρόσθετα πρωτόκολλα συγχρονισμού. Η βελτιωμένη επίδοση του προτεινόμενου σχήματος αποδίδεται: (i) στην απλή φάση έναρξης λειτουργίας που επιφέρει πολύ μικρή τηλεπικοινωνιακή επιβάρυνση και (ii) στη χρήση των αντιπροσώπων που επιταχύνουν και βελτιώνουν τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν η συμπεριφορά των κόμβων είναι λιγότερο συνεργατική (όταν $q \geq 0.96$) το προτεινόμενο σχήμα έχει επίδοση σχεδόν ταυτόσημη με το ELink. Αυτό οφείλεται στο ότι για πολύ υψηλές τιμές q , η διαδικασία βελτιστοποίησης δεν μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη δομή συνασπισμών που προκύπτει κατά τη φάση έναρξης λειτουργίας, καθώς οι αρνητικοί περιορισμοί που εκφράζονται μέσω της (4.21) μειώνουν δραστικά το πλήθος των εφικτών διαμερίσεων του WSN.

Στο Σχήμα 4.9 πραγματοποιείται σύγκριση των τριών σχημάτων συναρτήσει του μέσου βαθμού των κόμβων του WSN όταν $q = 0.95$. Η προτεινόμενη μέθοδος σχηματισμού συνασπισμών έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη WLI σε σύγκριση τόσο με το ELink όσο και με το KOCA, είτε για αραιά είτε για πυκνά WSN. Πρέπει να επισημανθεί ότι τόσο το ELink όσο και το προτεινόμενο σχήμα έχουν σημαντικά καλύτερες επιδόσεις από το KOCA καθώς αμφότερα είναι ικανά να αξιοποιήσουν στο έπακρο τη χωρική συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων των κόμβων. Αντιθέτως, καθώς το KOCA υιοθετεί τεχνικές τυχαιοποιημένης ομαδοποίησης, δεν αξιοποιεί αυτή τη χωρική συσχέτιση. Η ανωτέρω σύγκριση επιβεβαιώνει ότι, όταν πα-



Σχήμα 4.9: Σύγκριση του προτεινόμενου σχήματος με τα σχήματα ELink και KOCA συναρτήσει του μέσου βαθμού των κόμβων του WSN.

ρατηρούνται χωρικά συσχετισμένα φυσικά φαινόμενα, η τυχαιοποιημένη ομαδοποίηση δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο η χωρική ομαδοποίηση.

4.8 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών στο πλαίσιο της ομαδοποίησης κόμβων σε WSN συμβιβάζοντας βέλτιστα την ενεργειακή αυτονομία με την ακρίβεια των μετρήσεων που αναφέρουν οι κόμβοι του WSN. Συγκεκριμένα, αξιοποιείται η χωρική συσχέτιση των υπό παρακολούθηση φαινομένων για το σχηματισμό συνασπισμών κόμβων κατά καταναμημένο τρόπο. Στο πλαίσιο της συνασπιστικής λειτουργίας των κόμβων, θεωρείται ότι γειτονικοί κόμβοι αντιλαμβάνονται τη φύση των φυσικών φαινομένων με παρόμοιο τρόπο. Οι μετρήσεις αυτές αποστέλλονται στη συνέχεια σε κόμβους-αντιπροσώπους που είναι επιφορτισμένοι με τη συλλογή των μετρήσεων από τους κόμβους καθώς και το συντονισμό και βελτιστοποίηση της δομής και λειτουργίας των συνασπισμών. Η τελική διαδικασία βελτιστοποίησης αυξάνει σημαντικά τη διάρκεια λειτουργίας του WSN ακόμα και στην περίπτωση αραιών WSN ενώ, παράλληλα, ικανοποιείται το κριτήριο ελάχιστης ακρίβειας ως προς την πιστότητα των μετρήσεων των κόμβων του WSN, κριτήριο το οποίο καθορίζει και την αποδεκτή λειτουργία του WSN. Η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος μελετήθηκε και συγκρίθηκε με άλλα συναφή σχήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, καταδεικνύοντας ότι η θεωρία παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών μπορεί να εφαρμοσθεί με επιτυχία σε WSN, βελτιώνοντας περαιτέρω τη λειτουργία τους.

Κεφάλαιο 5

Εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών από Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα σχήμα χαμηλής πολυπλοκότητας που βελτιστοποιεί τη λειτουργία WSN πολλαπλών υπηρεσιών (Multi-Service WSN, MS-WSN) όταν αυτά υποστηρίζουν σχήματα ομαδοποίησης κόμβων. Το προτεινόμενο σχήμα βασίζεται στην έννοια των συσχετισμένων στρατηγικών που παρουσιάζονται στο εδάφιο 3.3.2. Συγκεκριμένα, γίνεται η υπόθεση ενός ομογενούς MS-WSN, δηλαδή όλοι οι κόμβοι είναι ικανοί να υπηρετούν όλες τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες. Εντούτοις, θεωρείται ότι κάθε κόμβος δεν μπορεί να εξυπηρετεί παράλληλα περισσότερες από μία υπηρεσίες. Ανταλλάσσοντας πληροφορίες σχετικά την κατάστασή τους και τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των υποστηριζόμενων υπηρεσιών και στην προσπάθειά τους να αυξήσουν το όφελός που προκύπτει από την ομαδοποίησή τους, οι κόμβοι επιλέγουν αυτόνομα την υποστήριξη της υπηρεσίας που μεγιστοποιεί την εκτιμώμενη διάρκεια λειτουργίας τους με βάση ένα max-min κριτήριο. Το προτεινόμενο σχήμα προσαρμόζεται σε αλλαγές του πλήθους ή των χαρακτηριστικών των υποστηριζόμενων υπηρεσιών. Καθώς η λειτουργία του βασίζεται αποκλειστικά σε ανταλλαγή πληροφοριών τοπικού χαρακτήρα, το σχήμα είναι πλήρως κατανεμημένο. Τέλος, αποδεικνύεται ότι η κατανομή των κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες συγκλίνει στη θεωρητική βέλτιστη όταν επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας ενός MS-WSN.

5.1 Διατύπωση μαθηματικών υποδειγμάτων ομαδοποίησης κόμβων σε MS-WSN

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η ενεργειακά αποδοτική λειτουργία των MS-WSN και προτείνεται ένα σχήμα που μεγιστοποιεί τη συνολική διάρκεια εξυπηρέτησης των υποστηριζόμενων από τα MS-WSN υπηρεσιών, θεωρώντας την εκ των υστέρων εφαρμογή κάποιου σχήματος ομαδοποίησης κόμβων. Τα συστατικά μέρη οποιουδήποτε αλγορίθμου ομαδοποι-

ησης κόμβων στο πλαίσιο εφαρμογής του σε MS-WSN συνοψίζονται μέσω της πλειάδας τιμών

$$\langle \xi, (\succ_{i,j,k}), v, \phi \rangle, n_i \in \mathcal{N}, s_j \in \mathcal{S}, C(s_j, k) \in \mathcal{C} \quad (5.1)$$

όπου

- $\xi = \{\xi(n_i, s_j, k), i = 1, \dots, |\mathcal{N}|, j = 1, \dots, |\mathcal{S}|, k = 1, \dots\}$ είναι μία δυαδική αντιστοίχιση που καταδεικνύει τις ομάδες κόμβων –που χαρακτηρίζονται από το δείκτη k – που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_j και στις οποίες μπορεί να προσχωρήσει ο κόμβος n_i , δηλαδή

$$\xi(n_i, s_j, k) = \begin{cases} 1, & \text{αν } \exists C(s_j, k) \in \mathcal{C} : n_i \in C(s_j, k) \\ 0, & \text{άλλως} \end{cases} \quad (5.2)$$

Στις (5.1) και (5.2), το μέγεθος \mathcal{C} είναι το σύνολο όλων των πιθανών ομάδων κόμβων, ως \mathcal{N} ορίζεται το σύνολο των κόμβων του MS-WSN, \mathcal{S} είναι το σύνολο των υποστηριζόμενων υπηρεσιών και $C(s_j, k)$ είναι η ομάδα κόμβων που εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j με δείκτη (ταυτότητα) k . Ένα έγκυρο σχήμα ομαδοποίησης απαιτεί να ισχύει ότι

$$\xi(n_i, s_j, k) = 1, \forall n_i \in C(s_j, k), \forall s_j \in \mathcal{S}, \forall C(s_j, k) \in \mathcal{C} \quad (5.3)$$

- $(\succ_{i,j,k})$ είναι μία διάταξη προτίμησης που ποσοτικοποιεί την προτίμηση του κόμβου n_i να ενσωματωθεί στην ομάδα $C(s_j, k)$.
- $v = v(n_i, s_j, k)$ είναι μία συνάρτηση απόδοσης αξίας που καθορίζει το όφελος που αποκομίζει ο κόμβος n_i όταν συμμετέχει στην ομάδα $C(s_j, k)$. Στην παρούσα ανάλυση, η αξία του κόμβου συσχετίζεται με τη διάρκεια λειτουργίας του και ποσοτικοποιεί την αύξηση της διάρκειας λειτουργίας του – αύξηση που οφείλεται στη συνεργατική συμπεριφορά του στο πλαίσιο της ομαδοποίησης κόμβων– σε σύγκριση με τη διάρκεια λειτουργίας του όταν δρα μη συνεργατικά. Η αξία ενός κόμβου που συμμετέχει σε κάποια ομάδα κόμβων εξαρτάται πρωτίστως από το μέγεθος της ομάδας. Στην πραγματικότητα, η διάταξη προτίμησης $(\succ_{i,j,k})$ βασίζεται συνήθως στην αξία που οι κόμβοι αναμένουν να αποκτήσουν μέσω της συμμετοχής τους σε οποιαδήποτε από τις ομάδες κόμβων που ικανοποιούν τους περιορισμούς ξ .
- $\phi(n_i, \mathbf{n}_{-i})$ είναι μια διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ του κόμβου n_i και των υπόλοιπων κόμβων του MS-WSN. Εκτός από την κατεύθυνση της ροής της μετάδοσης πληροφοριών, η $\phi(n_i, \mathbf{n}_{-i})$ περιγράφει και το είδος της ανταλλασσόμενης πληροφορίας.

Καίτοι το παρόν εδάφιο δεν προτείνει μια νέα μέθοδο ομαδοποίησης, προετοιμάζει ένα MS-WSN για την εκ των υστέρων εφαρμογή ενός σχήματος ομαδοποίησης. Στην πραγματικότητα, είναι αντίστοιχο προς την εφαρμογή ιεραρχικής ομαδοποίησης, όπου το πρώτο επίπεδο ομαδοποίησης καθορίζει την αντιστοίχιση των κόμβων σε υπηρεσίες και το δεύτερο επίπεδο είναι ο σχηματισμός των ομάδων που εξυπηρετούν κάθε υπηρεσία. Καθώς το προτεινόμενο σχήμα ασχολείται μόνο με το πρώτο επίπεδο, χρησιμοποιείται μία λίγο διαφορετική πλειάδα τιμών $\langle \xi, (\succ_{i,j}), v, \phi \rangle$, όπου ο δείκτης ταυτοποίησης των ομάδων, δηλαδή ο δείκτης k που εμφανίζεται στην (5.1), έχει παραλειφθεί για να εξασφαλισθεί η δικαιοσύνη στο δεύτερο επίπεδο, δηλαδή μεταξύ των ομάδων που εξυπηρετούν διαφορετικές υπηρεσίες.

5.1.1 Ανάλυση της αξίας των κόμβων

Ένα WSN θεωρείται *πυκνό* όταν οι κόμβοι του μπορούν να αντιληφθούν την ύπαρξη ενός αρκετά μεγάλου πλήθους (της τάξης των δεκάδων) κόμβων εντός της εμβέλειας επικοινωνίας τους [15]. Το σύνολο αυτών των κόμβων, δηλαδή οι γείτονες ενός βήματος (*1-hop* γείτονες), συνιστούν την 1-hop γειτονιά του κόμβου, η οποία στη συνέχεια θα συμβολίζεται ως $NG(n_i)$. Έστω ένα πυκνό ομογενές MS-WSN που αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων $\mathcal{N} = \{n_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ και ας υποτεθεί ότι κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει οποιαδήποτε υπηρεσία ανήκει στο σύνολο των διαθέσιμων υπηρεσιών $\mathcal{S} = \{s_j | j = 1, 2, \dots, S\}$. Το ενεργειακό προφίλ μιας υπηρεσίας s_j περιγράφεται από την πλειάδα τιμών $\langle E_j^s, T_j, f_j \rangle$, όπου E_j^s είναι η ενέργεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση μιας μέτρησης του φαινομένου με το οποίο σχετίζεται η s_j , T_j είναι η μέση διάρκεια αποστολής των δεδομένων μιας μέτρησης για την εξυπηρέτηση της s_j και f_j είναι η απαιτούμενη συχνότητα ανανέωσης των δεδομένων που αφορούν την s_j στον κόμβο συγκέντρωσης του MS-WSN, δηλαδή στον κόμβο n_s . Υποθέτοντας ότι (1) το MS-WSN είναι επαρκώς πυκνό ώστε η μέση απόσταση μεταξύ των 1-hop γειτόνων να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και (2) η απαιτούμενη ενέργεια για τη μετάδοση ενός μηνύματος αυξάνεται γραμμικά με το μέγεθός του [153], η μέση ενεργειακή κατανάλωση E_j^t ανά μήνυμα μπορεί να αντιστοιχηθεί με τη διάρκεια εκπομπής T_j [154]. Καίτοι ουσιαστικά τα μεγέθη E_j^s και E_j^t εξαρτώνται αποκλειστικά από τη φύση του υπό παρακολούθηση φαινομένου, η f_j μπορεί να μεταβάλλεται για την εξυπηρέτηση πολλαπλών κλάσεων στο πλαίσιο της ίδιας υπηρεσίας. Ο μέγιστος αριθμός μηνυμάτων που ένας κόμβος n_i μπορεί να αποστείλει όταν εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j δίδεται από τη σχέση

$$\gamma_j = \frac{E_o}{E_j^s + E_j^t} \cdot \frac{1}{f_j} \quad (5.4)$$

όπου E_o η ενέργεια που είναι αρχικά διαθέσιμη από τους κόμβους του MS-WSN. Αξίζει να σημειωθεί ότι το γ_j δεν επηρεάζεται από το υπερκείμενο σχήμα ομαδοποίησης και εκφράζει τη μη συνεργατική αξία ενός κόμβου όταν εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j . Καθώς το γ_j αρκεί

για τον καθορισμό του ενεργειακού προφίλ μιας υπηρεσίας s_j , στο εξής θα χρησιμοποιείται ως το αντίστοιχο μέτρο.

Όταν, στην προσπάθεια επέκτασης της διάρκειας λειτουργίας του, ένα MS-WSN αξιοποιεί σχήματα ομαδοποίησης, ο τρόπος αποστολής αναφορών από τους ομαδοποιημένους κόμβους μεταβάλλεται λόγω της συνεργασίας μεταξύ των κόμβων που ανήκουν στην ίδια ομάδα. Ανεξάρτητα από τα ειδικά χαρακτηριστικά του σχήματος ομαδοποίησης που εφαρμόζεται, η συνεργατική αξία ενός κόμβου υπερβαίνει την αντίστοιχη μη συνεργατική. Έτσι, η αξία ενός κόμβου n_i όταν συμμετέχει σε μια ομάδα που εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j δίδεται από τη σχέση

$$v_c(n_i, s_j, k) = \gamma_j \cdot v(n_i, s_j, k) \quad (5.5)$$

όπου $v_c(n_i, s_j, k)$ η συνάρτηση απονομής αξίας v που εμφανίζεται στην (5.1).

Η ορθή λειτουργία ενός MS-WSN προϋποθέτει την καθολική εξυπηρέτηση των υποστηριζομένων υπηρεσιών σε όλη την έκταση του MS-WSN¹. Στην περίπτωση όπου μία υπηρεσία δεν εξυπηρετείται σε κάποιο αρκετά μεγάλο τμήμα του δικτύου, η αξία του MS-WSN εκφυλίζεται καθώς αυτό αποτυγχάνει να εκπληρώσει καθολικά τον πολυτροπικό του χαρακτήρα. Έτσι, εκτός από τους λόγους που επιβάλλουν τη συνεργασία των κόμβων, η αξία ενός κόμβου σε ένα περιβάλλον πολλαπλών υπηρεσιών πρέπει να αντανακλά τη συνολική λειτουργία του MS-WSN, άρα και την καθολική υποστήριξη των υπηρεσιών που αυτό υποστηρίζει. Συνεπώς, οι οι κόμβοι πρέπει γνωρίζουν, στο βαθμό που τους επιτρέπει η πληροφόρησή τους², αν όλες οι υπηρεσίες εξυπηρετούνται κανονικά. Η παρούσα ανάλυση λαμβάνει υπόψη την ανάγκη για καθολική κάλυψη όλων των υπηρεσιών του MS-WSN με την εισαγωγή του δείκτη *καθολικής κάλυψης* (Universal Coverage) ή αλλιώς δείκτη UC

$$c(n_i, s_j) = \begin{cases} 1, & \text{αν } \exists n_m : n_m \in \mathcal{I}(n_i) \text{ τ.ω. } n_m \in \mathcal{C}(s_j, k), \mathcal{C}(s_j, k) \in \mathcal{C}, |\mathcal{C}(s_j, k)| \geq 1 \\ 0, & \text{άλλως.} \end{cases} \quad (5.6)$$

όπου $\mathcal{I}(n_i)$ η *πληροφοριακή γειτονιά* του κόμβου n_i και $|\bullet|$ το μέγεθος μιας ομάδας. Η εισαγωγή της έννοιας της πληροφοριακής γειτονιάς γίνεται για να υποδηλώσει το σύνολο των κόμβων με τους οποίους ο κόμβος n_i μπορεί να ανταλλάξει πληροφορία, είτε άμεσα είτε έμμεσα. Αντίστοιχα προς την υλοποίηση της διαδικασίας ανταλλαγής πληροφοριών $\phi(n_i, \mathbf{n}_{-i})$, η $\mathcal{I}(n_i)$ μπορεί να περιέχει περισσότερους κόμβους από την $NG(n_i)$, δηλαδή $\mathcal{I}(n_i) \supseteq NG(n_i)$. Η $\mathcal{I}(n_i)$ καθορίζει την πληροφορία που ο κόμβος n_i μπορεί να λάβει σχετικά με

¹Όταν η απαιτούμενη εξυπηρέτηση ορισμένων υπηρεσιών περιορίζεται σε περιορισμένο τμήμα του δικτύου, η σχετική διαφοροποίηση της ανάλυσης που ακολουθεί είναι απλή· για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζεται στη διατριβή.

²Η πληροφόρηση ενός κόμβου καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ο κόμβος αντιλαμβάνεται το δικτυακό του περιβάλλον μέσω της ανταλλαγής πληροφοριών με τους γείτονές του.

την κατάσταση του MS-WSN. Έτσι, η εξυπηρέτηση των υπηρεσιών που υποστηρίζονται από το MS-WSN μπορεί να γίνει αντιληπτή από τους κόμβους αποκλειστικά σε τοπικό επίπεδο. Αυτό ποσοτικοποιείται από το δείκτη UC που εισάγεται μέσω της (5.6). Συνεπώς, η πληροφοριακή γειτονιά εκάστου των κόμβων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να εγγυάται την καθολική εξυπηρέτηση υπηρεσιών, καθιστώντας επιτακτική την υλοποίηση επαρκώς πυκνών MS-WSN [155]. Στο εξής, οι όροι γειτονιά και γείτονες θα χρησιμοποιούνται για να καταδείξουν την πληροφοριακή γειτονιά και τα μέλη αυτής, αντίστοιχα.

Η (5.6) υποδηλώνει ότι στην περίπτωση όπου ούτε ο κόμβος n_i ούτε κάποιος γείτονας του εξυπηρετούν την υπηρεσία s_j , η s_j πρέπει να θεωρείται ως μη επαρκώς εξυπηρετούμενη. Με βάση την πληροφόρησή του, ο κόμβος n_i εκφυλίζει την υπηρεσία s_j αν $c(n_i, s_j) = 0$. Λαμβάνοντας υπόψη το μηδενισμό της αξίας ενός MS-WSN όταν έστω και μία υπηρεσία δεν εξυπηρετείται επαρκώς, η αξία ενός κόμβου που εκφυλίζει μια υπηρεσία πρέπει να είναι μηδενική. Έτσι, το όφελος π ενός κόμβου n_i που ανήκει στην ομάδα $C(s_j, k)$ πρέπει να σχετίζεται με το δείκτη UC σύμφωνα με τη σχέση

$$\pi(n_i, s_j, k) = \gamma_j \cdot c(n_i, s_j) \cdot v(n_i, s_j, k) \quad (5.7)$$

5.1.2 Βέλτιστη κατανομή κόμβων σε υπηρεσίες

Για τον καθορισμό την βέλτιστης κατανομής κόμβων στις υποστηριζόμενες από το MS-WSN υπηρεσίες, πρέπει να καθοριστούν οι σχεδιαστικοί στόχοι που προδιαγράφουν τη βέλτιστη λειτουργία του MS-WSN. Αυτοί οι στόχοι είναι:

1. Εγγύηση της καθολικής εξυπηρέτησης των υποστηριζομένων υπηρεσιών.
2. Μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας του MS-WSN
3. Εξασφάλιση δίκαιης μεταχείρισης των κόμβων που εξυπηρετούν διαφορετικές υπηρεσίες.

