



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μελέτη Αποδοτικών Αλγορίθμων για τον Έλεγχο  
Τοπολογίας σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων  
Παρουσία Εμποδίων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΣΥΛΛΑΣ

**Επιβλέπων:** Συμεών Παπαβασιλείου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μελέτη Αποδοτικών Αλγορίθμων για τον Έλεγχο  
Τοπολογίας σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων  
Παρουσία Εμποδίων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΣΥΛΛΑΣ

**Επιβλέπων:** Συμεών Παπαβασιλείου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 05/09/2022.

.....

Συμεών Παπαβασιλείου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Θεοδώρα Βαρβαρίγου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννα Ρουσάκη  
Επικ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022

.....

Γεώργιος Δ. Σύλλας

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

Copyright © Γεώργιος Σύλλας, 2022.

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

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΔΑ), καθώς έχουν πληθώρα εφαρμογών. Βασικό χαρακτηριστικό ενός ασύρματου δικτύου είναι η κάλυψη – παρακολούθηση του χώρου. Επίσης η συνδεσιμότητα του είναι αναγκαία συνθήκη για την ομαλή λειτουργία του. Στην παρούσα εργασία μελετούνται τρόποι μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, που σχηματίζεται από αισθητήρες τοποθετημένους με τυχαίο τρόπο σε ένα δισδιάστατο χώρο με κυρτά, αδιαφανή εμπόδια. Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης πρέπει να συντελείται χωρίς την υποβάθμιση των λειτουργιών του δικτύου, επομένως, υπό τις προϋποθέσεις της πλήρους κάλυψης του χώρου και της επικοινωνίας του συνόλου των αισθητήρων. Οι αισθητήρες θεωρούμε ότι διαθέτουν μεταβλητές ακτίνες αίσθησης και επικοινωνίας, με την ενεργειακή κατανάλωση να αυξάνεται με κάθε αύξηση της αντίστοιχης ακτίνας. Με βάση τις ακτίνες αυτές ορίζονται κυκλικοί δίσκοι με κέντρο τον αισθητήρα, εντός των οποίων ο αισθητήρας μπορεί να συλλέξει πληροφορίες ή να επικοινωνήσει αντίστοιχα. Ακόμα θεωρούμε το κόστος λειτουργίας των αισθητήρων ως το άθροισμα της ενέργειας που απαιτείται για την συλλογή πληροφοριών από τον περιβάλλοντα χώρο, την ενέργεια που καταναλώνει ένας αισθητήρας για την επικοινωνία του με τους υπόλοιπους, και το κόστος τοποθέτησης του αισθητήρα. Στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους αυτού ενώ παράλληλα διατηρούνται κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά του δικτύου (συνδεσιμότητα, πλήρης κάλυψη περιοχής ενδιαφέροντος). Το πετυχαίνουμε αυτό χωρίζοντας το πρόβλημα στα επιμέρους προβλήματα της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης για την επικοινωνία των αισθητήρων και στην κατανάλωση για τη συλλογή πληροφοριών από το χώρο. Μοντελοποιώντας το δίκτυο αισθητήρων ως έναν γεωμετρικό γράφο, διατυπώνεται ένας αλγόριθμος που βασίζεται στον υπολογισμό του ελάχιστου συνδετικού δέντρου, με κόμβους τους αντίστοιχους αισθητήρες και ακμές μεταξύ των αντίστοιχων κόμβων εάν και μόνο εάν η απόσταση των αισθητήρων είναι μικρότερη ή ίση με τη μέγιστη ακτίνα επικοινωνίας και δεν παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο. Στις ακμές αυτές ως βάρος ορίζεται η απόσταση των δύο αισθητήρων που αντιστοιχούν στους κόμβους που αυτές ενώνουν. Τέλος υπολογίζεται το ελάχιστο συνδετικό δένδρο και έτσι μπορούμε να ορίσουμε σε κάθε αισθητήρα ως τιμή ακτίνας επικοινωνίας το μέγιστο βάρος από τα βάρη των ακμών που προσπίπτουν στον αντίστοιχο κόμβο. Για τη μείωση της ενέργειας που απαιτείται για τη συλλογή πληροφοριών από το χώρο χρησιμοποιούνται κάποιοι άπληστοι αλγόριθμοι – κατανεμημένοι και κεντρικοποιημένοι- που συναντούνται στην βιβλιογραφία καθώς και μία παραλλαγή ενός κατανεμημένου. Στην παραλλαγή που προτείνουμε, χωρίζεται ολόκληρος ο χώρος ενδιαφέροντος σε τετραγωνικά, ισομεγέθη πλέγματα, με βάση τα οποία δίνεται η έννοια της «γειτονιάς» κάθε κόμβου, τους κοντινούς του κόμβους δηλαδή που χρησιμοποιεί για να λάβει τις αποφάσεις αυξομείωσης της ακτίνας του. Επίσης μεταβάλλεται το κριτήριο τερματισμού, αντιμετωπίζοντας έτσι κάποια προβλήματα του Κατανεμημένου Αλγορίθμου του Χρήστου Ν. Τσανικίδη. Η εργασία καταλήγει με την εκτέλεση εκτενών προσομοιώσεων και την αξιολόγηση και σύγκριση των προτεινόμενων αλγορίθμων και των αλγορίθμων της βιβλιογραφίας με τη χρήση διαφόρων μετρικών