Ως προς τους δύο πρώτους στόχους, στο παρόν κεφάλαιο η διάρκεια λειτουργίας ενός MS-WSN είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ανάγκη καθολικής υποστήριξης των υπηρεσιών του, όπως αυτή εκφράζεται μέσω των (5.6) και (5.7). Προς τούτο, είναι απαραίτητη η χωρίς διακοπή εξυπηρέτηση του συνόλου των υπηρεσιών σε όλη την έκταση του MS-WSN. Συνεπώς, η διάρκεια λειτουργίας ενός MS-WSN ορίζεται ως ο χρόνος στη διάρκεια του οποίου όλες οι υπηρεσίες εξυπηρετούνται αδιακρίτως σε όλη την έκταση του MS-WSN. Ο ορισμός αυτός συνάδει με τον ευρέως αποδεκτό ορισμό των WSN μίας υπηρεσίας ως η χρονική διάρκεια μέχρι να εξαντληθούν για πρώτη φορά τα ενεργειακά του αποθέματα ενός κόμβου. Εξάλλου, ο ορισμός της διάρκειας λειτουργίας ενός MS-WSN οδηγεί τη σχετική σχεδίαση στην κατεύθυνση μεγιστοποίησης της ελάχιστης διάρκειας εξυπηρέτησης κάθε

υπηρεσίας. Συνεπώς, το προτεινόμενο σχήμα είναι βέλτιστο υπό ένα max-min κριτήριο. Ο τρίτος σχεδιαστικός στόχος είναι μια προδιαγραφή που επιβάλλεται από και σχετίζεται με την κατανομημένη φύση και λειτουργία του προτεινόμενου σχήματος. Καίτοι, η δικαιοσύνη και η αποτελεσματικότητα (οι επιδόσεις του σχήματος) δεν είναι πάντα δυνατό να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα, η διαχείριση της μεταξύ τους σχέσης ανταλλαγής (trade-off) είναι δυνατή. Μη συνεργατικά, πλήρως κατανομημένα πρωτόκολλα βελτιστοποίησης μπορεί να οδηγήσουν σε συμπεριφορές κόμβων που έχουν ως αποτέλεσμα τη μη ισορροπημένη λειτουργία τους και δεν εγγυώνται συστημική ισορροπία. Αντιθέτως, οι πλήρως κατανομημένες προσεγγίσεις που αποσκοπούν στην εξασφάλιση απόλυτης δικαιοσύνης μεταξύ των κόμβων συχνά οδηγούν σε λύσεις συστημικά σταθερές αλλά όχι αποτελεσματικές.

Για τη συνέχεια της ανάλυσης σχετικά με τη βέλτιστη κατανομή των κόμβων στις διάφορες υπηρεσίες ενός MS-WSN, ας θεωρηθεί ένα πυκνό WSN μιας υπηρεσίας με πυκνότητα κόμβων ρ και ένα γεωγραφικό τμήμα αυτού με εμβαδόν \mathcal{A} . Επίσης, έστω ότι ο αριθμός των κόμβων που ευρίσκονται εντός της περιοχής \mathcal{A} ισούται με M , δηλαδή $M = \rho \cdot \mathcal{A}$. Σε αντίθεση με την περίπτωση εξυπηρέτησης μίας υπηρεσίας, σε ένα MS-WSN ($S > 1$) δεν μπορούν όλοι οι κόμβοι εντός της περιοχής \mathcal{A} να συμμετέχουν σε ομάδες που εξυπηρετούν μόνο μία υπηρεσία, αφού πρέπει να εξυπηρετηθεί το σύνολο των υποστηριζόμενων υπηρεσιών. Ενδεικτικά, όταν $S = 2$, αν οι κόμβοι εντός της \mathcal{A} που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_1 σχηματίσουν μία ομάδα, έστω $\mathcal{C}(s_1, m_1)$, και οι κόμβοι που εξυπηρετούν την s_2 σχηματίσουν μία άλλη ομάδα, έστω $\mathcal{C}(s_2, m_2)$, $M = |\mathcal{C}(s_1, m_1)| + |\mathcal{C}(s_2, m_2)|$. Δηλαδή $|\mathcal{C}(s_1, k)| = \alpha_1 \cdot M$ και $|\mathcal{C}(s_2, m)| = \alpha_2 \cdot M$, όπου α_j είναι το ποσοστό των κόμβων που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_j , $j = 1, 2$, και

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (5.8)$$

Για την ικανοποίηση των σχεδιαστικών στόχων (1) και (2), οι υπηρεσίες s_1 και s_2 πρέπει να εξυπηρετούνται από τα μέλη των αντίστοιχων ομάδων, δηλαδή $\mathcal{C}(s_1, m_1)$, $m_1 = 1, 2, \dots$ και $\mathcal{C}(s_2, m_2)$, $m_2 = 1, 2, \dots$, ταυτόχρονα, για το ίδιο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, η ενδοομαδική δικαιοσύνη επιβάλλει την ισότητα στα οφέλη των κόμβων που ανήκουν στην ίδια ομάδα, δηλαδή $\pi(n_i, s_j, m) = \pi(n'_i, s_j, m)$, $\forall n_i, n'_i \in \mathcal{C}(s_j, m)$. Καθώς κατά τη διάρκεια της σταθερής λειτουργίας ο δείκτης UC όλων των κόμβων πρέπει είναι ίσος με 1, το όφελος ενός κόμβου που συμμετέχει σε μια ομάδα εξαρτάται αποκλειστικά από την υπηρεσία που εξυπηρετείται από την ομάδα του, δηλαδή $v(n_i, s_j, m) = v(s_j, m)$, $\forall n_i \in \mathcal{C}(s_j, m)$.

Όταν επιβάλλεται η δικαιοσύνη μεταξύ των κόμβων που εξυπηρετούν διαφορετικές υπηρεσίες στο πλαίσιο κάποιου MS-WSN, σχηματίζονται ομάδες περίπου ίδιου μεγέθους καθώς, σε αντίθετη περίπτωση, η διάρκεια εξυπηρέτησης μίας ή περισσότερων υπηρεσιών θα ήταν διαφορετική ή θα χαρακτηριζόταν από διαφοροποιήσεις τοπικού χαρακτήρα. Η ανάγκη αυτή για δίκαιη μεταχείριση των υποστηριζόμενων υπηρεσιών δημιουργεί την ανάγκη *συμμετρικής, ομογενούς* εξυπηρέτησης των υπηρεσιών σε όλη την έκταση του MS-WSN, δηλαδή

$v(s_j, m) = v(s_j)$ και $\pi(s_j, m) = \pi(s_j), \forall \mathbf{C}(s_j, m) \in \mathcal{C}, s_j \in \mathcal{S}$. Συνεπώς, η μέγιστη διάρκεια εξυπηρέτησης μιας υπηρεσίας s_j από την ομάδα $\mathbf{C}(s_j, m)$ δίδεται από

$$T(s_j) = \sum_{n_i \triangleright s_j} \pi(n_i, s_j) = \gamma_j \cdot \sum_{n_i \triangleright s_j} c(n_i, s_j) \cdot v(s_j) = \gamma_j \cdot v(s_j) \cdot |s_j|_{\mathcal{A}} \quad (5.9)$$

όπου ο συμβολισμός $n_i \triangleright s_j$ ερμηνεύεται ως «ο κόμβος n_i που εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j » και $|s_j|_{\mathcal{A}} = \sum_{\mathbf{C}(s_j, k) \in \mathcal{A}} |\mathbf{C}(s_j, k)|$ είναι το πλήθος των κόμβων που ευρίσκονται εντός της περιοχής \mathcal{A} και εξυπηρετούν την υπηρεσία s_j . Ο δείκτης UC έχει τεθεί ίσος με 1 καθώς σε κατάσταση ισορροπίας της λειτουργίας του MS-WSN η καθολική υποστήριξη όλων των υπηρεσιών είναι εγγυημένη. Επίσης, στην κατάσταση ισορροπίας η ελάχιστη διάρκεια εξυπηρέτησης των υποστηριζόμενων υπηρεσιών πρέπει να είσαι κοινή για όλες τις υπηρεσίες. Αυτό επιβάλλεται από τον έμμεσο στόχο max-min μεγιστοποίησης της διάρκειας λειτουργίας του MS-WSN που προαναφέρθηκε: αν έστω και μία υπηρεσία εξυπηρετηθεί περισσότερο από όσο χρειάζεται, μια άλλη υπηρεσία θα εξυπηρετηθεί λιγότερο, μειώνοντας τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του MS-WSN που εξ ορισμού συνδέεται με τη δεύτερη. Επιστρέφοντας στην περίπτωση του MS-WSN δύο υπηρεσιών που εκκίνησε την τρέχουσα ανάλυση, συμπεραίνεται ότι η κατανομή των κόμβων στις ομάδες που εξυπηρετούν τις δύο υπηρεσίες πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση

$$T(s_1) = T(s_2) \quad (5.10)$$

ή, άλλως,

$$\begin{aligned} |s_1|_{\mathcal{A}} \cdot \gamma_1 \cdot v(s_1) &= |s_2|_{\mathcal{A}} \cdot \gamma_2 \cdot v(s_2) \Leftrightarrow \\ \alpha_1 \cdot \gamma_1 \cdot v(s_1) &= \alpha_2 \cdot \gamma_2 \cdot v(s_2) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Εφόσον η $v(s_j)$ γενικά εξαρτάται από το συνολικό αριθμό των κόμβων που συμμετέχουν στις ομάδες που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_j και η ακριβής μορφή της προκύπτει από το σχήμα ομαδοποίησης που θα εφαρμοσθεί στη συνέχεια, δηλαδή μετά τη βέλτιστη κατανομή των κόμβων του MS-WSN στις προς εξυπηρέτηση υπηρεσίες, η (5.11) δεν μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω.

Έχοντας προσδιορίσει επιλύοντας τις (5.8) και (5.11) τη βέλτιστη κατανομή των κόμβων σε δύο υπηρεσίες, η εκτιμώμενη διάρκεια εξυπηρέτησης της s_1 είναι $T(s_1) = \alpha_1 \cdot \mathcal{A} \cdot \rho \cdot \gamma_1 \cdot v(s_1)$ και της s_2 είναι $T(s_2) = \alpha_2 \cdot \mathcal{A} \cdot \rho \cdot \gamma_2 \cdot v(s_2) = T(s_1)$.

Για τη γενίκευση της ανωτέρω ανάλυσης σε $S > 2$ υπηρεσίες, έστω ότι $\alpha_j > 0, j = 1, 2, \dots, S$ είναι η αναλογία των κόμβων που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_j , $\sum_{j=1}^S \alpha_j = 1$. Τότε, η βέλτιστη κατανομή των κόμβων στις υποστηριζόμενες από το MS-WSN υπηρεσίες προ-

κύπτει από τη λύση ως προς α_j του συνόλου των $\binom{S}{2} + 1$ εξισώσεων

$$\begin{aligned} T(s_i) = T(s_j) &\Leftrightarrow \\ \alpha_i \cdot \gamma_i \cdot v(s_i) = \alpha_j \cdot \gamma_j \cdot v(s_j), \quad \forall s_i, s_j \in \mathcal{S}, s_i \neq s_j \end{aligned} \quad (5.12)$$

και

$$\sum_{j=1}^S \alpha_j = 1 \quad (5.13)$$

5.1.3 Δυναμική λειτουργία ενός MS-WSN

Ας υποθεθεί, ότι τη χρονική στιγμή t_0 ένα MS-WSN έχει φθάσει σε κατάσταση ισορροπίας όπου οι κόμβοι είναι βέλτιστα κατανεμημένοι σε $m - 1 < S$ υπηρεσίες, δηλαδή στις υπηρεσίες s_1, s_2, \dots, s_{m-1} όπως ορίζεται από τις (5.12) και (5.13) για $m - 1$ υπηρεσίες. Έστω ότι, σε μια μεταγενέστερη χρονική στιγμή $t_1 > t_0$, το MS-WSN εκκινεί την εξυπηρέτηση μιας νέας υπηρεσίας, έστω s_m , $m \leq S$. Η διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών $\phi(n_i, \mathbf{n}_{-i})$ πρέπει να είναι κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε να εγγυάται ότι:

1. Οι κόμβοι θα λάβουν επαρκή πληροφορία σχετικά με (i) την έναρξη εξυπηρέτησης της νέας υπηρεσίας s_m και (ii) του ενεργειακού της προφίλ γ_m .
2. Οι κόμβοι θα οργανωθούν εκ νέου, αυτόνομα, προκειμένου να φέρουν το MS-WSN στη νέα κατάσταση ισορροπίας πραγματοποιώντας τις ελάχιστες δυνατές μεταβολές κατάστασης³.

Καθώς το πλήθος των MS-WSN υπηρεσιών αυξάνει, οι κόμβοι ανακατανέμονται στις υπηρεσίες που υποστηρίζονται κάθε φορά από το MS-WSN, ώστε, τελικά, οι περισσότεροι αποδοτικές ενεργειακά υπηρεσίες «χάνουν» περισσότερους κόμβους εξυπηρέτησης σε σχέση με τις λιγότερο αποδοτικές. Σε κάθε περίπτωση, η ανακατανομή των κόμβων πρέπει να εγγυάται την καθολική εξυπηρέτηση των υποστηριζόμενων υπηρεσιών και να ικανοποιεί τις (5.12) και (5.13).

5.2 Η προτεινόμενη κατανεμημένη προσέγγιση

Στη συνέχεια, προτείνεται μια κατανεμημένη προσέγγιση βασισμένη στη θεωρία παιγνίων για εφαρμογή σε MS-WSN, που αποσκοπεί στην υλοποίηση της θεωρητικά βέλτιστης κατανομής των κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες, όπως αυτή επιβάλλεται από τις (5.12) και (5.13).

³Η κατάσταση εξυπηρέτησης ενός κόμβου αναφέρεται στην υπηρεσία που ο κόμβος εξυπηρετεί.

5.2.1 Το προτεινόμενο πλαίσιο συσχετισμένων στρατηγικών

Το προτεινόμενο σχήμα συσχετισμένων στρατηγικών χρησιμοποιείται για να βεβαιώσει ότι, στην προσπάθειά τους να μεγιστοποιήσουν τη διάρκεια λειτουργίας τους σε ένα περιβάλλον πολλαπλών υπηρεσιών, οι κόμβοι θα επιλέξουν να εξυπηρετήσουν την κατάλληλη υπηρεσία με τρόπο κατανομημένο και αυτόνομο. Προς τούτο, αποσκοπώντας στη βελτιστοποίηση της κατανομής των κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες, το προτεινόμενο παίγνιο ορίζεται ως η πλειάδα τιμών $\langle \mathcal{N}, \mathcal{G}, \pi \rangle$, όπου \mathcal{N} το σύνολο των κόμβων του MS-WSN, \mathcal{G} είναι το σύνολο των συσχετισμένων προφίλ στρατηγικών και π η συνάρτηση οφέλους του παιγνίου. Ως στρατηγική κίνηση ορίζεται η επιλογή μιας υπηρεσίας εξυπηρέτησης από κάποιον κόμβο. Η σχετική συνάρτηση ωφέλειας π πρέπει να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Προκειμένου να είναι εφικτός ο προσδιορισμός της βέλτιστης στρατηγικής κίνησης, κάθε κόμβος πρέπει να γνωρίζει ή να είναι σε θέση να υπολογίσει το αντίστοιχο όφελος που προκύπτει από την επιλογή κάθε υπηρεσίας. Καθώς το προτεινόμενο σχήμα συσχετισμένων στρατηγικών αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του MS-WSN, άρα και των κόμβων αυτού, το όφελος αυτό πρέπει να εκφράζει το ενεργειακό πλεονέκτημα που προσφέρεται από την επιλογή μιας στρατηγικής κίνησης.
2. Για την ικανοποίηση των αυστηρών ενεργειακών περιορισμών που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία των MS-WSN, η απαραίτητη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κόμβων πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή.
3. Για την επίτευξη της ταχείας προσαρμογής της λειτουργίας τους και την αποφυγή άσκοπης, πλεονάζουσας τηλεπικοινωνιακής κίνησης, οι (συσχετισμένες) στρατηγικές των κόμβων πρέπει να συγκλίνουν στην κατάσταση ισορροπίας το ταχύτερο δυνατό.

Η πρώτη προδιαγραφή σχετίζεται με το κίνητρο και τη δυνατότητα εφαρμογής του προτεινόμενου παιγνίου. Επίσης, η κατανομημένη φύση των ad-hoc WSN, όπως τα MS-WSN που μελετώνται στο παρόν κεφάλαιο, επιβάλλει τη δυνατότητα τοπικού υπολογισμού του οφέλους κάθε κόμβου. Η δεύτερη απαίτηση υπονοεί ότι η απαραίτητη πληροφορία για τον τοπικό υπολογισμό του οφέλους των κόμβων πρέπει να συλλέγεται από τους τελευταίους επιφέροντας την ελάχιστη δυνατή τηλεπικοινωνιακή επιβάρυνση. Καθώς η αποστολή και λήψη δεδομένων αποτελεί την κύρια πηγή κατανάλωσης της ενέργειας των κόμβων, η μείωση του πλήθους των μεταδόσεων πληροφορίας συνεισφέρει στη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής ενός WSN. Η τρίτη απαίτηση σχετίζεται, επίσης, με τη διάρκεια λειτουργίας ενός MS-WSN: αν οι διαπραγματεύσεις μεταξύ των κόμβων μέχρι την επίτευξη της ισορροπίας είναι εκτεταμένες, η κατανάλωση ενέργειας για την πραγματοποίηση της ανταλλαγής πληροφοριών αυξάνει, μειώνοντας το όφελος που προκύπτει από την ομαδοποίηση των κόμβων του MS-WSN.

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση που αναπτύχθηκε στο εδάφιο 5.1 και τους ανωτέρω προβληματισμούς, η συνάρτηση οφέλους που ορίστηκε μέσω της (5.7) δεν ικανοποιεί τις τρεις ανωτέρω απαιτήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι η (5.7) δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε επίπεδο κόμβων καθώς η ακριβής τιμή της $v(n_i, s_j, k) = v(s_j)$ δεν είναι γνωστή στους κόμβους, λόγω του τοπικού χαρακτήρα της πληροφορίας που είναι στη διάθεσή τους. Έτσι, οι κόμβοι είναι υποχρεωμένοι να πραγματοποιήσουν πρόβλεψη αυτής της αξίας, βασισμένοι στην εκτίμησή τους σχετικά με το πώς οι γείτονές τους κατανομονται στις υποστηριζόμενες από το MS-WSN υπηρεσίες. Η εκτίμηση της $v(s_j)$ που γίνεται από τον κόμβο n_i συμβολίζεται ως $\hat{v}(n_i, s_j), \forall n_i \in \mathcal{N}, s_j \in \mathcal{S}$. Συνεπώς, προς ικανοποίηση της απαίτησης για κατανομημένο υπολογισμό του οφέλους των κόμβων, το όφελος του κόμβου n_i που εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j στο πλαίσιο του προτεινόμενου σχήματος συσχετισμένων στρατηγικών προτείνεται να δίδεται από τη σχέση

$$\pi(n_i, s_j) = \gamma_j \cdot c(n_i, s_j) \cdot \hat{v}(n_i, s_j) \quad (5.14)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι το όφελος ενός κόμβου που ανήκει στην ομάδα $C(s_j, k)$ που εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην (5.7) όπου συμβολιζόταν ως $\pi(n_i, s_j, k)$. Στη συνέχεια, αναλύθηκε ο λόγος για τον οποίο αυτό το όφελος εξαρτάται αποκλειστικά από την υπηρεσία που εξυπηρετεί ο κόμβος και, έτσι, κατέληξε στη μορφή $\pi(s_j) = \gamma_j \cdot v(s_j)$ μέσω των (5.9) και (5.11).

5.2.2 Βέλτιστη κατανομή κόμβων σε MS-WSN

Για τη διατύπωση του προτεινόμενου σχήματος συσχετισμένων στρατηγικών, ας θεωρηθεί ένα πυκνό WSN δύο υπηρεσιών χαρακτηριζόμενο από σταθερό μέσο βαθμό κόμβων \bar{d} . Ας θεωρηθούν, επίσης, δύο γειτονικοί κόμβοι n_i και n'_i που διαθέτουν κοινή πληροφόρηση σχετικά με τη δομή του MS-WSN, δηλαδή $\mathcal{I}(n_i) = \mathcal{I}(n'_i)$. Στη συνέχεια, θα εξετασθεί ο τρόπος με τον οποίο θα επιλέξουν την υπηρεσία που θα εξυπηρετήσουν. Εξετάζονται δύο προσεγγίσεις, μία βασισμένη σε καθαρές στρατηγικές που επιτυγχάνει την εδραίωση μιας καθαρής ισορροπίας Nash και μία βασισμένη στην προτεινόμενη προσέγγιση συσχετισμένων στρατηγικών που οδηγεί στην επίτευξη μιας συσχετισμένης ισορροπίας.

5.2.2.1 Η προσέγγιση καθαρών στρατηγικών

Έστω μία εγωιστική στρατηγική που επιβάλλει στους παίκτες την επιλογή στρατηγικών κινήσεων που οδηγούν το παίγνιο σε καταστάσεις που μεγιστοποιούν το προσωπικό τους όφελος. Αυτή η στρατηγική βασίζεται στην (5.14) σύμφωνα με την οποία ο κόμβος n_i προτιμά να εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j έναντι μιας άλλης $s'_j \neq s_j$, αν $\pi(n_i, s_j) > \pi(n_i, s'_j), \forall s'_j \in \mathcal{S} \setminus \{s_j\}$. Η σχετική διαδικασία περιγράφεται αλγοριθμικά από τον Αλγόριθμο 2.

Αλγόριθμος 2: Η εγωιστική στρατηγική μεγιστοποίησης του οφέλους των κόμβων.

Input: Οι υπηρεσίες που εξυπηρετούν οι γείτονες του κόμβου n_i .

Output: Η υπηρεσία που πρέπει να επιλεγεί ως επόμενη στρατηγική κίνηση από τον κόμβο n_i .

```

MaximizingSID = CurrentSID;
MaximumPayoff = CurrentPayoff;
for Κάθε υποστηριζόμενη υπηρεσία  $s_j$  do
    CandidatePayoff =  $\pi(n_i, s_j)$ ;
    if CandidatePayoff > MaximumPayoff then
        MaximumPayoff = CandidatePayoff;
        MaximizingSID =  $j$ ;
    end
end
return MaximizingSID;

```

	Υπηρεσίες	
	Συνέχεια εξυπηρέτησης της s_1	Αλλαγή για εξυπηρέτηση της s_2
Όφελος	$\pi(n_i, s_1) = \gamma_1 \cdot \hat{v}(n_i, s_1)$	$\pi(n_i, s_2) = \gamma_2 \cdot \hat{v}(n_i, s_2)$

Πίνακας 5.1: Πίνακας οφέλους του κόμβου n_i σύμφωνα με την εγωιστική προσέγγιση καθαρών στρατηγικών.

5.2.2.1.1 Η ενεργοποίηση των δύο υπηρεσιών δεν γνωστοποιείται ταυτόχρονα στους κόμβους του MS-WSN. Στην περίπτωση αυτή, ας υποτεθεί ότι τη χρονική στιγμή $t = t_0$ οι κόμβοι του MS-WSN –οι οποίοι μέχρι εκείνη τη στιγμή εξυπηρετούσαν την υπηρεσία s_1 – πληροφορούνται ότι ενεργοποιήθηκε και η υπηρεσία s_2 ⁴. Έστω ότι, τη χρονική στιγμή $t_0 + \Delta t$, ο κόμβος n_1 είναι ο πρώτος που εξετάζει την πιθανότητα μετάβασης από την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας s_1 στην εξυπηρέτηση της s_2 . Όντας μηδενικός τη χρονική στιγμή $t_0 + \Delta t$, ο δείκτης UC $c(n_1, s_2)$ επιβάλλει στον κόμβο n_1 να μεταβεί στην εξυπηρέτηση της υπηρεσίας s_2 . Αυτό θα συμβεί και με όλους τους κόμβους που, τη στιγμή της αντίστοιχης εξέτασης, δεν έχουν γείτονες που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_2 . Στη συνέχεια, ας υποτεθεί ότι ένας κόμβος n_i , $\mathcal{I}(n_i) \ni n_1$, εξετάζει αν τον συμφέρει να αλλάξει τη λειτουργία του με στόχο την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας s_2 αφού ο κόμβος n_1 έχει επιλέξει, πλέον, να εξυπηρετεί την s_2 . Τα οφέλη που ο κόμβος n_i αναμένει να λάβει κατά την εξυπηρέτηση οποιασδήποτε από τις δύο υποστηριζόμενες υπηρεσίες συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1. Καθώς και οι δύο υπηρεσίες εξυπηρετούνται από γείτονες του n_i – η s_2 από τον κόμβο n_1 τουλάχιστον και η s_1 από τους υπόλοιπους κόμβους που ανήκουν στο $\mathcal{I}(n_i)$ – οι δείκτες UC του κόμβου n_i ,

⁴Ο ακριβής μηχανισμός που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο αυτή η πληροφορία αναπαράγεται είναι εκτός σκοπιμότητας του παρόντος εδαφίου.

δηλαδή οι $c(n_i, s_1)$ και $c(n_i, s_2)$, είναι αμφότεροι ίσοι με 1. Επομένως, με βάση την (5.14), ο n_i θα αποφασίσει υπέρ της εξυπηρέτησης της s_2 αν

$$\pi(n_i, s_2) > \pi(n_i, s_1) \Rightarrow \hat{v}(n_i, s_2) > \hat{v}(n_i, s_1) \cdot (\gamma_1/\gamma_2) \quad (5.15)$$

Αξίζει να επισημανθεί ότι, στο πλαίσιο του παρόντος σεναρίου, η (5.15) αποτελεί τη χειρότερη δυνατή περίπτωση για την υπηρεσία s_2 καθώς (i) εξ ορισμού, η $\hat{v}(n_i, s_2)$ είναι αύξουσα συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας και (ii) ο κόμβος n_i έχει τον ελάχιστο δυνατό αριθμό γειτόνων που εξυπηρετούν την s_2 . Καθώς η $\hat{v}(n_i, s_2)$ είναι αύξουσα συνάρτηση του πλήθους των κόμβων που εξυπηρετούν την s_2 , αν η (5.15) ισχύει για τον κόμβο n_i , θα ισχύει για κάθε κόμβο $n'_i, \mathcal{I}(n'_i) \ni n_i$, οδηγώντας σε σταδιακή συρρίκνωση του πλήθους των κόμβων που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_1 . Στην πραγματικότητα, στην περίπτωση όπου ισχύει η (5.15), η υπηρεσία s_1 θα απομείνει να εξυπηρετείται μόνο από τους κόμβους που είναι υποχρεωμένοι να την εξυπηρετούν λόγω των σχετικών δεικτών UC. Αν η (5.15) δεν ισχύει, που αποτελεί και το πιθανότερο σενάριο λόγω του μεγάλου πλήθους των κόμβων που εξυπηρετούν από την αρχή την s_1 , τότε ούτε ο κόμβος n_i , ούτε κάποιος άλλος κόμβος που ανήκει στην $\mathcal{I}(n_1)$ θα έχουν το κίνητρο να επιλέξουν συνειδητά την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας s_2 , εκτός από αυτούς που θα υποχρεωθούν στην εξυπηρέτησή της λόγω της αναγκαιότητας για καθολική κάλυψη των υποστηριζόμενων υπηρεσιών σε όλο το εύρος του MS-WSN.

5.2.2.1.2 Η ενεργοποίηση των δύο υπηρεσιών γνωστοποιείται ταυτόχρονα στους κόμβους Καθώς πριν την ταυτόχρονη έναρξη εξυπηρέτησης των δύο υπηρεσιών από το MS-WSN καμία από τις δύο υπηρεσίες δεν εξυπηρετούνταν, οι δείκτες UC όλων των κόμβων είναι ίσοι με μηδέν. Συνεπώς, ο πρώτος κόμβος, έστω n_1 , που καλείται να αποφασίσει ποια υπηρεσία θα εξυπηρετήσει δεν έχει επίγνωση άλλων κόμβων που εξυπηρετούν κάποια από τις δύο υπηρεσίες. Έτσι, η εκτίμησή του σε σχέση με το πιθανό όφελος που θα αποκομίσει αν επιλέξει μία εκ των δύο υπηρεσιών μπορεί να βασισθεί μόνο στα ενεργειακά χαρακτηριστικά τους. Υποθέτοντας, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι $\gamma_1 > \gamma_2$, ο κόμβος n_i θα επιλέξει να εξυπηρετήσει την s_1 . Στη συνέχεια, έστω ότι ο κόμβος $n_2, n_2 \in \mathcal{I}(n_1)$ είναι ο επόμενος κόμβος που καλείται να αποφασίσει ποια υπηρεσία θα εξυπηρετήσει. Καθώς η υπηρεσία s_1 εξυπηρετείται από τον n_1 , ο n_2 είναι υποχρεωμένος να επιλέξει την εξυπηρέτηση της s_2 καθώς ο αντίστοιχος δείκτης UC είναι μηδέν. Τελικά, για να εξασφαλισθεί η καθολική εξυπηρέτηση των δύο υπηρεσιών, οι δύο πρώτοι κόμβοι, n_1 και n_2 , κατανέμονται σε διαφορετικές υπηρεσίες, π.χ. ο n_1 στην s_1 και ο n_2 στην s_2 .

Στη συνέχεια, ας υποθεθεί ότι ο κόμβος $n_i, \{n_1, n_2\} \in \mathcal{I}(n_i)$, είναι ο επόμενος κόμβος που καλείται να επιλέξει την υπηρεσία που θα εξυπηρετήσει. Καθώς οι δείκτες UC $c(n_i, s_1)$ και $c(n_i, s_2)$ είναι ίσοι με 1, λόγω των προηγούμενων αποφάσεων των κόμβων n_1 και n_2 , ο κόμβος n_i έχει την ευχέρεια να επιλέξει την υπηρεσία που μεγιστοποιεί το εκτιμώμενο όφελός του, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1. Ο κόμβος n_i δεν είναι σε θέση να γνωρίζει πλήρως

τις γειτονιές των n_1 και n_2 , καθώς $\mathcal{I}(n_i) \cap \mathcal{I}(n_1) \subseteq \mathcal{I}(n_1)$ και $\mathcal{I}(n_i) \cap \mathcal{I}(n_2) \subseteq \mathcal{I}(n_2)$. Έτσι, τα κριτήρια επιλογής της εξυπηρέτησης μίας εκ των s_1 και s_2 δεν είναι σαφή στον κόμβο n_i . Εντούτοις, καθώς οι αποφάσεις των υπόλοιπων γειτόνων του, δηλαδή των $n'_i \in \mathcal{I}(n_i) \setminus \{n_1, n_2\}$, δεν είναι γνωστές στον n_i , και στην περίπτωση αυτή, η απόφασή του βασίζεται αποκλειστικά στην πληροφορία που συνέλεξε από τις επιλογές των κόμβων n_1 και n_2 . Η διαχείριση αυτής της κατάστασης αβεβαιότητας αποτελεί το βασικό κίνητρο για την υιοθέτηση της έννοιας των συσχετισμένων στρατηγικών όπου, καίτοι οι στρατηγικές κινήσεις των κόμβων (παικτών) –οι οποίοι δρουν βάσει κινήτρων μεγιστοποίησης του ατομικού τους οφέλους– είναι ντετερμινιστικές, οι υπόλοιποι παίκτες μεταφράζουν αυτές τις κινήσεις ως τυχαίες διαδικασίες λόγω της ελλιπούς πληροφόρησης αναφορικά με τα χαρακτηριστικά του παιγνίου. Καθώς στη συγκεκριμένη περίπτωση ο n_i έχει ακριβώς την ίδια πληροφόρηση σχετικά με τις δύο υπηρεσίες, η απόφασή του μπορεί να βασισθεί μόνο στην (5.15). Ενδεικτικά, υποθέτοντας ότι η (5.15) δεν ισχύει, ο n_i θα επιλέξει την υπηρεσία s_1 . Καθώς η διασπορά πληροφοριών σχετικά με τις δύο υπηρεσίες συνεχίζεται, η ανάλυση της ανωτέρω καθαρής στρατηγικής παραμένει αμετάβλητη. Αυτό σταδιακά οδηγεί το MS-WSN σε μια κατάσταση ισορροπίας στην οποία η μία υπηρεσία υπερ-εξυπηρετείται και η εξυπηρέτηση της άλλης είναι εγγυημένη μονάχα στον ελάχιστο βαθμό, λόγω της σχετικής επιβολής από τους δείκτες UC των κόμβων.

Καταλήγοντας, και στις δύο περιπτώσεις του MS-WSN δύο υπηρεσιών που εξετάστηκαν, δηλαδή όταν οι δύο υπηρεσίες γίνονται γνωστές στους κόμβους ταυτόχρονα ή διαδοχικά, η καθαρή στρατηγική που καθορίζει την κατανομή των κόμβων στις δύο υπηρεσίες οδηγεί σε μία ισορροπία όπου η πλειοψηφία των κόμβων προτιμά να εξυπηρετεί την υπηρεσία με το καλύτερο ενεργειακό προφίλ, οδηγώντας στην υποτυπώδη εξυπηρέτηση της άλλης υπηρεσίας μόνο από το σύνολο των κόμβων που είναι υποχρεωμένοι να το πράξουν λόγω των δεικτών UC.

5.2.2.1.3 Γενίκευση σε S υπηρεσίες Γενικεύοντας σε $S > 2$ υπηρεσίες, η (5.15) οδηγεί, στην περίπτωση της υπό διερεύνηση καθαρής στρατηγικής, σε μια κατάσταση ισορροπίας που αποτελείται από μία υπερ-εξυπηρετούμενη και $S - 1$ υπο-εξυπηρετούμενες υπηρεσίες. Ας υποθεθεί ότι το αποτέλεσμα των $\binom{S}{2}$ διμερών παιγνίων μεταξύ των κόμβων συνοψίζεται στην υπερ-εξυπηρέτηση της υπηρεσίας s_j , αφήνοντας το σύνολο των υπηρεσιών που ανήκουν στο σύνολο $\mathcal{S} \setminus \{s_j\}$ να υπο-εξυπηρετείται. Τότε, οι κόμβοι που εξυπηρετούν μια υπηρεσία $s'_j \in \mathcal{S} \setminus \{s_j\}$ θα εξαντλήσουν τα ενεργειακά τους αποθέματα ταχύτερα σε σχέση με τους κόμβους που εξυπηρετούν την s_j επειδή το μικρό πλήθος κόμβων που εξυπηρετούν την s'_j ελαχιστοποιεί τα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή του υπερκείμενου σχήματος ομαδοποίησης. Όταν ένας κόμβος που εξυπηρετεί την s'_j εξαντλήσει την ενέργειά του, ένας από τους γείτονές του που εξυπηρετεί την s_j θα αποφασίσει την εξυπηρέτηση της s'_j για να αποφύγει τον εκφυλισμό της s'_j , ο οποίος, μέσω του σχετικού δείκτη UC, θα μηδένιζε

την αξία του στο MS-WSN. Έτσι, προκύπτουν διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας καθώς οι κόμβοι που εξυπηρετούν την ενεργειακά αποδοτικότερη υπηρεσία αναγκάζονται διαδοχικά να αποφασίσουν την εξυπηρέτηση των, προσωρινά, εκφυλισμένων υπηρεσιών. Στη διάρκεια της κατάστασης σταθερής λειτουργίας του (S υπηρεσιών) WSN, οι υπηρεσίες θα άρχιζαν να χάνουν κόμβους εξυπηρέτησης με αύξουσα σειρά με κριτήριο το μέτρο του ενεργειακού τους προφίλ (γ). Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε ουσιαστικά στη δέσμευση των ενεργειακών πόρων του MS-WSN για την εξυπηρέτηση των λιγότερο αποδοτικών ενεργειακά υπηρεσιών, εμποδίζοντας, ταυτόχρονα, την αποτελεσματική εφαρμογή των υπερκείμενων τεχνικών ομαδοποίησης. Επίσης, ως αποτέλεσμα της (αναπόφευκτης) μετάπτωσης κόμβων από τις περισσότερες στις λιγότερο αποδοτικές ενεργειακά υπηρεσίες, οι υπηρεσίες δεν θα εκφυλιζόνταν ταυτόχρονα αλλά σε αύξουσα σειρά με κριτήριο του ενεργειακού τους προφίλ. Αν υποθεθεί ότι $\gamma_1 > \gamma_2 > \dots > \gamma_S$, τότε η πρώτη υπηρεσία που θα εκφυλιζόταν θα ήταν η s_S , ακολουθούμενη από την s_{S-1} κ.ο.κ., μέχρι το σημείο όπου η υπηρεσία s_1 , όντας η πλέον αποδοτική ενεργειακά, θα εκφυλισθεί, επίσης.

Πρόταση 5.1. *Επειδή έχει ως αποτέλεσμα άνισους χρόνους εξυπηρέτησης, η εφαρμογή της εγωιστικής καθαρής στρατηγικής σε MS-WSN οδηγεί σε (i) μη βέλτιστη κατανομή κόμβων, (ii) μη αποτελεσματική λειτουργία καθώς μειώνει τα οφέλη που αναμένονται από την ομαδοποίηση κόμβων.*

Με παρόμοια ανάλυση, είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι η Πρόταση 5.1 ισχύει για κάθε καθαρή στρατηγική.

5.2.2.2 Η προτεινόμενη συσχετισμένη στρατηγική

Για τη μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας των MS-WSN προτείνεται μια συσχετισμένη στρατηγική. Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση ενός WSN δύο υπηρεσιών, και ακολουθεί η γενίκευση για την περίπτωση S υπηρεσιών.

Έστω κόμβος n_i σε ένα WSN δύο υπηρεσιών όπου $\gamma_1 > \gamma_2$. Καθώς η ακριβής σειρά της γνωστοποίησης των υπηρεσιών στους κόμβους δεν επηρεάζει την κατάσταση σταθερής λειτουργίας του MS-WSN, μπορεί να υποθεθεί ότι, αρχικά, ο κόμβος n_i εξυπηρετεί την υπηρεσία s_1 . Επίσης, ας υποθεθεί ότι, τη χρονική στιγμή $t = t_0$, ο n_i πρέπει να αποφασίσει αν θα αλλάξει τη λειτουργία του για να συνδράμει στην εξυπηρέτηση της υπηρεσίας s_2 . Έστω p η πιθανότητα ο n_i να συνεχίσει να εξυπηρετεί την s_1 και $1 - p$ η πιθανότητα να αλλάξει τη λειτουργία του προς εξυπηρέτηση της s_2 . Τότε, τα προσδοκώμενα οφέλη του n_i αντίστοιχα προς την επιλογή της s_1 ή της s_2 δίδονται στον Πίνακα 5.2.

Όπως ορίζεται στο εδάφιο 3.3.2, μια συσχετισμένη στρατηγική αποτελεί συσχετισμένη ισορροπία όταν οι κόμβοι δεν αναμένουν την απόκτηση μεγαλύτερου οφέλους μέσω της διαφοροποίησής τους από αυτή τη στρατηγική [135]. Εξισώνοντας τα αναμενόμενα οφέλη σε κατάσταση συσχετισμένης ισορροπίας προκύπτει

		Υπηρεσίες	
		s_1 (Πιθανότητα p)	s_2 (Πιθανότητα $1 - p$)
Όφελος		$\hat{\pi}(n_i, s_1) = \gamma_1 \cdot c(n_i, s_1) \cdot \hat{v}(n_i, s_1)$	$\hat{\pi}(n_i, s_2) = \gamma_2 \cdot c(n_i, s_2) \cdot \hat{v}(n_i, s_2)$

Πίνακας 5.2: Πίνακας οφέλους του κόμβου n_i σύμφωνα με την προσέγγιση συσχετισμένων στρατηγικών.

$$p \cdot \hat{\pi}(n_i, s_1) = (1 - p) \cdot \hat{\pi}(n_i, s_2) \quad (5.16)$$

Αντικαθιστώντας τα αναμενόμενα οφέλη όπως αυτά απεικονίζονται στον Πίνακα 5.2, η (5.16) μπορεί να γραφεί ισοδύναμα ως

$$p = \frac{\gamma_2 \cdot c(n_i, s_2) \cdot \hat{v}(n_i, s_2)}{\gamma_1 \cdot c(n_i, s_1) \cdot \hat{v}(n_i, s_1) + \gamma_2 \cdot c(n_i, s_2) \cdot \hat{v}(n_i, s_2)} \quad (5.17)$$

Οι εκτιμήσεις $\hat{v}(n_i, s_1)$ και $\hat{v}(n_i, s_2)$ γίνονται με βάση τις πληροφορίες που συλλέγει ο κόμβος n_i από τους γείτονές του μέσω της $\phi(n_i, \mathbf{n}_{-i})$. Έτσι, σύμφωνα με την (5.17), η πιθανότητα ένας κόμβος να επιλέξει την εξυπηρέτηση μιας υπηρεσίας εξαρτάται αποκλειστικά από το όφελος που αναμένει να λάβει όταν εξυπηρετήσει την άλλη υπηρεσία. Καίτοι διαισθητικά η επιλογή του n_i να εξυπηρετήσει την s_1 έπρεπε να βασίζεται στο κέρδος που αναμένει να λάβει από την s_1 , η (5.17) καταδεικνύει ότι σε κατάσταση ισορροπίας, η σχετική επιλογή βασίζεται στο κέρδος που ο κόμβος n_i αναμένει να λάβει από την s_2 . Ενσωματώνοντας τη διαδικασία $\phi(n_i, \mathbf{n}_{-i})$ στην εκτίμηση των $\hat{v}(n_i, s_1)$ και $\hat{v}(n_i, s_2)$, η (5.17) επιτυγχάνει να αντιστρέψει την τάση των κόμβων να δρουν εγωιστικά και τους εξαναγκάζει να δρουν με κριτήριο το συνολικό όφελος του WSN δύο υπηρεσιών.

Επεκτείνοντας την προηγούμενη ανάλυση σε MS-WSN, αν $p(n_i, s_j)$ είναι η πιθανότητα ο κόμβος n_i να επιλέξει την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας $s_j \in \mathcal{S}$, η εφαρμογή της μεθόδου εξίσωσης οφελών (payoff equating method) δίδει

$$p(n_i, s_j) \cdot \hat{\pi}(n_i, s_j) = (1 - p(n_i, s_j)) \cdot \hat{\pi}(n_i, s_{-j}), n_i \in \mathcal{N}, s_j \in \mathcal{S} \quad (5.18)$$

όπου το μέγεθος $\hat{\pi}(n_i, s_{-j})$ είναι το όφελος που ο κόμβος n_i αναμένει να λάβει όταν εξυπηρετεί οποιαδήποτε άλλη υπηρεσία, υπηρεσία δηλαδή που ανήκει στο σύνολο $\mathcal{S} \setminus \{s_j\}$. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία της (5.18) (βλ. Παράρτημα Γ), η πιθανότητα $p(n_i, s_j)$ προκύπτει

$$p(n_i, s_j) = \frac{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^S \gamma_m \cdot c(n_i, s_m) \cdot \widehat{v}(n_i, s_m)}{\sum_{k=1}^S \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^S \gamma_m \cdot c(n_i, s_m) \cdot \widehat{v}(n_i, s_m)}, \forall n_i \in \mathcal{N}, s_j \in \mathcal{S} \quad (5.19)$$

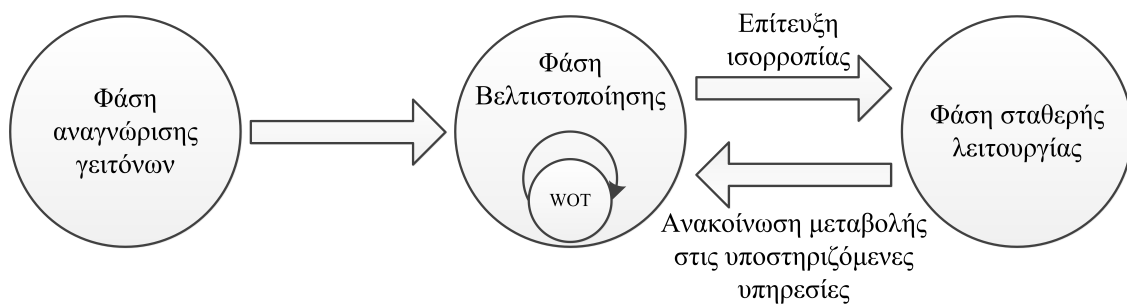
Σε σχέση με την προτεινόμενη συσχετισμένη στρατηγική, η (5.19) θεμελιώνει την τάση των κόμβων ενός MS-WSN να προτιμούν την εξυπηρέτηση υπο-εξυπηρετούμενων υπηρεσιών, προσπαθώντας να μεγιστοποιήσουν τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του MS-WSN. Προσεκτική εξέταση της (5.19) αποκαλύπτει ότι η ενσωμάτωση των δεικτών UC, $c(n_i, s_m)$, $n_i \in \mathcal{N}$, $s_m \in \mathcal{S}$, επιβάλλει ότι η πιθανότητα ο κόμβος n_i να επιλέξει μια προσωρινά εκφυλισμένη υπηρεσία s_j είναι ίση με 1, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την καθολική υποστήριξη των υπηρεσιών στο MS-WSN.

Η (5.19) δεν λαμβάνει υπόψη κάθε πιθανή κατάσταση του παιγνίου πολλών παικτών και πολλών στρατηγικών που περιγράφει αναλυτικά τη δυναμική της λειτουργίας του WSN. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν αποτελεί παράλειψη καθώς οι ενεργειακοί περιορισμοί που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία των κόμβων εμμέσως ορίζουν ότι οι λειτουργικές διεργασίες του MS-WSN πρέπει να ολοκληρώνονται επιφέροντας τον ελάχιστο δυνατό τηλεπικοινωνιακό και υπολογιστικό φόρτο στους κόμβους. Εξισώνοντας τα αναμενόμενα οφέλη ενός κόμβου μέσω της (5.18) (βλ. Παράρτημα Γ), ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων του παιγνίου μειώνεται σημαντικά επειδή οι κόμβοι γίνονται πρακτικά αδιάφοροι ως προς το ποια υπηρεσία θα εξυπηρετήσουν. Επιπλέον, η ανταλλαγή πληροφοριών που συσχετίζει τις στρατηγικές αποφάσεις των κόμβων μειώνει περαιτέρω τον αριθμό των πιθανών καταστάσεων του παιγνίου, επιτρέποντας στους κόμβους τον ταχύτερο και αποτελεσματικότερο –τόσο υπολογιστικά όσο και ενεργειακά– υπολογισμό της συσχετισμένης ισορροπίας. Τέλος, η ικανότητα των κόμβων να συλλέγουν τις απαιτούμενες πληροφορίες για τον αποτελεσματικό προσδιορισμό της βέλτιστης επιλογής υπηρεσίας όπως αυτή ορίζεται μέσω της (5.19), αποδεικνύει τη δυνατότητα κλιμάκωσης της επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος: ανεξάρτητα από το πλήθος των κόμβων που είναι διεσπαρμένοι σε όλη την έκταση ενός MS-WSN, η συμπεριφορά κάθε κόμβου εξαρτάται αποκλειστικά από την πληροφορία που αποκτά τοπικά από ένα μικρό υποσύνολο των κόμβων του δικτύου.

Η ισορροπία που καθορίζει η (5.19) είναι συσχετισμένη. Συνεπώς, για να εξασφαλισθεί ότι η προτεινόμενη συσχετισμένη στρατηγική οδηγεί στη βέλτιστη λειτουργία του MS-WSN, πρέπει να αποδειχθεί η ισοδυναμία της με τη θεωρητικά βέλτιστη κατανομή των κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες που εκφράζονται μέσω των (5.12) και (5.13). Η σχετική απόδειξη παρατίθεται στο Παράρτημα Δ.

5.3 Η υλοποίηση του προτεινόμενου σχήματος συσχετισμένων στρατηγικών.

Έχοντας αναλύσει τις θεωρητικές πτυχές της προτεινόμενης συσχετισμένης στρατηγικής, η υλοποίηση της προτεινόμενης (βέλτιστης) λειτουργίας ενός MS-WSN παρουσιάζεται στο εδάφιο 5.3. Η προτεινόμενη υλοποίηση, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1, μπορεί να διασπασθεί σε τρεις διακριτές φάσεις, δηλαδή τη φάση αναγνώρισης γειτόνων, τη φάση βελτιστοποίησης και τη φάση σταθερής λειτουργίας. Οι τελευταίες δύο φάσεις επανεκκινούν οσάκις υπάρχει μεταβολή στο πλήθος ή τα χαρακτηριστικά των υποστηριζόμενων από το MS-WSN υπηρεσιών.



Σχήμα 5.1: Οι φάσεις της προτεινόμενης υλοποίησης.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αναγνώρισης γειτόνων, η οποία ουσιαστικά είναι ανεξάρτητη από το προτεινόμενο σχήμα, οι κόμβοι ανταλλάσσουν μηνύματα που αποσκοπούν στην αναγνώριση των 1-hop γειτόνων τους. Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης, η λειτουργία του MS-WSN προδιαγράφεται από τη φάση βελτιστοποίησης, όπου η λειτουργία των κόμβων αποτελείται από διαδοχικές διαδικασίες αναμονής-βελτιστοποίησης-αποστολής (wait-optimize-transmit, WOT). Κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας WOT, οι κόμβοι διακόπτουν τη λειτουργία λήψης αποφάσεων για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα και, στη συνέχεια, αποφασίζουν ποιά υπηρεσία θα εξυπηρετήσουν ακολουθώντας την προτεινόμενη στρατηγική που οδηγεί στη συσχετισμένη ισορροπία, όπως αυτή καθορίζεται μέσω της (5.19). Όταν ένας κόμβος επιλέγει νέα υπηρεσία, ευρυεκπέμπει ένα μήνυμα για να ενημερώσει σχετικά τους γείτονές του. Σε αντίθετη περίπτωση, η διαδικασία WOT τερματίζεται.

Η περίοδος αναμονής πριν ένας κόμβος αποφασίσει ποιά υπηρεσία θα εξυπηρετήσει πρέπει να είναι ικανή ώστε να του επιτραπεί η επαρκής συλλογή πληροφοριών προκειμένου: (i) να εκτιμήσει όσο ακριβέστερα μπορεί την κατανομή των κόμβων της γειτονιάς του στις υποστηριζόμενες μέχρι εκείνη τη στιγμή υπηρεσίες και (ii) να πραγματοποιήσει τις λιγότερες δυνατές αλλαγές κατάστασης για να αποφευχθεί η άσκοπη ανταλλαγή μηνυμάτων. Οι συχνές χρονικές μεταβολές της κατάστασης των κόμβων εμποδίζουν την αποτελεσματική επιλογή υπηρεσίας σύμφωνα με το προτεινόμενο σχήμα συσχετισμένων στρατηγικών καθώς η εκτίμηση των κόμβων ως προς τα οφέλη που θα προκύψουν από την εφαρμογή του σχήμα-

τος ομαδοποίησης, δηλαδή οι ποσότητες $\hat{v}(n_i, s_m)$ της (5.19), μεταβάλλονται ταχέως. Αν οι κόμβοι περιμένουν αρκετά, μπορούν να αποκτήσουν ακριβέστερη πληροφόρηση σε σχέση με την κατάσταση λειτουργίας των γειτόνων τους. Συνεπώς, οι μεγάλες περιόδους αναμονής μετριάζουν τις συνέπειες των χρονικών μεταβολών της κατάστασης των κόμβων, επιτρέποντας την ακριβή εφαρμογή της (5.19), έχοντας ως αποτέλεσμα, εκτός των άλλων, πρόσθετα ενεργειακά οφέλη. Εντούτοις, η σύγκλιση στην κατάσταση ισορροπίας καθυστερεί σημαντικά, ενώ αναβάλλεται και η εφαρμογή του σχήματος ομαδοποίησης. Η σχέση ανταλλαγής (trade-off) μεταξύ σταθερότητας και επίδοσης επηρεάζει τη συνολική επίδοση του συστήματος καθιστώντας επιτακτική την κατάλληλη διαχείρισή της.

Στην προτεινόμενη υλοποίηση, η περίοδος αναμονής κάθε κόμβου (n_i) αποτελεί τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $(1, 2 \cdot |NG(n_i)|)$, δηλαδή η μέση τιμή της είναι ανάλογη του μεγέθους της 1-hop γειτονιάς του κόμβου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, καίτοι οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα μόνο με τους 1-hop γείτονές τους, μπορούν εντούτοις να διαδώσουν πληροφορίες σχετικές με την κατάσταση των δικών τους γειτόνων, η πιθανοτική φύση διάρκειας αναμονής των κόμβων παρέχει, κατά μέσο όρο, αρκετό χρόνο για τη συλλογή των πληροφοριών που απαιτούνται για την εφαρμογή της (5.19).

Κρίσιμο σημείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης αποτελεί ο τρόπος καθορισμού της ολοκλήρωσής της. Καθώς η θεωρητικά βέλτιστη κατανομή κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες δεν είναι γνωστή στους τελευταίους, ο τρόπος με τον οποίο ένας κόμβος αντιλαμβάνεται την ολοκλήρωση της φάσης βελτιστοποίησης δεν μπορεί να είναι βασισμένος στη διαφορά μεταξύ της υλοποιημένης μέσω του προτεινόμενου σχήματος, που υπολογίζεται μέσω της (5.19), και της βέλτιστης θεωρητικής κατανομής κόμβων που υπολογίζεται μέσω των (5.12 - 5.13). Επίσης, ακόμα και αν μια τέτοια πληροφορία ήταν διαθέσιμη στους κόμβους, η κατανομή πιθανοτήτων, που δίδεται από την (5.19) και καθορίζει την επιλογή υπηρεσίας των κόμβων, μπορεί να μην προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τη θεωρητικά βέλτιστη λόγω του πεπερασμένου πλήθους κόμβων που περιλαμβάνονται σε κάθε (πληροφοριακή) γειτονιά. Επίσης, ο πεπερασμένος βαθμός των κόμβων του MS-WSN εμποδίζει τη σταθερή εφαρμογή της (5.19), καθώς ακόμα και μία μόνο αλλαγή κατάστασης ενός κόμβου επηρεάζει τη σχετική κατανομή πιθανότητας. Επιπλέον, όταν η κατανομή των κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες συγκλίνει στη θεωρητικά βέλτιστη, οι κόμβοι ενδέχεται να περιέλθουν σε μια κατάσταση συνεχών αλλαγών καταστάσεων εξυπηρέτησης, που είναι γνωστή ως *φαινόμενο ring pong*. Αυτό καθυστερεί περαιτέρω την εφαρμογή του σχήματος ομαδοποίησης, προκαλώντας ταυτόχρονα την άσκοπη διακίνηση πλεονάζουσας τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Για την καταπίεση του φαινομένου ring pong επιβάλλεται ένας περιορισμός σε σχέση με το μέγιστο αριθμό διαδοχικών εναλλαγών κατάστασης. Το προτεινόμενο σχήμα κάνει διάγνωση της ύπαρξης του φαινομένου ring pong εφόσον διαπιστωθεί μία σειρά αλλαγών κατάστασης του τύπου $s_j \rightarrow s_i \rightarrow s_j, \forall s_i, s_j \in \mathcal{S}, i \neq j$. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κόμβος «κλειδώνει» την κατάσταση εξυπηρέτησής του στην υπηρεσία s_j , αποφεύγοντας περαιτέρω αλλαγές

κατάστασης μέχρι να ανακοινωθεί αλλαγή στο πλήθος ή τα χαρακτηριστικά των υποστηριζόμενων υπηρεσιών. Η απλή αυτή τεχνική διάγνωσης και καταπίεσης του φαινομένου ping pong εγγυάται ελάχιστο πλήθος άσκοπων αλλαγών κατάστασης, χωρίς να απαιτεί εξεζητημένα σχήματα υπολογισμού.

Η αλγοριθμική αναπαράσταση της διαδικασίας WOT δίδεται στον Αλγόριθμο 3.

Αλγόριθμος 3: Η διαδικασία WOT του κόμβου n_i .

Input:

- \mathcal{S} : Οι ταυτότητες των υπηρεσιών που εξυπηρετούν οι γείτονες του κόμβου n_i
- $\gamma(\mathcal{S})$: Τα μέτρα γ που περιγράφουν το ενεργειακό προφίλ των υπηρεσιών
- $\hat{v}(\mathcal{S})$: Η αξία που αναμένεται ότι θα προσφέρει η ομαδοποίηση κόμβων στους κόμβους που εξυπηρετούν τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες
- $|NG(n_i)|$: Οι 1-hop γείτονες του κόμβου n_i

while *not* PingPongDetected() **do**

$RndTime \leftarrow GetRndSleepDuration(1, 2 \cdot |NG(n_i)|)$;

Sleep($RndTime$);

$SelectedSID \leftarrow GetRndSID(n_i, \gamma(\mathcal{S}), v(\mathcal{S}))$;

if $SelectedSID \neq CurrentSID$ **then**

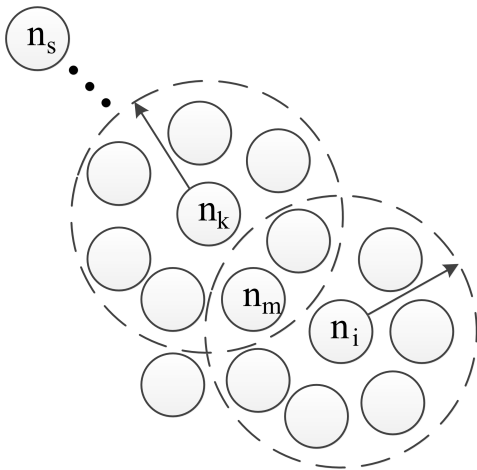
Broadcast($SelectedSID$);

end

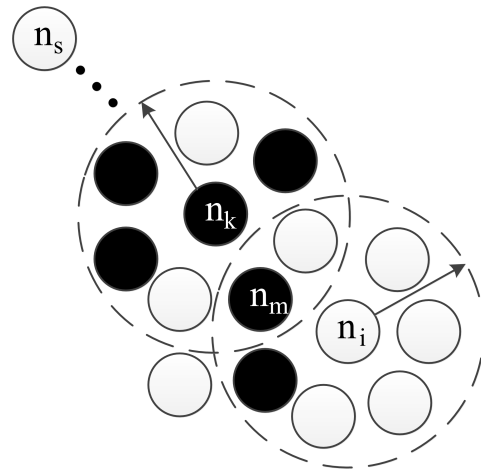
end

Ένα παράδειγμα του σχήματος βελτιστοποίησης συσχετισμένων στρατηγικών παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 5.2. Προς απλοποίηση της απεικόνισης: (i) θεωρείται μόνο ένα τμήμα ενός υποθετικού αραιού –αντί πυκνού ως όφειλε– WSN δύο υπηρεσιών (όπου οι κόμβοι ενημερώνονται για τις τιμές των γ_1 και γ_2) και (ii) η θεωρητικά βέλτιστη κατανομή των κόμβων στις δύο υπηρεσίες ορίζεται ως $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$. Καθώς οι κόμβοι μπορούν να γνωρίζουν μόνο το ενεργειακό προφίλ και τα σχήματα ομαδοποίησης που αφορούν τις δύο υπηρεσίες, η εξίσωση των αναμενόμενων οφελών τους σε κατάσταση συσχετισμένης ισορροπίας οδηγεί στη σχέση $\gamma_1 \cdot \hat{v}(s_1) = \gamma_2 \cdot \hat{v}(s_2)$. Έστω ότι, αρχικά, όλοι οι κόμβοι εξυπηρετούν την υπηρεσία s_1 (βλ. Σχήμα 5.2(α)). Τη χρονική στιγμή $t = t_0$, γνωστοποιείται από τον κόμβο συγκέντρωσης, n_s , στους κόμβους η έναρξη υποστήριξης της υπηρεσίας s_2 . Οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στον κόμβο συγκέντρωσης (i) γνωστοποιούν τα χαρακτηριστικά της νέας υποστηριζόμενης υπηρεσίας s_2 στους γείτονές τους και (ii) προγραμματίζουν την εκκίνηση των WOT διαδικασιών τους. Οι πρώτοι κόμβοι που ενημερώνονται σχετικά με την εξυπηρέτηση από το MS-WSN της υπηρεσίας s_2 είναι πιθανότερο να την επιλέξουν προς εξυπηρέτηση. Ας υποθεθεί ότι ο κόμβος n_i (βλ. Σχήμα 5.2(β)) καλείται να αποφασίσει αν πρέπει να συνεχίσει να εξυπηρετεί την υπηρεσία s_1 ή να επιλέξει την εξυπηρέτηση της s_2 . Καθώς μόνο δύο από τους επτά γείτονές του εξυπηρετούν ήδη την s_2 και οι δύο υπηρεσίες έχουν το ίδιο μέσο αναμενόμενο ενεργειακό προφίλ, η (5.19) (για το ενδεικτικό παράδειγμα η εκδοχή της (5.17) για δύο υπηρεσίες) οδηγεί πιθανοτικά τον κόμβο στην επιλογή της s_2

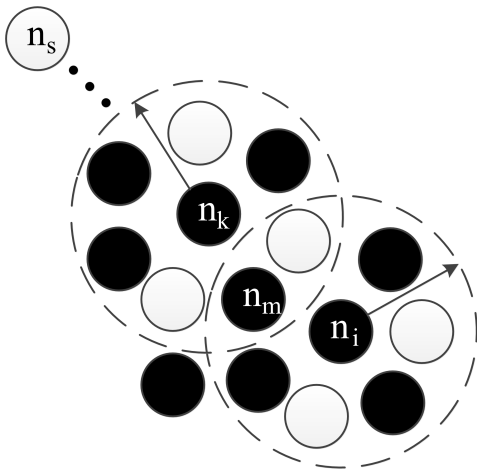
αντί της s_1 . Μετά την πραγματοποίηση πλήθους τέτοιων αλλαγών κατάστασης εξυπηρέτησης των κόμβων, η ανωτέρω διαδικασία θα οδηγήσει σε μια κατανομή των κόμβων όπου, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.2(γ), η υπηρεσία s_2 υπερ-εξυπηρετείται. Σε κάθε περίπτωση, καθώς οι κόμβοι εκτελούν διαδοχικές WOT διαδικασίες, η κατανομή των κόμβων επαναπροσδιορίζεται μέχρι να συγκλίνει τελικά στη θεωρητικά βέλτιστη κατανομή που φαίνεται στο Σχήμα 5.2(δ).



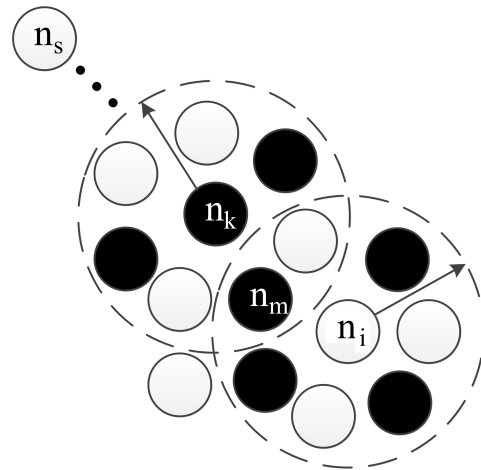
(α) Αρχική διάταξη του MS-WSN.



(β) Οι πρώτοι κόμβοι που ενημερώνονται για την υπηρεσία s_2 είναι πιθανότερο να επιλέξουν να την εξυπηρετήσουν.



(γ) Οι κόμβοι αρχικά υπο-εκτιμούν το επίπεδο εξυπηρέτησης της s_2 .



(δ) Οι κόμβοι επαναπροσδιορίζουν τις αποφάσεις τους, οδηγώντας τη λειτουργία του MS-WSN στην κατάσταση ισορροπίας.

Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση της φάσης βελτιστοποίησης της προτεινόμενης πολυτροπικής λειτουργίας για MS-WSN. Οι λευκοί κύκλοι αντιπροσωπεύουν κόμβους που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_1 ενώ οι μαύροι κύκλοι αντιπροσωπεύουν κόμβους που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_2 . Οι διακεκομμένοι κύκλοι καταδεικνύουν τις γειτονιές των κόμβων n_k και n_i .

5.3.1 Εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος σε συνδυασμό με το k -hop σχήμα ομαδοποίησης KOCA

Στο παρόν εδάφιο εξετάζεται η εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος συσχετισμένων στρατηγικών σε συνδυασμό με το σχήμα k -hop ομαδοποίησης KOCA που παρουσιάζεται στην παραπομπή [113], θεωρώντας μηδενικό βαθμό υπερκάλυψης. Καίτοι οι συγγραφείς της [113] δεν καθορίζουν ρητά κάποια συνάρτηση απονομής αξίας στους κόμβους λόγω της εφαρμογής του σχήματος ομαδοποίησης, οι συγγραφείς της [103] και της [156] (που είναι το σχήμα που προτείνεται στο Κεφ. 4), προτείνουν ότι στο πλαίσιο της ομαδοποίησης, ο τρόπος αναφοράς των μετρήσεων των κόμβων μπορεί να τροποποιηθεί αποσκοπώντας στη διαχείριση του αναγκαίου συμβιβασμού μεταξύ της ενεργειακής επίδοσης και της ακρίβειας των αναφερόμενων μετρήσεων. Συγκεκριμένα, όπως αναλύεται στο εδάφιο 4.3.1, η συχνότητα αναφοράς των μετρήσεων των κόμβων που απαρτίζουν μία ομάδα, έστω $C(s_j, m)$, ελαττώνεται κατά $|C(s_j, m)|$ φορές. Εφαρμόζοντας αυτήν την αρχή σε k -hop ομαδοποιημένα MS-WSN και λαμβάνοντας υπόψη την (5.4), η ομαδοποίηση μπορεί να αυξήσει τη διάρκεια ζωής ενός κόμβου $n_i \in C(s_j, m)$ κατά $|C(s_j, m)|$ φορές, δηλαδή

$$v(n_i, s_j, m) = |C(s_j, m)|, \forall n_i \in C(s_j, m), \forall s_j \in \mathcal{S}, C(s_j, m) \in \mathcal{C} \quad (5.20)$$

Καθώς, εξ ορισμού, τα σχήματα k -hop ομαδοποίησης σχηματίζουν ομάδες κατά μέσο όρο ίδιου μεγέθους με μέσο μέγεθος $E\{|C(s_j, m)|\} = d \cdot k_j^2$ κόμβους [113], όπου d ο μέσος βαθμός κόμβων και k_j το μέγεθος k (μέγιστη απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε κόμβου της ομάδος από τον κόμβο-εκκινήτη της ομάδας) της υπηρεσίας s_j , το αναμενόμενο όφελος ενός κόμβου n_i όταν αυτός εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j είναι

$$\hat{v}(n_i, s_j) = \hat{v}(s_j) = d \cdot k_j^2, \forall s_j \in \mathcal{S} \quad (5.21)$$

Η (5.21) καταδεικνύει ότι το όφελος που προκύπτει από την εφαρμογή της k -hop ομαδοποίησης εξαρτάται από (i) την πυκνότητα των κόμβων και (ii) την τιμή k που χαρακτηρίζει κάθε υπηρεσία. Αγνοώντας τις διαδικασίες που σχετίζονται με την επιλογή των κόμβων CH, η υπόψη μέθοδος ομαδοποίησης μπορεί να περιγραφεί ως $\langle \xi, (\succ_{i,j,m}), v, \phi \rangle$, όπου

- $\xi(n_i, s_j, m) = \begin{cases} 1, & \text{αν } dst(n_i, n_m) \leq k_j \\ 0, & \text{άλλως} \end{cases}$
όπου $dst(n_i, n_m)$ είναι η απόσταση (εκφρασμένη σε πλήθος βημάτων) τυχαίου κόμβου n_i και του κόμβου n_m που είναι ο κόμβος CH της ομάδας $C(s_j, m)$, όπου ανήκει ο n_i .
- $(\succ_{i,j,m})$: Δεν ορίζεται κάποια σειρά προτίμησης κατά την εφαρμογή της k -hop ομαδοποίησης καθώς οι κόμβοι είναι αδιάφοροι σε σχέση με τις ομάδες στις οποίες μπορούν να συμμετάσχουν.

- $\hat{v}(n_i, s_j) = d(n_i, s_j) \cdot k_j^2 \quad \forall n_i \in \mathcal{N}, s_j \in \mathcal{S}$.
όπου $d(n_i, s_j)$ είναι το πλήθος των γειτόνων του κόμβου n_i που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_j .
- $\phi(n_i, \mathbf{n}_{-i})$: Οι κόμβοι ενημερώνουν τους 1-hop γείτονές τους που βρίσκονται σε απόσταση το πολύ k_j βημάτων από τον κόμβο CH της ομάδας στην οποία ανήκουν. Αντίστοιχα προς τη φάση του σχήματος ομαδοποίησης κατά τη διάρκεια της οποίας αποστέλλονται αυτά τα μηνύματα, η ανταλλασσόμενη πληροφορία μπορεί να περιλαμβάνει τις ταυτότητες των κόμβων CH και των ομάδων όπου οι κόμβοι-αποστολείς ανήκουν, καθώς και την απόσταση (σε πλήθος βημάτων) μεταξύ των ιδίων και του αντίστοιχου κόμβου CH.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, το όφελος ενός κόμβου n_i που εξυπηρετεί την υπηρεσία s_j στο πλαίσιο της εφαρμογής του ΚΟCΑ προκύπτει

$$\hat{\pi}(n_i, s_j) = \gamma_j \cdot c(n_i, s_j) \cdot d(n_i, s_j) \cdot k_j^2 \quad (5.22)$$

Αντίστοιχα, η προτεινόμενη συσχετισμένη στρατηγική καθορίζεται από τη σχέση

$$p(n_i, s_j) = \frac{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^S \gamma_m \cdot c(n_i, s_m) \cdot d(n_i, s_m) \cdot k_m^2}{\sum_{k=1}^S \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^S \gamma_m \cdot c(n_i, s_m) \cdot d(n_i, s_m) \cdot k_m^2} \quad \forall n_i \in \mathcal{N}, s_j \in \mathcal{S}. \quad (5.23)$$

Η (5.23) επιβεβαιώνει ότι κάθε κόμβος πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζει: (i) πώς είναι καταναμημένοι οι γείτονές του στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες –όπως προσδιορίζεται από το μέγεθος $d(n_i, s_m) \cdot k_m^2$ – και (ii) το ενεργειακό προφίλ κάθε υπηρεσίας –όπως καθορίζεται από το μέγεθος γ_m . Εφαρμόζοντας τις (5.12) και (5.13), η θεωρητικά βέλτιστη κατανομή κόμβων στο πλαίσιο της k -hop ομαδοποίησης προκύπτει

$$\alpha_j = \frac{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^S k_m \cdot \sqrt{\gamma_m}}{\sum_{k=1}^S \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^S k_m \cdot \sqrt{\gamma_m}} \quad \forall s_j \in \mathcal{S} \quad (5.24)$$

		Υπηρεσία		
		s_1	s_2	s_3
Παράμετρος	γ_j	10000	40000	10000
	k_j	5	1	3

Πίνακας 5.3: Παράμετροι προσομοίωσης

		Υπηρεσία		
		s_1	s_2	s_3
Φάση λειτουργίας (χρονοσχισμές)				
Φάση 1	[0, 300)	100%	Δεν υποστηρίζεται	Δεν υποστηρίζεται
Φάση 2	[300, 600)	28.57%	71.43%	Δεν υποστηρίζεται
Φάση 3	[600,)	19.35%	48.39%	32.26%

Πίνακας 5.4: Θεωρητικά βέλτιστη κατανομή των κόμβων στις υπηρεσίες του MS-WSN.

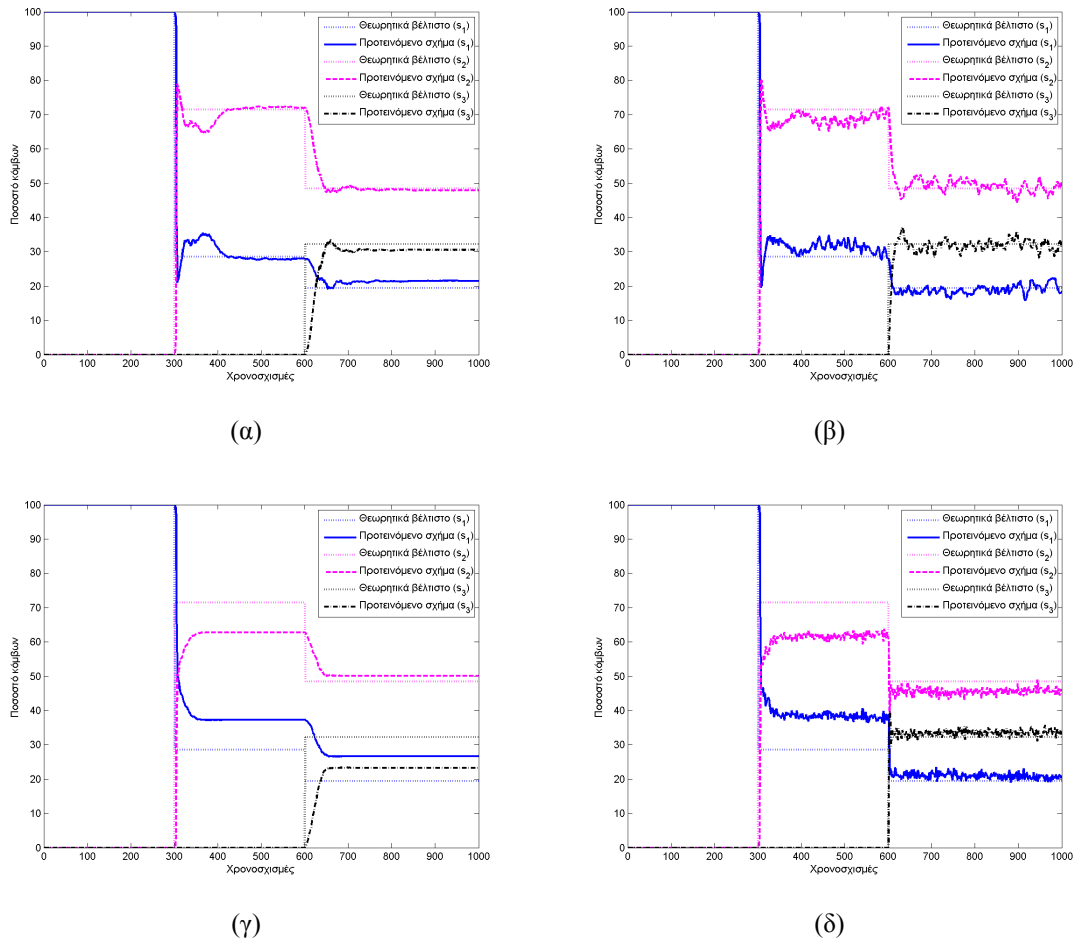
5.4 Αριθμητικά αποτελέσματα και συζήτηση

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναφορικά με την απόδοση του προτεινόμενου σχήματος συσχετισμένων στρατηγικών όταν αυτό εφαρμόζεται για τη μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας ενός MS-WSN έχουν προκύψει θεωρώντας ένα υποθετικό WSN αποτελούμενο από $|\mathcal{N}| = 1000$ κόμβους τηλεπικοινωνιακής εμβέλειας $T_x = 8m$, ομοιόμορφα κατανομημένους σε τετραγωνική περιοχή $L \times L$, με πλευρά $L = 100m$. Αυτή η διάταξη εγγυάται πιθανοτικά πλήρη συνεκτικότητα του WSN καθώς ο μέσος βαθμός κόμβων $\bar{d} = \rho \cdot \pi \cdot T_r^2 \approx 20$ υπερβαίνει το 6 [151]. Επίσης, αυτός ο μέσος βαθμός κόμβων αρκεί για το χαρακτηρισμό του WSN ως πυκνού.

Το υποθετικό MS-WSN των προσομοιώσεων υποστηρίζει τρεις υπηρεσίες, $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, s_3\}$, με αντίστοιχα μέτρα ενεργειακού προφίλ που δίδονται από το σύνολο $\mathcal{G} = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\}$ (βλ. Πίνακα 5.3). Το σχήμα ομαδοποίησης που υιοθετήθηκε για τη μεγιστοποίηση της διάρκειας λειτουργίας του MS-WSN είναι το k -hop σχήμα ομαδοποίησης που παρουσιάστηκε στο εδάφιο 5.3.1. Οι αντίστοιχες τιμές k που καθορίζουν το προφίλ ομαδοποίησης των υποστηριζόμενων υπηρεσιών δίδονται από το σύνολο $\mathcal{K} = \{k_1, k_2, k_3\}$ (βλ. Πίνακα 5.3).

Αναφορικά με τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες, η λειτουργία του WSN διακρίνεται σε τρεις φάσεις. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, η οποία διαρκεί μέχρι τη χρονοσχισμή 299, η υπηρεσία s_1 είναι η μόνη που υποστηρίζεται. Στις χρονοσχισμές $t_2 = 300$ και

$t_3 = 600$, οι οποίες σηματοδοτούν την έναρξη των άλλων δύο φάσεων, ανακοινώνεται στους κόμβους του MS-WSN η υποστήριξη των υπηρεσιών s_2 και s_3 , αντίστοιχα. Για κάθε φάση, η θεωρητικά βέλτιστη κατανομή κόμβων στις τρεις υποστηριζόμενες υπηρεσίες προσδιορίζεται με εφαρμογή της (5.24). Ο Πίνακας 5.4 συνοψίζει τις διαδοχικές βέλτιστες κατανομές για κάθε φάση λειτουργίας του MS-WSN.



Σχήμα 5.3: Ποσοστό των κόμβων που κατανέμονται στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες.
 (α) Πλήρης εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος (επαρκής χρόνος αναμονής και καταστολή του φαινομένου ping pong).
 (β) Επαρκής χρόνος αναμονής χωρίς καταστολή του φαινομένου ping pong.
 (γ) Ανεπαρκής χρόνος αναμονής και καταστολή του φαινομένου ping pong.
 (δ) Ανεπαρκής χρόνος αναμονής χωρίς καταστολή του φαινομένου ping pong.

Αρχικά, εξετάζεται η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος με κριτήριο τη σύγκλιση του προς τη θεωρητικά βέλτιστη κατάσταση. Η κατανομή των κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3. Ειδικότερα, το Σχήμα 5.3(α) παρουσιάζει πώς η κατανομή των κόμβων του MS-WSN προσαρμόζεται κάθε φορά που ανακοινώνεται η ενεργοποίηση μιας νέας υπηρεσίας στους κόμβους. Το προτεινόμενο σχήμα κατανομής συγκλίνει ταχέως στη θεωρητικά βέλτιστη κατανομή, εμφανίζοντας μια μικρή μέγιστη απόκλιση

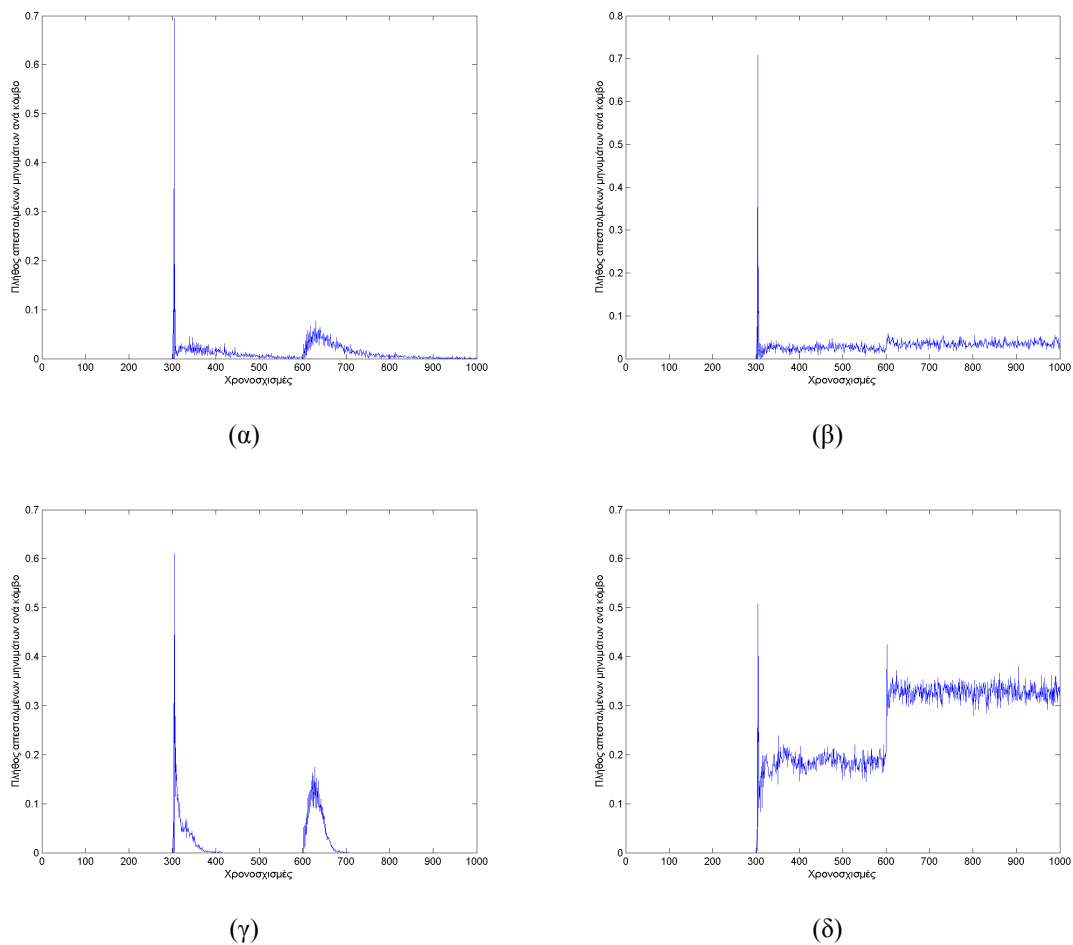
της τάξης του 2%, η οποία μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά αμελητέα. Αξίζει να επισημανθεί ότι η ισορροπία και, άρα, η κατάσταση σταθερής λειτουργίας σε κάθε φάση επιτυγχάνονται τάχιστα, ειδικά στην περίπτωση όπου το WSN υποστηρίζει τρεις υπηρεσίες. Σε αυτήν την περίπτωση, η σταθερή λειτουργία του MS-WSN επιτυγχάνεται σε λιγότερες από 150 χρονο-σχισμές.

Η συμπεριφορά του MS-WSN όταν δεν καταπιέζεται το φαινόμενο ring pong απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3(β). Καίτοι οι διαδοχικές αλλαγές κατάστασης των κόμβων (που εκφράζονται μερικώς μέσω του φαινομένου ring pong) είναι αυτές που επιτρέπουν τη σύγκλιση στη βέλτιστη κατανομή των κόμβων, εντούτοις, δεν επιτρέπουν τη σταθεροποίηση της λειτουργίας του συστήματος καθώς ένα πλήθος κόμβων εναλλάσσουν συνεχώς την κατάσταση εξυπηρέτησής τους, προκαλώντας αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση. Αν και καθιστά τη λειτουργία του MS-WSN ασταθή, το φαινόμενο ring pong επιτρέπει εμμέσως στο σύστημα να προσαρμόζεται στις αλλαγές του δικτυακού του περιβάλλοντος. Επίσης, η μέση κατανομή κόμβων στις υπηρεσίες του MS-WSN κατά τη διάρκεια των 500 τελευταίων χρονοσχισμών της προσομοίωσης προσεγγίζει τη θεωρητική βέλτιστη. Ενδεικτικά, η υπηρεσία s_1 εξυπηρετείται κατά μέσο όρο από το 19.53% των κόμβων –με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση να είναι 1.33%– ενώ το αντίστοιχο θεωρητικό βέλτιστο ποσοστό κόμβων είναι 19.35% (βλ. Πίνακα 5.4). Όταν δεν καταπιέζεται το φαινόμενο ring pong, η άμεση σύγκλιση προς τη θεωρητική βέλτιστη κατάσταση επιτυγχάνεται προκαλώντας αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση και έλλειψη συστημικής σταθερότητας.

Η υπο-εκτίμηση του χρόνου αναμονής που απαιτείται από τους κόμβους για την επανεκτέλεση μιας διαδικασίας WOT οδηγεί σε διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας οι οποίες μπορεί να απέχουν σημαντικά από τις αντίστοιχες θεωρητικά βέλτιστες. Το Σχήμα 5.3(γ) απεικονίζει τη λειτουργία του MS-WSN στην περίπτωση όπου ο χρόνος αναμονής των κόμβων είναι τυχαία μεταβλητή ορισμένη επί του διαστήματος $(1, 0.1 \cdot |NG(n_i)|)$ –αντί για το $(1, 2 \cdot |NG(n_i)|)$ όπως ορίζεται από το προτεινόμενο σχήμα υλοποίησης. Προσεκτική εξέταση του Σχήματος 5.3(γ) αναδεικνύει δύο σημεία ενδιαφέροντος: (i) η λειτουργία του MS-WSN σταθεροποιείται ταχέως και (ii) δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση στη θεωρητική βέλτιστη κατάσταση. Πράγματι, η λειτουργία του MS-WSN φθάνει σε κατάσταση ισορροπίας πολύ σύντομα μετά την έναρξη εξυπηρέτησης των υπηρεσιών. Εντούτοις, ενώ αυτός ο ταχύς (αλλά όχι αποτελεσματικός) προγραμματισμός WOT διαδικασιών καταπιέζει το φαινόμενο ring pong ταχύτερα, αποτυγχάνει να οδηγήσει τη λειτουργία του MS-WSN στη θεωρητικά βέλτιστη κατάσταση. Συνδυάζοντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα Σχήματα 5.3(β) και 5.3(γ), προκύπτει ότι, για τη σύγκλιση στη βέλτιστη κατανομή των κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες, ο προγραμματισμός των WOT διαδικασιών πρέπει να επιτρέπει στο φαινόμενο ring pong να οδηγήσει τη λειτουργία του MS-WSN στην προσέγγιση της θεωρητικά βέλτιστης κατάστασης και μετά να το καταπιέζει.

Το Σχήμα 5.3(δ) απεικονίζει την κατανομή των κόμβων στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες

όταν ούτε ο χρόνος αναμονής των κόμβων είναι επαρκής ούτε πραγματοποιείται καταστολή του φαινομένου ring pong. Όπως είναι αναμενόμενο, η λειτουργία του MS-WSN μπορεί να αποκλίσει σημαντικά από τη θεωρητικά βέλτιστη. Αντιθέτως, επιτυγχάνεται μια πιθανοτική ισορροπία η οποία διαφέρει από τη θεωρητικά βέλτιστη καθώς ο ανεπαρκής χρόνος αναμονής των κόμβων ελαττώνει την πληροφόρησή τους σχετικά με τη συμπεριφορά των γειτόνων τους και αποσυγχρονίζει τη λειτουργία του δικτύου οδηγώντας το MS-WSN σε όχι βέλτιστη λειτουργία. Ενδεικτικά, το μέσο ποσοστό των κόμβων που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_1 κατά το χρονικό διάστημα (400, 599) είναι 38.31%, που διαφέρει σημαντικά από το θεωρητικό βέλτιστο ποσοστό (28.57%).



Σχήμα 5.4: Πλήθος πρόσθετων μηνυμάτων που αποστέλλονται ανά κόμβο.

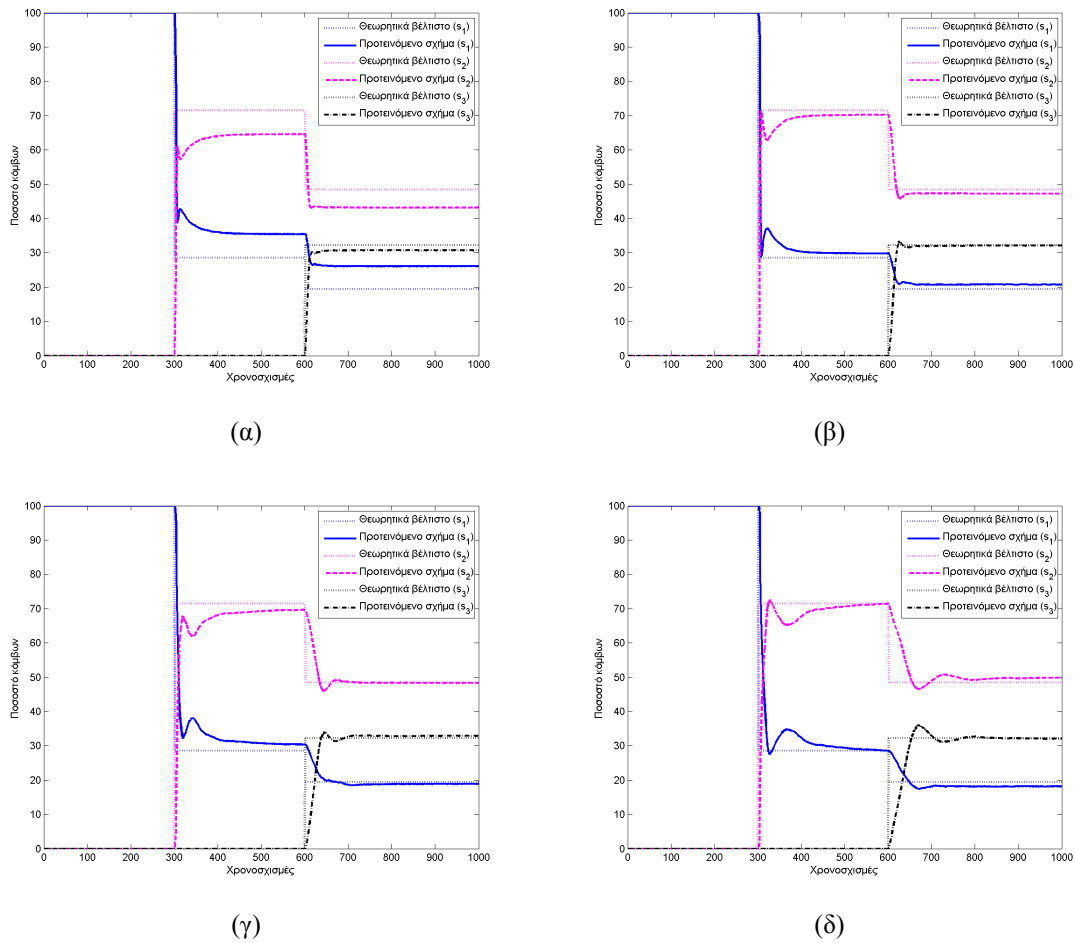
- (α) Πλήρης εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος (επαρκής χρόνος αναμονής και καταστολή του φαινομένου ring pong).
- (β) Επαρκής χρόνος αναμονής χωρίς καταστολή του φαινομένου ring pong.
- (γ) Ανεπαρκής χρόνος αναμονής και καταστολή του φαινομένου ring pong.
- (δ) Ανεπαρκής χρόνος αναμονής χωρίς καταστολή του φαινομένου ring pong.

Η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος με κριτήριο το συνολικό πλεονάζοντα τηλεπικοινωνιακό φόρτο (overhead) που παράγεται από τους κόμβους εξετάζεται στο Σχήμα 5.4. Η

σύγκριση των Σχημάτων 5.4(α) και 5.4(γ) με τα Σχήματα 5.4(β) και 5.4(δ) καταδεικνύει πώς η κατάλληλη διαχείριση του φαινομένου ring pong ελαττώνει το πλήθος των εκπεμπόμενων μηνυμάτων που απαιτούνται από τους κόμβους για τον προσδιορισμό της κατάλληλης κατάστασης εξυπηρέτησής τους. Αντίστοιχα, η σύγκριση των Σχημάτων 5.4(α) και 5.4(β) με τα Σχήματα 5.4(γ) και 5.4(δ) καταδεικνύει ότι η υιοθέτηση ικανού διαστήματος αναμονής ελαττώνει, επίσης, σημαντικά την αναγκαία τηλεπικοινωνιακή επιβάρυνση.

Στο Σχήμα 5.4(α), παρουσιάζεται το πλήθος των πρόσθετων μηνυμάτων που εκπέμπονται ανά κόμβο μετά από την πλήρη εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος, όπως αυτό περιγράφεται μέσω του Σχήματος 5.1 και του Αλγορίθμου 3. Το μέσο πλήθος μηνυμάτων που ανταλλάσσονται ανά κόμβο για την προσαρμογή των κόμβων μετά την ανακοίνωση των νέων υπηρεσιών είναι ίσο προς 8.86. Τα σχετικά αποτελέσματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 5.4(β) όταν δεν καταπιέζεται το φαινόμενο ring pong, καταδεικνύουν ότι το αντίστοιχο πλήθος πρόσθετων μηνυμάτων που απαιτούνται από τους κόμβους του MS-WSN αυξάνει συνεχώς εξαιτίας της ανεξέλεγκτης εναλλαγής καταστάσεων εξυπηρέτησης των κόμβων, φθάνοντας κατά μέσο όρο τα 40.95 μηνύματα ανά κόμβο για τις πρώτες 1500 χρονοσχισμές. Όπως αναμενόταν, η αποτελεσματική διαχείριση του φαινομένου ring pong μειώνει δραστικά το πλήθος των εκπεμπόμενων μηνυμάτων, βελτιώνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα του MS-WSN. Τα σχετικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων όταν η περίοδος αναμονής των κόμβων είναι μικρή σχεδιάζονται στο Σχήμα 5.4(γ). Καθώς οι κόμβοι ανιχνεύουν την ύπαρξη του φαινομένου ring pong ταχύτερα σε σύγκριση με το Σχήμα 5.4(α), η περίοδος ανταλλαγής μηνυμάτων είναι μικρότερη. Εντούτοις, η συχνότητα ανταλλαγής μηνυμάτων είναι μεγαλύτερη, οδηγώντας σε οριακή αύξηση του πλήθους των εκπεμπόμενων μηνυμάτων ανά κόμβο (9.52) σε σχέση με την περίπτωση πλήρους εφαρμογής του προτεινόμενου σχήματος. Τέλος, όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.4(δ), όταν ούτε το φαινόμενο ring pong καταπιέζεται ούτε ο χρόνος αναμονής των κόμβων είναι επαρκής, ο αριθμός των ανταλλασσόμενων αυξάνει συνεχώς, φθάνοντας ένα μέσο όρο 351.2 μηνυμάτων ανά κόμβο για τις 1500 πρώτες χρονοσχισμές προσομοίωσης.

Η εξάρτηση της ποιότητας σύγκλισης του προτεινόμενου σχήματος στη θεωρητικά βέλτιστη κατανομή κόμβων από το μέσο βαθμό και, άρα, την πυκνότητα κόμβων εξετάζεται στο Σχήμα 5.5, όπου παρουσιάζεται η μέση συμπεριφορά του σχήματος μετά από 50 προσομοιώσεις. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.5(α), όταν το WSN δεν είναι πυκνό, η ικανότητα προσαρμογής του είναι περιορισμένη καθώς ο ατελής προσδιορισμός του πλήθους των γειτόνων του κόμβου n_i μέσω του μεγέθους $d(n_i, s_m)$ μειώνει την ικανότητα των κόμβων εκτιμήσουν τα οφέλη που αναμένονται από την επακόλουθη εφαρμογή του σχήματος ομαδοποίησης. Έτσι, οι κόμβοι δεν είναι σε θέση να υπολογίσουν βέλτιστα τη συσχετισμένη τους στρατηγική. Καθώς ο βαθμός των κόμβων αυξάνει, αυξάνει και η πληροφόρησή τους σχετικά με την κατανομή των γειτόνων τους στις υποστηριζόμενες εφαρμογές. Τα Σχήματα 5.5(β)-5.5(δ) καταδεικνύουν ότι, καθώς η πυκνότητα των κόμβων αυξάνει, η κατανομή των κόμβων

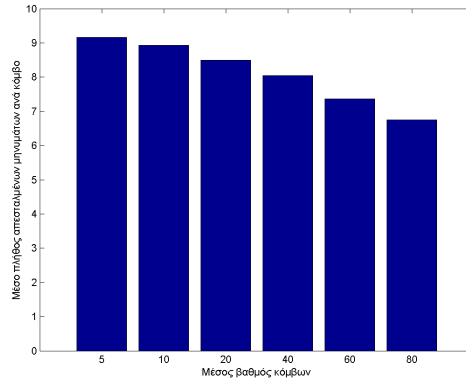


Σχήμα 5.5: Επίδοση του προτεινόμενου σχήματος συναρτήσει του μέσου βαθμού των κόμβων του MS-WSN.

- (α) $\bar{d} = 5$.
- (β) $\bar{d} = 10$.
- (γ) $\bar{d} = 20$.
- (δ) $\bar{d} = 40$.

στις διάφορες υποστηριζόμενες υπηρεσίες συγκλίνει στη θεωρητικά βέλτιστη. Όμως, αυξάνει συγχρόνως και ο απαιτούμενος χρόνος για αυτήν τη σύγκλιση καθώς, σύμφωνα με τον Αλγόριθμο 3, οι κόμβοι προγραμματίζουν μία νέα διαδικασία WOT μετά την παρέλευση ενός τυχαίου χρονικού διαστήματος ανάλογου με το βαθμό τους, παρατείνοντας, έτσι, τη διαδικασία σύγκλισης του συστήματος.

Ο τρόπος με τον οποίο η πυκνότητα των κόμβων επηρεάζει την πρόσθετη τηλεπικοινωνιακή κίνηση (overhead) που απαιτεί η εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος συσχετισμένων στρατηγικών εξετάζεται στο Σχήμα 5.6. Όπως γίνεται αντιληπτό, το μέσο πλήθος μηνυμάτων που απαιτούνται για την επίτευξη της κατάστασης σταθερής λειτουργίας (συσχετισμένης ισορροπίας) μειώνεται με την αύξηση του μέσου βαθμού των κόμβων. Εντούτοις, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που απεικονίζονται στο Σχήμα



Σχήμα 5.6: Επίδοση του προτεινομένου σχήματος ως προς το συνολικό πλήθος μηνυμάτων που απαιτούνται ανά κόμβο.

5.5, καθώς η ποιότητα σύγκλισης δεν επηρεάζεται σημαντικά από το \bar{d} όταν $\bar{d} > 10$, η μείωση του πλήθους των επιπρόσθετων απαιτούμενων μηνυμάτων δεν είναι ικανός λόγος για να επιβάλει την ανάπτυξη εξαιρετικά πυκνών MS-WSN.

5.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό προτάθηκε ένα σχήμα βελτιστοποίησης λειτουργίας ομαδοποιημένων WSN πολλαπλών υπηρεσιών βασισμένο στη θεωρία συσχετισμένων στρατηγικών. Για την εξασφάλιση της καθολικής εξυπηρέτησης των υπηρεσιών σε όλο το εύρος του MS-WSN και της μεγιστοποίησης της συνολικής διάρκειας λειτουργίας του MS-WSN, προσδιορίστηκε η θεωρητικά αναμενόμενη βέλτιστη κατανομή κόμβων στις υπηρεσίες που υποστηρίζονται από τους κόμβους του MS-WSN. Το προτεινόμενο, αποτελεσματικό ενεργειακά και υπολογιστικά, σχήμα συσχετισμένων στρατηγικών που καθορίζει την επιλογή των υπηρεσιών από τους κόμβους λειτουργεί κατά κατανομημένο τρόπο, βασιζόμενο στην αξιοποίηση πληροφοριών που είναι διαθέσιμες τοπικά στους κόμβους. Η ταχεία σύγκλιση του προτεινόμενου σχήματος στη θεωρητική βέλτιστη κατανομή και η αποτελεσματικότητά του σε σχέση με τον πρόσθετο τηλεπικοινωνιακό φόρτο που επιφέρει η εφαρμογή του επιβεβαιώθηκαν μέσω πλήθους προσομοιώσεων.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Οι εγγενείς περιορισμοί που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία των WSN σε συνδυασμό με την ανάγκη επιμήκυνσης της διάρκειας λειτουργίας τους κατευθύνουν τη σχεδίαση της λειτουργίας τους ως πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό συγκεκριμένους συμβιβασμούς. Η πλατφόρμα θεωρητικής ανάλυσης των αλληλεπιδράσεων λογικών παικτών με αντιτιθέμενα συμφέροντα την οποία προσφέρει η θεωρία παιγνίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τη διαχείριση των αντιθετικών στόχων βελτιστοποίησης της λειτουργίας των WSN.

Η λόγω της φύσης του προβλήματος ανάγκη κατανεμημένης λειτουργίας των WSN σε συνδυασμό με την απαίτηση ελαχιστοποίησης των ανταλλασσομένων μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων συχνά οδηγούν στη διαμόρφωση ενός γνωστικού περιβάλλοντος περιορισμένης ευρύτητας: οι κόμβοι αδυνατούν να διαχειρισθούν μεγάλο όγκο ανταλλασσομένης πληροφορίας ενώ μπορούν να έχουν στη διάθεσή τους δεδομένα αποκλειστικά τοπικού χαρακτήρα. Επίσης, οι αντιλήψεις των κόμβων αναφορικά με τη βέλτιστη στρατηγική τους στο πλαίσιο της λειτουργίας τους σε ένα WSN είναι συχνά αντικρουόμενες, τόσο μεταξύ τους όσο και με τις ανάγκες του WSN συνολικά. Η έλλειψη πλήρους γνώσης της κατάστασης του WSN επιτείνει την αδυναμία των κόμβων να αντιληφθούν με τρόπο ντετερμινιστικό τη βέλτιστη στρατηγική τους, αποτελώντας τροχοπέδη στην προσπάθεια βελτιστοποίησης της λειτουργίας του WSN. Στην περίπτωση των WSN, η έλλειψης γνώσης των παικτών οδηγεί στην παραγωγή πρόσθετης τηλεπικοινωνιακής κίνησης από τους κόμβους του WSN, ανάγκη η οποία αντιτίθεται στο βασικότερο στόχο βελτιστοποίησης της λειτουργίας των WSN, που συνοψίζεται στην ελαχιστοποίηση της διάδρασης των κόμβων.

Στην παρούσα διατριβή προτείνονται μέθοδοι ελαχιστοποίησης του *τιμήματος της αναρχίας* (price of anarchy) σε WSN [157], δηλαδή της χειροτέρευσης της απόδοσης ενός WSN λόγω της μη συνεργατικής συμπεριφοράς των κόμβων που το αποτελούν. Η επιβολή συνεργατικής συμπεριφοράς στους κόμβους ενός WSN μέσω ενός σχήματος ομαδοποίησης αποτελεί το πρώτο βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση. Η θεωρία παιγνίων σχηματισμού συνασπισμών εξετάζει τα αποτελέσματα της διάδρασης συνεργατικών παικτών και, ως εκ τούτου, παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία για τη θεωρητική μελέτη του προσδιορισμού της βέλτιστης

δομής ομαδοποίησης των κόμβων. Το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο η σχετική θεωρία μπορεί επιτυχώς να εφαρμοσθεί στην πράξη για τη θεμελίωση μιας μεθόδου σχηματισμού συνασπισμών, η οποία βελτιστοποιεί τη λειτουργία του WSN, προσφέροντας αυξημένη διάρκεια λειτουργίας υπό το κόστος ελεγχόμενης υποβάθμισης της ακρίβειας των μέσων μετρήσεων του WSN. Εντούτοις, η αδυναμία των κόμβων να λάβουν πλήρη γνώση της κατάστασης του WSN επιβάλλει την εισαγωγή ενός συνόλου ισχυρότερων κόμβων, οι οποίοι συντονίζουν και βελτιστοποιούν τις προσπάθειες συνεργασίας των κόμβων.

Η διαχείριση της αβεβαιότητας των κόμβων είναι αναγκαία και στην περίπτωση των πολυτροπικών WSN όπου οι κόμβοι καλούνται να αποφανθούν για τη συνολικά βέλτιστη κατανομή τους στις υποστηριζόμενες από το WSN υπηρεσίες, διαθέτοντας, ωστόσο, πληροφορίες περιορισμένης εμβέλειας και, άρα, χρησιμότητας. Η έννοια της συσχετισμένης ισορροπίας συμβάλλει στη διαχείριση της αβεβαιότητας των κόμβων, χωρίς να απαιτείται ο υπολογιστικός φόρτος που συνοδεύει τα παίγνια Bayes, ή η επιβολή πολλαπλών περιορισμών που χαρακτηρίζει τα κλασικά παίγνια. Μάλιστα, όντας απλούστερη από την ισορροπία Bayes και διαισθητικά ευρύτερης εφαρμογής από την ισορροπία Nash, η συσχετισμένη ισορροπία μπορεί να εφαρμοσθεί σε πλήθος περιπτώσεων όπου ο κατανεμημένος υπολογισμός μιας βέλτιστης λύσης συνδυάζεται με αβεβαιότητα κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει μια εφαρμογή της έννοιας της συσχετισμένης ισορροπίας σε WSN πολλών υπηρεσιών που βελτιστοποιούνται με τη βοήθεια τεχνικών ομαδοποίησης κόμβων. Μάλιστα, η εφαρμογή της επιφέρει ελάχιστη τηλεπικοινωνιακή επιβάρυνση στους κόμβους του WSN, όντας κατάλληλη για εφαρμογή σε πυκνά WSN ευρείας κλίμακας. Επίσης, λόγω της απλότητας της δομής της, επιτρέπει την εύκολη υιοθέτηση προσαρμοστικών τεχνικών ώστε η λειτουργία των πολυτροπικών WSN να είναι δυναμική και να προσαρμόζεται στις αλλαγές του περιβάλλοντος ή των υπηρεσιών που υποστηρίζουν.

Αναφορικά με μελλοντικά πεδία σχετικής έρευνας, ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύντηξη των δύο θεωριών και η ανάπτυξη ενός πλαισίου γνωστικής ομαδοποίησης κόμβων, όπου η ύπαρξη ισχυρών υπολογιστικά κόμβων δεν είναι απαραίτητη για την επίτευξη βελτιστοποιημένης δομής ομαδοποίησης. Πλέον, η μελέτη και διαχείριση της χρονικής συσχέτισης και η επίδρασή της στην επίδοση των (στατικά βελτιστοποιημένων) τεχνικών ομαδοποίησης αποτελεί μελλοντικό πεδίο έρευνας.

Η εφαρμογή των ανωτέρω μεθόδων ή/και της σχετικής θεωρίας σε άλλου τύπου δίκτυα αποτελεί, επίσης, μελλοντικό αντικείμενο έρευνας. Ενδεικτικά, αναμένεται ότι η εφαρμογή τους στην ανάπτυξη σχημάτων βελτιστοποίησης σε ευφυή δίκτυα ενέργειας (smart grid) μπορεί να προσφέρει σημαντική βελτίωση των επιδόσεων των τελευταίων. Επίσης, η εφαρμογή τους σε γνωστικά δίκτυα (cognitive networks) μπορεί να οδηγήσει σε αποδοτικότερα σχήματα συνεργασίας δευτερευόντων χρηστών, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη κατανομή πόρων (φάσματος) στο πλαίσιο ενός διευρυμένου, ευφυούς, αυτόνομου τηλεπικοινωνιακού περιβάλλοντος συνεργασίας.

Παράρτημα Α

Το TU παίγνιο δημιουργίας συνασπισμών κατά τη διάρκεια των φάσεων βελτιστοποίησης και σταθερής λειτουργίας

Έστω ότι ο αντιπρόσωπος r_j ανιχνεύει ότι οι συνασπισμοί $\mathcal{S}(k, r_j)$ και $\mathcal{S}(m, r_j)$, $\mathcal{S}(k, r_j) \cap \mathcal{S}(m, r_j) = \emptyset$ μπορούν να συγχωνευθούν για να δημιουργήσουν ένα υπερσυνασπισμό $\mathcal{S}(w, r_j) = \mathcal{S}(k, r_j) \cup \mathcal{S}(m, r_j)$. Τότε, η αξία του $\mathcal{S}(w, r_j)$ μπορεί να γραφεί υπό τη μορφή

$$\begin{aligned} V(w, r_j) &= \sum_{n_i \in \mathcal{S}(w, r_j)} |\mathcal{S}(w, r_j)| - 1 = \sum_{n_i \in \mathcal{S}(k, r_j)} |\mathcal{S}(w, r_j)| - 1 + \sum_{n_i \in \mathcal{S}(m, r_j)} |\mathcal{S}(w, r_j)| - 1 \\ &= \sum_{n_i \in \mathcal{S}(k, r_j)} |\mathcal{S}(k, r_j)| + |\mathcal{S}(m, r_j)| - 1 + \sum_{n_i \in \mathcal{S}(m, r_j)} |\mathcal{S}(k, r_j)| + |\mathcal{S}(m, r_j)| - 1 \\ &= V(k, r_j) + V(m, r_j) + \sum_{n_i \in \mathcal{S}(k, r_j)} |\mathcal{S}(m, r_j)| + \sum_{n_i \in \mathcal{S}(m, r_j)} |\mathcal{S}(k, r_j)| \quad (\text{A.1}) \end{aligned}$$

Η (A.1) συνεπάγεται ότι το δίκτυο έχει πάντα όφελος από μια έγκυρη συγχώνευση συνασπισμών και, κυρίως, ότι το κέρδος του ΑΔΑ από μία τέτοια συγχώνευση είναι

$$\Delta V = V(w, r_j) - V(k, r_j) - V(m, r_j) = \sum_{n_i \in \mathcal{S}(k, r_j)} |\mathcal{S}(m, r_j)| + \sum_{n_i \in \mathcal{S}(m, r_j)} |\mathcal{S}(k, r_j)| \quad (\text{A.2})$$

Η (A.2) καταδεικνύει ότι η πρόσθετη αξία που προκύπτει από μια συγχώνευση συνασπισμών παράγεται από κοινού από τους δύο υπό συγχώνευση συνασπισμούς, ανεξαρτήτως του μεγέθους τους: τα μέλη του $\mathcal{S}(k, r_j)$ θα λάβουν μία πολλαπλασιαστική αξία $|\mathcal{S}(m, r_j)|$

ενώ η αξία κάθε κόμβου $n_i \in \mathcal{S}(m, r_j)$ θα αυξηθεί κατά $|\mathcal{S}(k, r_j)|$ φορές. Στη γενική περίπτωση, υποθέτοντας ότι το σύνολο των αμοιβαίως αποκλειομένων συνασπισμών $\mathcal{S}_w = \{\mathcal{S}(k_1, r_j), \dots, \mathcal{S}(k_n, r_j)\}$ μπορεί να συγχωνευθεί για να δημιουργήσει ένα υπερσυνασπισμό $\mathcal{S}(w, r_j)$, η συνολική προστιθέμενη αξία του WSN δίδεται από την

$$\begin{aligned} \Delta V &= V(w, r_j) - \sum_{\mathcal{S}(k_i, r_j) \in \mathcal{S}_w} V(k_i, r_j) \\ &= \sum_{\mathcal{S}(k_i, r_j) \in \mathcal{S}_w} \left\{ \sum_{\mathcal{S}(k_l, r_j) \in \mathcal{S}_w \setminus \mathcal{S}(k_i, r_j)} |\mathcal{S}(k_l, r_j)| \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Εξάλλου, τα τροποποιημένα αξιώματα του Shapley σχετικά με τα TU παίγνια σχηματισμού συνασπισμών [130] ισχύουν και για το προτεινόμενο παίγνιο. Η εγκυρότητα του ισχυρισμού αυτού αποδεικνύεται ακολούθως.

Λήμμα A.1 (Σχετική Αποδοτικότητα). *Το προτεινόμενο παίγνιο σχηματισμού συνασπισμών ικανοποιεί το αξίωμα της σχετικής αποδοτικότητας.*

Απόδειξη. Μία κατανομή αξιών ϕ ικανοποιεί το αξίωμα σχετικής αποδοτικότητας αν $\sum_{i \in \mathcal{S}} \phi_i = V(\mathcal{S})$. Σύμφωνα με την προτεινόμενη κατανομή αξίας:

$$\begin{aligned} \sum_{n_i \in \mathcal{S}(k, r_j)} v(n_i, k, r_j) &= \sum_{n_i \in \mathcal{S}(k, r_j)} |\mathcal{S}(k, r_j)| - 1 \\ &= |\mathcal{S}(k, r_j)| \cdot (|\mathcal{S}(k, r_j)| - 1) \\ &= V(k, r_j), \quad \forall \mathcal{S}(k, r_j) \in \mathcal{S}, \forall r_j \in \mathcal{R} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

που αποδεικνύει την ισχύ του αξιώματος. □

Λήμμα A.2 (Αξίωμα Συμμετρίας). *Το προτεινόμενο παίγνιο σχηματισμού συνασπισμών ικανοποιεί το αξίωμα συμμετρίας υπό την περιοριστική ιδιότητα (restriction property) (βλ. [130] για λεπτομέρειες).*

Απόδειξη. Σύμφωνα με το αξίωμα συμμετρίας, αν υπάρχουν $i, j \in \mathcal{N}$ τέτοια ώστε $\phi(\mathcal{S} \cup \{i\}) = \phi(\mathcal{S} \cup \{j\})$, $\forall \mathcal{S} \in \mathcal{S} \setminus \{\{i\}, \{j\}\}$, τότε $\phi(i) = \phi(j)$. Έστω ότι ο αντιπρόσωπος r_j εξετάζει την πιθανή αποδοχή των συνασπισμών $\mathcal{S}(m, r_j)$ και $\mathcal{S}(l, r_j)$ στο συνασπισμό $\mathcal{S}(k, r_j)$ και ότι $V(\mathcal{S}_k \cup \mathcal{S}_m, r_j) = V(\mathcal{S}_k \cup \mathcal{S}_l, r_j)$. Συνεπώς, ισχύει ότι $|\mathcal{S}(m, r_j)| = |\mathcal{S}(l, r_j)|$ καθώς η $V(k, r_j)$ είναι μονότονη. Τότε, υπό την περιοριστική ιδιότητα, τα μέλη των συνασπισμών $\mathcal{S}(m, r_j)$ και $\mathcal{S}(l, r_j)$ θα λάβουν την ίδια αξία μετά από την αποδοχή τους σε οποιοδήποτε συνασπισμό καθώς η επιπλέον αξία που δημιουργούν είναι πάντα η ίδια όπως φαίνεται από την (A.3). □

Λήμμα A.3 (Αξίωμα Προσθετικότητα). Στην παραπομπή [158] αποδεικνύεται ότι το αξίωμα της προσθετικότητας ισχύει για κάθε παίγνιο υπό την ισότιμη κατανομή αξίας. Συνεπώς, το προτεινόμενο παίγνιο σχηματισμού συνασπισμών ικανοποιεί το αξίωμα της προσθετικότητας, καθώς, υπό την περιοριστική ιδιότητα, βασίζεται στην ισοδύναμη κατανομή της αξίας στους κόμβους-μέλη των συνασπισμών.

Συμπερασματικά, το προτεινόμενο σχήμα σχηματισμού συνασπισμών ικανοποιεί τα αξιώματα του Shapley¹ και έτσι μπορεί να θεωρηθεί δίκαιο.

¹Η ιδιότητα του άκυρου παίκτη (null player property) έχει ήδη ενσωματωθεί στο αξίωμα της σχετικής αποδοτικότητας, όπως γίνεται στην πλειοψηφία των σχετικών προσεγγίσεων [120]. Σε κάθε περίπτωση, οι άκυροι παίκτες αποφεύγονται στο προτεινόμενο παίγνιο καθώς η συγχώνευση συνασπισμών περιορίζεται από την προδιαγραφή ακρίβειας που χαρακτηρίζει την αποδεκτή λειτουργία του WSN.

Παράρτημα Β

Διατύπωση της (4.16).

Έστω ότι ο αντιπρόσωπος r_j ελέγχει αν δύο συνασπισμοί $S(k, r_j)$ και $S(m, r_j)$, $S(k, r_j) \cap S(m, r_j) = \emptyset$, μπορούν να συγχωνευθούν για να δημιουργήσουν ένα υπερσυνασπισμό $S(w, r_j)$. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, έστω ότι ο r_j ελέγχει αν ο $S(m, r_j)$ μπορεί να απορροφηθεί από τον $S(k, r_j)$. Αντίστοιχα προς τη σχέση των X_k^c και X_m^c , διακρίνονται τρεις έλεγχοι που μπορούν να πραγματοποιηθούν.

Αν $X_k^c > X_m^c$, η τιμή X_m^{max} πάντα ικανοποιεί τον κανόνα q όταν χρησιμοποιείται η X_k^c ως βάση σύγκρισης. Συνεπώς, αρκεί να εξετασθεί αν και το X_m^{min} τον ικανοποιεί. Ο κανόνας q συνεπάγεται ότι ισχύουν

$$\frac{|X_m^{min} - X_k^c|}{X_k^c} \leq 1 - q \Rightarrow X_k^c - X_m^{min} \leq (1 - q)X_k^c \Rightarrow \frac{X_m^{min}}{X_k^c} \geq q \quad (\text{B.1})$$

Κατά παρόμοιο τρόπο, αν $X_k^c < X_m^c$, η τιμή της X_m^{min} ικανοποιεί σε κάθε περίπτωση τον περιορισμό ακρίβειας όταν X_k^c είναι η μέτρηση του κόμβου-εκκινήτη του συνασπισμού $S(k, r_j)$. Σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να εξετασθεί η τιμή της X_m^{max} :

$$\frac{|X_m^{max} - X_k^c|}{X_k^c} \leq 1 - q \Rightarrow X_m^{max} - X_k^c \leq (1 - q)X_k^c \Rightarrow \frac{X_m^{max}}{X_k^c} \leq 2 - q \quad (\text{B.2})$$

Όταν $X_k^c = X_m^c$

$$\frac{|X_m^{max} - X_k^c|}{X_k^c} \leq 1 - q \Rightarrow \frac{|X_m^{max} - X_m^c|}{X_m^c} \leq 1 - q \quad (\text{B.3})$$

και

$$\frac{|X_m^{min} - X_k^c|}{X_k^c} \leq 1 - q \Rightarrow \frac{|X_m^{min} - X_m^c|}{X_m^c} \leq 1 - q \quad (\text{B.4})$$

Τόσο η (B.3) όσο και η (B.4) ισχύουν εξ ορισμού λόγω των περιορισμών που καθορίζουν τη δημιουργία συνασπισμών κατά τη φάση έναρξης λειτουργίας.

Παράρτημα Γ

Απόδειξη της (5.19)

Το μέσο προσδοκώμενο όφελος $\hat{\pi}(n_i, \mathbf{s}_{-j})$ που ο κόμβος n_i αναμένει να λάβει ως αποτέλεσμα της επιλογής οποιασδήποτε υπηρεσίας διαφορετικής της s_j δίδεται από τη σχέση

$$\hat{\pi}(n_i, \mathbf{s}_{-j}) = E \{ \pi(n_i, \mathbf{s}_{-j}) \} = \sum_{s_m \neq s_j} p_{-j}(n_i, s_m) \cdot \pi(n_i, s_m), \forall s_m, s_j \in \mathcal{S}, s_m \neq s_j \quad (\Gamma.1)$$

Στην (Γ.1), η $p_{-j}(n_i, s_m)$ συμβολίζει την πιθανότητα ο κόμβος n_i να επιλέξει την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας s_m όταν η υπηρεσία s_j αποκλείεται. Καθώς μόνο μία από τις υπόλοιπες $S - 1$ υπηρεσίες μπορεί να επιλεγεί, η $p_{-j}(n_i, s_m)$ προκύπτει

$$p_{-j}(n_i, s_m) = \frac{1}{S-1} \cdot Pr(n_i \text{ selects } s_m | n_i \text{ cannot select } s_j) = \frac{1}{S-1} \cdot \frac{p(n_i, s_m)}{1 - p(n_i, s_j)} \quad (\Gamma.2)$$

Αντικαθιστώντας τις (Γ.2) και (Γ.1) στην (5.18) προκύπτει

$$\begin{aligned} p(n_i, s_j) \cdot \pi(n_i, s_j) &= (1 - p(n_i, s_j)) \cdot \frac{1}{S-1} \cdot \frac{1}{(1 - p(n_i, s_j))} \cdot \sum_{s_m \neq s_j} p(n_i, s_m) \cdot \pi(n_i, s_m) \Rightarrow \\ p(n_i, s_j) \cdot \pi(n_i, s_j) &= \frac{1}{S-1} \cdot \sum_{\substack{s_m \neq s_j \\ s_m \neq s_k}} p(n_i, s_m) \cdot \pi(n_i, s_m) + \frac{1}{S-1} \cdot p(n_i, s_k) \cdot \pi(n_i, s_k) \end{aligned} \quad (\Gamma.3)$$

Αντίστοιχα,

$$p(n_i, s_k) \cdot \pi(n_i, s_k) = \frac{1}{S-1} \cdot \sum_{\substack{s_m \neq s_j \\ s_m \neq s_k}} p(n_i, s_m) \cdot \pi(n_i, s_m) + \frac{1}{S-1} \cdot p(n_i, s_j) \cdot \pi(n_i, s_j) \quad (\Gamma.4)$$

Συνδυάζοντας τις (Γ.3) and (Γ.4) προκύπτει

$$\begin{aligned}
p(n_i, s_j) \cdot \pi(n_i, s_j) &= p(n_i, s_k) \cdot \pi(n_i, s_k) \Rightarrow \\
p(n_i, s_k) &= \frac{\pi(n_i, s_j)}{\pi(n_i, s_k)} \cdot p(n_i, s_j), \forall s_j \in \mathcal{S}, s_k \in \mathcal{S} \setminus \{s_j\}
\end{aligned} \tag{Γ.5}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η (Γ.5) είναι ουσιαστικά ίδια με την (5.12), καταδεικνύοντας ότι η εξίσωση του τοπικού οφέλους των κόμβων σε επίπεδο τοπικό (ανά κόμβο) οδηγεί στη μεγιστοποίηση και της συνολικής διάρκειας λειτουργίας του MS-WSN.

Επειδή $\sum_{j=1}^S p(n_i, s_j) = 1$, ισχύει

$$\begin{aligned}
p(n_i, s_S) \cdot \pi(n_i, s_S) &= p(n_i, s_j) \cdot \pi(n_i, s_j) \Rightarrow \\
\left(1 - \sum_{m=1}^{S-1} p(n_i, s_m)\right) \cdot \pi(n_i, s_S) &= p(n_i, s_j) \cdot \pi(n_i, s_j) \stackrel{(.5)}{\Rightarrow} \\
\left(1 - p(n_i, s_j) - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^{S-1} \frac{\pi(n_i, s_j)}{\pi(n_i, s_m)} \cdot p(n_i, s_j)\right) \cdot \pi(n_i, s_S) &= p(n_i, s_j) \cdot \pi(n_i, s_j) \Rightarrow \\
1 - p(n_i, s_j) - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^{S-1} \frac{\pi(n_i, s_j)}{\pi(n_i, s_m)} \cdot p(n_i, s_j) &= \frac{\pi(n_i, s_j)}{\pi(n_i, s_S)} \cdot p(n_i, s_j) \Rightarrow \\
1 - p(n_i, s_j) &= \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^S \frac{\pi(n_i, s_j)}{\pi(n_i, s_m)} \cdot p(n_i, s_j) \Rightarrow \\
1 - p(n_i, s_j) &= \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^S \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^S \pi(n_i, s_m)}{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^S \pi(n_i, s_m)} \cdot p(n_i, s_j) \Rightarrow \\
p(n_i, s_j) &= \frac{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^S \pi(n_i, s_m)}{\sum_{k=1}^S \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^S \pi(n_i, s_m)}, \forall n_i \in \mathcal{N}, s_j \in \mathcal{S}
\end{aligned} \tag{Γ.6}$$

που είναι η (5.19).

Παράρτημα Δ

Ισοδυναμία της CE που προσδιορίζεται μέσω της (5.19) με τη θεωρητικά βέλτιστη κατανομή κόμβων που προσδιορίζεται μέσω των (5.12) και (5.13)

Έστω ένα πυκνό MS-WSN με πυκνότητα κόμβων ρ . Τότε, μια αυθαίρετα μεγάλη περιοχή \mathcal{A} περιέχει $M = \mathcal{A} \cdot \rho$ κόμβους. Σύμφωνα με την (5.19), το αναμενόμενο πλήθος κόμβων που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_j είναι $E\{N_{s_j}\} = M \cdot E\{p(n_i, s_j)\}$. Ακολουθώντας το συμβολισμό της (5.12), έστω α_j το ποσοστό των κόμβων που ανήκουν στην \mathcal{A} που εξυπηρετούν την υπηρεσία s_j . Τότε

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_i}{\alpha_j} &= \frac{E\{N_{s_i}\}}{E\{N_{s_j}\}} = \frac{E\{p(n_i, s_i)\}}{E\{p(n_i, s_j)\}} = \\ &= \frac{E \left\{ \prod_{\substack{m=1 \\ l \neq i}}^S \gamma_l \cdot \widehat{v}(s_m) \cdot c(n_i, s_m) / \sum_{k=1}^S \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^S \gamma_l \cdot \widehat{v}(s_m) \cdot c(n_i, s_m) \right\}}{E \left\{ \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^S \gamma_l \cdot \widehat{v}(s_m) \cdot c(n_i, s_m) / \sum_{k=1}^S \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^S \gamma_l \cdot \widehat{v}(s_m) \cdot c(n_i, s_m) \right\}} = \\ &= \frac{\prod_{\substack{m=1 \\ l \neq i}}^S \gamma_l \cdot E \{ \widehat{v}(s_m) \}}{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^S \gamma_l \cdot E \{ \widehat{v}(s_m) \}} = \frac{\gamma_j}{\gamma_i} \cdot \frac{E \{ \widehat{v}(s_j) \}}{E \{ \widehat{v}(s_i) \}} \end{aligned} \quad (\Delta.1)$$

όπου οι δείκτες UC δεν εμφανίζονται επειδή, σε κατάσταση ισορροπίας, η καθολική εξυπηρέτηση των υποστηριζόμενων υπηρεσιών είναι εγγυημένη. Αν το WSN είναι επαρκώς πυκνό ώστε η τοπικά προσδιοριζόμενη κατανομή των κόμβων στις υπηρεσίες του MS-WSN αντανακλά τη συνολική κατανομή των κόμβων, τότε, σύμφωνα με την [159], η (Δ.1) συγκλίνει στην (5.12).

Βιβλιογραφία

- [1] IBM Research. (2003) Autonomic Computing: IBM's perspective on the State of Information Technology. [Online]. Available: http://www.research.ibm.com/autonomic/manifesto/autonomic_computing.pdf
- [2] S. Dobson, R. Sterritt, P. Nixon, and M. Hinchey, "Fulfilling the vision of autonomic computing," *Computer*, vol. 43, no. 1, pp. 35–41, Jan. 2010.
- [3] IBM Research. (2003) The Vision of Autonomic Computing. [Online]. Available: http://www.research.ibm.com/autonomic/research/papers/AC_Vision_Computer_Jan_2003.pdf
- [4] S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu, and P. Havinga, "Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks," in *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*, vol. 3, Mar. 2003, pp. 1918–1922.
- [5] J. Li, "Routing tradeoffs in dynamic peer-to-peer networks," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2006, aAI0809149.
- [6] P. Van Mieghem and L. Vandenbergh, "Trade-off curves for qos routing," in *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, Apr. 2006, pp. 1–11.
- [7] W. L. Chapman, J. Rozenblit, and A. T. Bahill, "System design is an np-complete problem," *Syst. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 222–229, Sep. 2001.
- [8] M. J. Osborne and A. Rubinstein, *A Course in Game Theory*. Cambridge, MA, USA: The MIT Press, Jul. 1994.
- [9] J. von Neumann, "Zur theorie der gesellschaftsspiele," *Mathematische Annalen*, vol. 100, no. 40, pp. 295–320, (Μεταφρασμένο ως "On the Theory of Games of Strategy", pp.13–42 in Contributions to the Theory of Games (Annals of Mathematics Studies), 1928.

- [10] J. von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 1944.
- [11] J. F. Nash, “Equilibrium points in n-person games,” in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1950.
- [12] ———, “Non-cooperative games,” *The Annals of Mathematics*, vol. 54, no. 2, pp. 286–295, Sep. 1951.
- [13] C. He, M. Kiziroglou, D. Yates, and E. Yeatman, “A mems self-powered sensor and rf transmission platform for wsn nodes,” *Sensors Journal, IEEE*, vol. 11, no. 12, pp. 3437–3445, Dec. 2011.
- [14] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, *Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, Aug. 2010.
- [15] M. P. Johnson, D. Sariöz, A. Bar-Noy, T. Brown, D. Verma, and C. W. Wu, “More is more: The benefits of denser sensor deployment,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 8, no. 3, pp. 22:1–22:19, Aug. 2012.
- [16] M. Crossbow. The smart sensor company. [Online]. Available: <http://www.xbow.com/>
- [17] Eyes project. [Online]. Available: <http://www.eyes.eu.org/>
- [18] Q. Huang, S. Bhattacharya, C. Lu, and G.-C. Roman, “Far: Face-aware routing for mobicast in large-scale sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 1, no. 2, pp. 240–271, Nov. 2005.
- [19] H. Kenniche and V. Ravelomananana, “Random geometric graphs as model of wireless sensor networks,” in *The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, vol. 4, Feb. 2010, pp. 103–107.
- [20] C. E. Perkins, *Ad Hoc Networking*, 1st ed. Addison-Wesley Professional, 2008.
- [21] S. Fischer and B. Vocking, “Adaptive routing with stale information,” *Theoretical Computer Science*, vol. 410, no. 36, pp. 3357–3371, 2009.
- [22] IEEE 802.15 Working Group for WPAN, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. IEEE, Jun. 2011. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2011.pdf>
- [23] ZigBee Alliance. [Online]. Available: <http://www.zigbee.org>

- [24] HART Communication Foundation. [Online]. Available: http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_technology.html
- [25] IETF: IPv6 over Low power WPAN (Active WG). [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/wg/6lowpan/>
- [26] M. A. Hussain, P. Khan, and K. K. Sup, “Wsn research activities for military application,” in *Proceedings of the 11th international conference on Advanced Communication Technology*, ser. ICACT’09, vol. 1. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2009, pp. 271–274.
- [27] S. Diamond and M. Ceruti, “Application of wireless sensor network to military information integration,” in *Industrial Informatics, 2007 5th IEEE International Conference on*, vol. 1, Jun. 2007, pp. 317–322.
- [28] B. Warneke, M. Last, B. Liebowitz, and K. S. J. Pister, “Smart Dust: Communicating with a Cubic-Millimeter Computer,” *Computer*, vol. 34, no. 1, pp. 44–51, Jan. 2001.
- [29] B. Warneke, M. Scott, B. Leibowitz, L. Zhou, C. Bellew, J. Chediak, J. Kahn, B. Boser, and K. Pister, “An autonomous 16 mm³ solar-powered node for distributed wireless sensor networks,” in *Sensors, 2002. Proceedings of IEEE*, vol. 2, 2002, pp. 1510–1515.
- [30] TinyOS Alliance. (2000–2012). [Online]. Available: <http://www.tinyos.net>
- [31] LINEAR Technology. Wireless Sensor Networks - Dust Networks. [Online]. Available: http://www.linear.com/products/wireless_sensor_networks
- [32] G. Simon, M. Maróti, A. Lédeczi, G. Balogh, B. Kusy, A. Nádas, G. Pap, J. Sallai, and K. Frampton, “Sensor network-based countersniper system,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, ser. SenSys ’04. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 1–12.
- [33] Raytheon BBN Technologies. Boomerang. [Online]. Available: http://www.bbn.com/products_and_services/boomerang/
- [34] A. Lédeczi, A. Nádas, P. Völgyesi, G. Balogh, B. Kusy, J. Sallai, G. Pap, S. Dóra, K. Molnár, M. Maróti, and G. Simon, “Countersniper system for urban warfare,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 1, no. 2, pp. 153–177, Nov. 2005.
- [35] UVA VigilNet. (2006–2007). [Online]. Available: <http://www.cs.virginia.edu/wsn/vigilnet/>
- [36] T. He, S. Krishnamurthy, L. Luo, T. Yan, L. Gu, R. Stoleru, G. Zhou, Q. Cao, P. Vicaire, J. A. Stankovic, T. F. Abdelzaher, J. Hui, and B. Krogh, “Vigilnet: An integrated sensor

- network system for energy-efficient surveillance,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–38, Feb. 2006.
- [37] S. H. Lee, S. Lee, H. Song, and H. S. Lee, “Wireless sensor network design for tactical military applications: remote large-scale environments,” in *Proceedings of the 28th IEEE conference on Military communications*, ser. MILCOM’09. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2009, pp. 911–917.
- [38] M. Durisic, Z. Tafa, G. Dimic, and V. Milutinovic, “A survey of military applications of wireless sensor networks,” in *Embedded Computing (MECO), 2012 Mediterranean Conference on*, Jun. 2012, pp. 196–199.
- [39] J. Polastre, R. Szewczyk, A. Mainwaring, D. Culler, and J. Anderson, *Wireless sensor networks*, C. S. Raghavendra, K. M. Sivalingam, and T. Znati, Eds. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [40] R. Szewczyk, E. Osterweil, J. Polastre, M. Hamilton, A. Mainwaring, and D. Estrin, “Habitat monitoring with sensor networks,” *Commun. ACM*, vol. 47, no. 6, pp. 34–40, Jun. 2004.
- [41] Great Duck Island, Maine, USA. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Great_Duck_Island,_Maine
- [42] The zebranet wildlife tracker. [Online]. Available: <http://www.princeton.edu/~mrm/zebranet.html>
- [43] P. Zhang, C. M. Sadler, S. A. Lyon, and M. Martonosi, “Hardware design experiences in zebranet,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, ser. SenSys ’04. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 227–238.
- [44] T. Liu, C. M. Sadler, P. Zhang, and M. Martonosi, “Implementing software on resource-constrained mobile sensors: experiences with impala and zebranet,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*, ser. MobiSys ’04. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 256–269.
- [45] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Welsh, O. Marcillo, J. Johnson, M. Ruiz, and J. Lees, “Deploying a wireless sensor network on an active volcano,” *IEEE Internet Computing*, vol. 10, no. 2, pp. 18–25, Mar. 2006.
- [46] E. A. Basha, S. Ravela, and D. Rus, “Model-based monitoring for early warning flood detection,” in *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, ser. SenSys ’08. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 295–308.

- [47] SCIER – A technological simulation platform to managing natural hazards. [Online]. Available: <http://www.scier.eu/>
- [48] EU-FIRE: Innovative optoelectronic and acousting sensing technologies for large scale forest fire long term monitoring. [Online]. Available: <http://www.eufire.org/>
- [49] ICT for Sustainable Growth: Energy Efficiency of the ICT Sector. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/information_society/activities/sustainable_growth/ict_sector/index_en.htm
- [50] ICT for Sustainable Growth: ICT for Water Management. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/information_society/activities/sustainable_growth/water/index_en.htm
- [51] ICT for Sustainable Growth: ICT for Climate Change Management. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/information_society/activities/sustainable_growth/climate/index_en.htm
- [52] Harvard Sensor Networks Lab. Codeblue: Wireless sensors for medical care. [Online]. Available: <http://fiji.eecs.harvard.edu/CodeBlue>
- [53] D. Malan, T. Fulford-jones, M. Welsh, and S. Moulton, “Codeblue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care,” in *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, 2004.
- [54] Alarmnet: Wireless sensor networks for smart healthcare. [Online]. Available: <http://www.cs.virginia.edu/wsn/medical/>
- [55] A. Wood, J. Stankovic, G. Virone, L. Selavo, Z. He, Q. Cao, T. Doan, Y. Wu, L. Fang, and R. Stoleru, “Context-aware wireless sensor networks for assisted living and residential monitoring,” *Network, IEEE*, vol. 22, no. 4, pp. 26–33, Jul.-Aug. 2008.
- [56] N. Xu, S. Rangwala, K. K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan, and D. Estrin, “A wireless sensor network for structural monitoring,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, ser. SenSys '04. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 13–24.
- [57] T. Popescu, “New approach for machine vibration analysis and health monitoring,” in *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on*, vol. 4, Jul. 2006, pp. 2874–2879.
- [58] N. Ramanathan, M. Yarvis, J. Chhabra, N. Kushalnagar, L. Krishnamurthy, and D. Estrin, “A stream-oriented power management protocol for low duty cycle sensor network applications,” in *Proceedings of the 2nd IEEE workshop on Embedded*

Networked Sensors, ser. EmNets '05. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005, pp. 53–61.

- [59] L. Krishnamurthy, R. Adler, P. Buonadonna, J. Chhabra, M. Flanigan, N. Kushalnagar, L. Nachman, and M. Yarvis, “Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the north sea,” in *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, ser. SenSys '05. New York, NY, USA: ACM, 2005, pp. 64–75.
- [60] Y. Li, W. Ye, J. Heidemann, and R. Kulkarni, “Design and evaluation of network reconfiguration protocols for mostly-off sensor networks,” *Ad Hoc Netw.*, vol. 6, no. 8, pp. 1301–1315, Nov. 2008.
- [61] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser, and M. Turon, “Wireless sensor networks for structural health monitoring,” in *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, ser. SenSys '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 427–428.
- [62] X. Liu, J. Cao, S. Lai, C. Yang, H. Wu, and Y. L. Xu, “Energy efficient clustering for wsn-based structural health monitoring,” in *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, Apr. 2011, pp. 2768–2776.
- [63] R. Lin, Z. Wang, and Y. Sun, “Wireless sensor networks solutions for real time monitoring of nuclear power plant,” in *Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on*, vol. 4, Jun. 2004, pp. 3663–3667.
- [64] G. Anastasi, O. Farruggia, G. Lo Re, and M. Ortolani, “Monitoring high-quality wine production using wireless sensor networks,” in *System Sciences, 2009. HICSS '09. 42nd Hawaii International Conference on*, Jan. 2009, pp. 1–7.
- [65] J. Hwang, C. Shin, and H. Yoe, “Study on an agricultural environment monitoring server system using wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 11 189–11 211, 2010.
- [66] J. Valente, D. Sanz, A. Barrientos, J. d. Cerro, A. Ribeiro, and C. Rossi, “An air-ground wireless sensor network for crop monitoring,” *Sensors*, vol. 11, no. 6, pp. 6088–6108, 2011.
- [67] A. López, D. L. Valera, F. Molina-Aiz, and A. Peña, “Thermography and sonic anemometry to analyze air heaters in mediterranean greenhouses,” *Sensors*, vol. 12, no. 10, pp. 13 852—13 870, 2012.

- [68] H. Yih-Chun and A. Perrig, "A survey of secure wireless ad hoc routing," *Security Privacy, IEEE*, vol. 2, no. 3, pp. 28–39, May-Jun. 2004.
- [69] L. Abusalah, A. Khokhar, and M. Guizani, "A survey of secure mobile ad hoc routing protocols," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 10, no. 4, pp. 78–93, Quar. 2008.
- [70] E. Alotaibi and B. Mukherjee, "A survey on routing algorithms for wireless ad-hoc and mesh networks," *Computer Networks*, vol. 56, no. 2, pp. 940–965, 2012.
- [71] J. Al-Karaki and A. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 11, no. 6, pp. 6–28, Dec. 2004.
- [72] K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 325–349, 2005.
- [73] L. J. García Villalba, A. L. Sandoval Orozco, A. Triviño Cabrera, and C. J. Barenco Abbas, "Routing Protocols in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 9, no. 11, pp. 8399–8421, 2009.
- [74] M. Ayaz, I. Baig, A. Abdullah, and I. Faye, "A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1908–1927, 2011.
- [75] S. Okdem and D. Karaboga, "Routing in wireless sensor networks using an ant colony optimization (aco) router chip," *Sensors*, vol. 9, no. 2, pp. 909–921, 2009.
- [76] N. Trigoni, Y. Yao, A. Demers, J. Gehrke, and R. Rajaraman, "Wave scheduling and routing in sensor networks," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 3, no. 1, Mar. 2007.
- [77] W. Lai and I. C. Paschalidis, "Optimally balancing energy consumption versus latency in sensor network routing," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 4, no. 4, pp. 21:1–21:28, Sep. 2008.
- [78] H. Long, Y. Liu, Y. Wang, R. P. Dick, and H. Yang, "Battery allocation for wireless sensor network lifetime maximization under cost constraints," in *Proceedings of the 2009 International Conference on Computer-Aided Design*, ser. ICCAD '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 705–712.
- [79] M. Chitnis, P. Pagano, G. Lipari, and Y. Liang, "A survey on bandwidth resource allocation and scheduling in wireless sensor networks," in *Network-Based Information Systems, 2009. NBIS '09. International Conference on*, Aug. 2009, pp. 121–128.

- [80] A. Woo and D. E. Culler, “A transmission control scheme for media access in sensor networks,” in *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, ser. MobiCom ’01. New York, NY, USA: ACM, 2001, pp. 221–235.
- [81] X. Wang, D. Wang, H. Zhuang, and S. Morgera, “Fair energy-efficient resource allocation in wireless sensor networks over fading tdma channels,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 28, no. 7, pp. 1063–1072, Sep. 2010.
- [82] G. Mainland, D. C. Parkes, and M. Welsh, “Decentralized, adaptive resource allocation for sensor networks,” in *Proceedings of the 2nd conference on Symposium on Networked Systems Design & Implementation - Volume 2*, ser. NSDI’05. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2005, pp. 315–328.
- [83] R. Rajagopalan and P. Varshney, “Data-aggregation techniques in sensor networks: a survey,” *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 8, no. 4, pp. 48–63, 2006.
- [84] S. Chatterjea, T. Nieberg, N. Meratnia, and P. Havinga, “A distributed and self-organizing scheduling algorithm for energy-efficient data aggregation in wireless sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 4, no. 4, pp. 20:1–20:41, Sep. 2008.
- [85] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, “Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks,” in *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, ser. MobiCom ’00. New York, NY, USA: ACM, 2000, pp. 56–67.
- [86] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. B. Wicker, “The impact of data aggregation in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems*, ser. ICDCSW ’02. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2002, pp. 575–578.
- [87] K. Akkaya, M. Demirbas, and R. S. Aygun, “The impact of data aggregation on the performance of wireless sensor networks,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 8, no. 2, pp. 171–193, Feb. 2008.
- [88] A. C.-F. Chan and C. Castelluccia, “A security framework for privacy-preserving data aggregation in wireless sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 7, no. 4, pp. 29:1–29:45, Feb. 2011.
- [89] Z. Brakerski and V. Vaikuntanathan, “Fully homomorphic encryption from ring-lwe and security for key dependent messages,” in *Proceedings of the 31st annual conference on Advances in cryptology*, ser. CRYPTO’11. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, pp. 505–524.

- [90] G. Maierbacher and J. a. Barros, “Low-complexity coding and source-optimized clustering for large-scale sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 5, no. 3, pp. 24:1–24:32, Jun. 2009.
- [91] F. Ordonez and B. Krishnamachari, “Optimal information extraction in energy-limited wireless sensor networks,” *IEEE J.Sel. A. Commun.*, vol. 22, no. 6, pp. 1121–1129, Sep. 2006.
- [92] E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer, and M. Zorzi, “In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey,” *Wireless Communications, IEEE*, vol. 14, no. 2, pp. 70–87, Apr. 2007.
- [93] L. Chitnis, A. Dobra, and S. Ranka, “Aggregation methods for large-scale sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 4, no. 2, pp. 9:1–9:36, Apr. 2008.
- [94] H. Alzaid, E. Foo, and J. G. Nieto, “Secure data aggregation in wireless sensor network: a survey,” in *Proceedings of the sixth Australasian conference on Information security - Volume 81*, ser. AISC '08. Darlinghurst, Australia, Australia: Australian Computer Society, Inc., 2008, pp. 93–105.
- [95] O. Younis, M. Krunz, and S. Ramasubramanian, “Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges,” *Netwrk. Mag. of Global Internetwkg.*, vol. 20, no. 3, pp. 20–25, Sep. 2006.
- [96] A. K. Sadek, W. Yu, and K. J. R. Liu, “On the energy efficiency of cooperative communications in wireless sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 6, no. 1, pp. 5:1–5:21, Jan. 2010.
- [97] T. F. Gonzalez, “On the computational complexity of clustering and related problems,” in *System Modeling and Optimization*, ser. Lecture Notes in Control and Information Sciences, R. Drenick and F. Kozin, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 1982, vol. 38, pp. 174–182.
- [98] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 4, pp. 660–670, Oct. 2002.
- [99] O. Younis and S. Fahmy, “Heed: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks,” *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 4, pp. 366–379, Oct.– Dec. 2004.
- [100] S. Soro and W. Heinzelman, “Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering,” in *Proceedings of the 19th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing*, Apr. 2005.

- [101] S. Goel and T. Imielinski, "Prediction-based monitoring in sensor networks: taking lessons from mpeg," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 31, pp. 82–98, Oct. 2001.
- [102] A. Meka and A. Singh, "Distributed spatial clustering in sensor networks," in *Advances in Database Technology - EDBT 2006*, ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin, 2006, vol. 3896, pp. 980–1000.
- [103] C. Liu, K. Wu, and J. Pei, "An energy-efficient data collection framework for wireless sensor networks by exploiting spatiotemporal correlation," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 18, no. 7, pp. 1010–1023, Jul. 2007.
- [104] H. Hu, X. Ma, S. Tang, G. Chen, and Q. Zhao, "Mcc: Model-based continuous clustering in wireless sensor networks," in *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Fourth International Conference on*, vol. 5. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2009, pp. 265–269.
- [105] S. Yoon and C. Shahabi, "The clustered aggregation (cag) technique leveraging spatial and temporal correlations in wireless sensor networks," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 3, no. 1, Mar. 2007.
- [106] S. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, and W. Hong, "Tag: a tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks," *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, vol. 36, no. SI, pp. 131–146, Dec. 2002.
- [107] R. Virrankoski and A. Savvides, "Tasc: topology adaptive spatial clustering for sensor networks," in *Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on*, Nov. 2005, pp. 604–614.
- [108] J. Wu and J. Cao, "Connected k-hop clustering in ad hoc networks," in *Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Processing*, ser. ICPP '05. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005, pp. 373–380.
- [109] S. Upadhyayula and S. Gupta, "Spanning tree based algorithms for low latency and energy efficient data aggregation enhanced convergecast (dac) in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 5, no. 5, pp. 626–648, 2007.
- [110] O. Durmaz Incel, A. Ghosh, B. Krishnamachari, and K. Chintalapudi, "Fast data collection in tree-based wireless sensor networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 1, pp. 86–99, Jan. 2012.
- [111] S. Leng, Y. Zhang, H.-H. Chen, L. Zhang, and K. Liu, "A novel k-hop compound metric based clustering scheme for ad hoc wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 367–375, Jan. 2009.

- [112] A. Amis, R. Prakash, T. Vuong, and D. Huynh, "Max-min d-cluster formation in wireless ad hoc networks," in *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 1, 2000, pp. 32–41.
- [113] M. Youssef, A. Youssef, and M. Younis, "Overlapping multihop clustering for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 20, no. 12, pp. 1844–1856, Dec. 2009.
- [114] A. A. Abbasi and M. Younis, "A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks," *Comput. Commun.*, vol. 30, no. 14-15, pp. 2826–2841, Oct. 2007.
- [115] E. R. Hruschka, R. J. G. B. Campello, A. A. Freitas, and A. C. P. L. F. De Carvalho, "A survey of evolutionary algorithms for clustering," *Trans. Sys. Man Cyber Part C*, vol. 39, no. 2, pp. 133–155, Mar. 2009.
- [116] R. B. Myerson, *Game Theory: Analysis of Conflict*. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, Sep. 1997.
- [117] H. Moulin, "Game theory and economic analysis: A quiet revolution in economics," 2003. [Online]. Available: <http://ebooks.ub.uni-muenchen.de/4375/>
- [118] R. J. Aumann and B. Peleg, "Von Neumann-Morgenstern solutions to cooperative games without side payments," *Bulletin of The American Mathematical Society*, vol. 66, pp. 173–179, 1960.
- [119] R. M. Thrall and W. F. Lucas, "N-person games in partition function form," *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 10, no. 1, pp. 281–298, 1963.
- [120] W. Saad, Z. Han, M. Debbah, A. Hjørungnes, and T. Basar, "Coalitional game theory for communication networks," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 26, no. 5, pp. 77–97, Sep. 2009.
- [121] L. S. Shapley, "A value for n-person games. Contribution to the Theory of Games," H. Kuhn and A. Tucker, Eds., 1953, vol. 2, pp. 307–317.
- [122] J. Cai and U. Pooch, "Allocate fair payoff for cooperation in wireless ad hoc networks using shapley value," in *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings. 18th International*, Apr. 2004, pp. 219–227.
- [123] Z. Han and H. V. Poor, "Coalition games with cooperative transmission: a cure for the curse of boundary nodes in selfish packet-forwarding wireless networks," *Trans. Comm.*, vol. 57, no. 1, pp. 203–213, Jan. 2009.

- [124] D. Schmeidler, “The nucleolus of a characteristic function game,” *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol. 17, pp. 1163–1170, 1969.
- [125] R. J. Aumann and M. Maschler, “Game theoretic analysis of a bankruptcy problem from the talmud,” *Journal of Economic Theory*, vol. 36, pp. 195–213, 1985.
- [126] R. J. Aumann, *Game Theory in the Talmud*, ser. Research bulletin series on Jewish law and economics. Research Center on Jewish Law and Economics, Department of Economics, Barilan University, 2002.
- [127] E. Kohlberg, “On the nucleolus of a characteristic function game,” *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol. 20, pp. 62–66, 1971.
- [128] M. Davis and M. Maschler, “The kernel of a cooperative game,” *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 12, pp. 223–259, 1965.
- [129] D. Ray, *A game-theoretic perspective on coalition formation*. Oxford University Press, Jan. 2008.
- [130] R. J. Aumann and J. Drèze, “Cooperative games with coalition structures,” *International Journal of Game Theory*, vol. 3, pp. 217–237, 1974.
- [131] S. Cohen, G. Dror, and E. Ruppin, “Feature selection via coalitional game theory,” *Neural Comput.*, vol. 19, pp. 1939–1961, July 2007.
- [132] K. R. Apt and A. Witzel, “A generic approach to coalition formation,” *Proc. of the 1st Int. Workshop on Computational Social Choice (COMSOC)*, vol. 11, no. 3, Dec. 2006.
- [133] J. C. Harsanyi, “Games with incomplete information played by “bayesian” players, i-iii,” *Management Science*, vol. 14, no. 3, pp. 159–182, Nov. 1967.
- [134] S. Morris, “The common prior assumption in economic theory,” *Economics and Philosophy*, vol. 11, no. 2, pp. 227–253, Oct. 1995.
- [135] R. J. Aumann, “Correlated equilibrium as an expression of bayesian rationality,” *Econometrica*, vol. 55, no. 1, pp. 1–18, Jan. 1987. [Online]. Available: <http://ideas.repec.org/a/econ/emetrp/v55y1987i1p1-18.html>
- [136] N. Sturtevant, “A comparison of algorithms for multi-player games,” in *Computers and Games*, ser. Lecture Notes in Computer Science, J. Schaeffer, M. Müller, and Y. Björnsson, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2003, vol. 2883, pp. 108–122.
- [137] I. Zuckerman, A. Felner, and S. Kraus, “Mixing search strategies for multi-player games,” in *Proceedings of the 21st international joint conference on Artificial*

- intelligence*, ser. IJCAI'09. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2009, pp. 646–651. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1661445.1661548>
- [138] F. Matúš, “On equivalence of markov properties over undirected graphs,” *Journal of Applied Probability*, vol. 29, no. 3, pp. 745–749, Sep. 1992. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/3214910>
- [139] S. Kakade, M. Kearns, J. Langford, and L. Ortiz, “Correlated equilibria in graphical games,” in *Proceedings of the 4th ACM conference on Electronic commerce*, ser. EC '03. New York, NY, USA: ACM, 2003, pp. 42–47.
- [140] A. Jindal and K. Psounis, “Modeling spatially correlated data in sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 2, pp. 466–499, Nov. 2006.
- [141] R. Cristescu, B. Beferull-Lozano, and M. Vetterli, “On network correlated data gathering,” *IEEE INFOCOM 2004*, vol. 4, pp. 2571–2582, Mar. 2004.
- [142] Y. Qu, J. Fang, and S. Zhang, “Identifying neighbor and connectivity of wireless sensor networks with poisson point process,” *Wireless Personal Communications*, vol. 64, pp. 795–809, Jun. 2012.
- [143] M. Youssef, A. Youssef, and M. Younis, “Overlapping multihop clustering for wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 20, no. 12, pp. 1844–1856, Dec. 2009.
- [144] S. D. Ramchurn, M. Polukarov, A. Farinelli, C. Truong, and N. R. Jennings, “Coalition formation with spatial and temporal constraints,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, ser. AAMAS '10, vol. 3, 2010, pp. 1181–1188.
- [145] G. Greco, E. Malizia, L. Palopoli, and F. Scarcello, “Non-transferable utility coalitional games via mixed-integer linear constraints,” *J. Artif. Int. Res.*, vol. 38, no. 1, pp. 633–685, May 2010.
- [146] T. Sandholm, K. Larson, M. Andersson, O. Shehory, and F. Tohmé, “Coalition structure generation with worst case guarantees,” *Artificial Intelligence*, vol. 111, no. 1-2, pp. 209–238, 1999.
- [147] T. Rahwan, T. Michalak, E. Elkind, P. Faliszewski, J. Sroka, M. Wooldridge, and N. Jennings, “Constrained coalition formation,” in *The Twenty Fifth Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*, ser. AAAI-2011, Aug. 2011, pp. 719–725.

- [148] Q. Zhu, “A trade-off study between efficiency and fairness in communication networks,” in *INFOCOM Workshops 2008, IEEE*, Apr. 2008, pp. 1–2.
- [149] G. Chen, C. Li, M. Ye, and J. Wu, “An unequal cluster-based routing protocol in wireless sensor networks,” *Wirel. Netw.*, vol. 15, no. 2, pp. 193–207, Feb. 2009.
- [150] B. Krishnamachari, S. Wicker, and R. Bejar, “Phase transition phenomena in wireless ad hoc networks,” in *Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01. IEEE*, vol. 5, Nov. 2001, pp. 2921–2925.
- [151] A. Savvides, C.-C. Han, and M. B. Strivastava, “Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors,” in *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, ser. MobiCom '01. New York, NY, USA: ACM, 2001, pp. 166–179.
- [152] M. C. Vuran and I. F. Akyildiz, “Spatial correlation-based collaborative medium access control in wireless sensor networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 14, pp. 316–329, Apr. 2006.
- [153] C. Haas, J. Wilke, and V. Stöhr, “Realistic simulation of energy consumption in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 9th European conference on Wireless Sensor Networks*, ser. EWSN'12. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, pp. 82–97.
- [154] A. Tiwari, P. Ballal, and F. L. Lewis, “Energy-efficient wireless sensor network design and implementation for condition-based maintenance,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 3, no. 1, pp. 1:1–1:23, Mar. 2007.
- [155] R. Machado, W. Zhang, G. Wang, and S. Tekinay, “Coverage properties of clustered wireless sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 7, no. 2, pp. 13:1–13:21, Sep. 2010.
- [156] A. C. Voulkidis, M. P. Anastasopoulos, and P. G. Cottis, “Energy efficiency in wireless sensor networks: A game theoretic approach based on coalition formation,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 10, no. 2, pp. (accepted, to appear), May 2014.
- [157] T. Roughgarden, “The price of anarchy in games of incomplete information,” in *Proceedings of the 13th ACM Conference on Electronic Commerce*, ser. EC '12. New York, NY, USA: ACM, 2012, pp. 862–879.
- [158] R. van den Brink, “Null or nullifying players: The difference between the shapley value and equal division solutions,” *Journal of Economic Theory*, vol. 136, no. 1, pp. 767–775, Sep. 2007.

- [159] J. C. Harsanyi, "Games with randomly disturbed payoffs: A new rationale for mixed-strategy equilibrium points," *International Journal of Game Theory*, vol. 2, pp. 1–23, 1973.

Κατάλογος Δημοσιεύσεων

- [1] M. P. Anastasopoulos, **A. C. Voulkidis**, A. V. Vasilakos, and P. G. Cottis, “A secure network management protocol for smartgrid bpl networks: Design, implementation and experimental results,” *Computer Communications*, vol. 31, no. 18, pp. 4333–4342, 2008.
- [2] **A. C. Voulkidis**, A. V. Vasilakos, and P. G. Cottis, “Evolutionary game theory in wireless communications and networking,” in *Game Theory for Wireless Communications and Networking*. Auerbach Publications, CRC Group, Taylor & Francis Group, USA, 2010.
- [3] **A. C. Voulkidis**, S. Livieratos, and P. G. Cottis, “Spatially correlated multi-modal wireless sensor networks: a coalitional game theoretic approach,” in *Proceedings of the Third international conference on Autonomous and Intelligent Systems*, ser. AIS’12. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, pp. 1–9.
- [4] **A. C. Voulkidis**, M. P. Anastasopoulos, and P. G. Cottis, “Energy efficiency in wireless sensor networks a game theoretic approach based on coalition formation,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 10, no. 2, 2014 (in press).
- [5] **A. C. Voulkidis** and P. G. Cottis, “Optimal nodes allocation in multi-service wsns: A correlated strategy based game theoretic approach,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, (submitted).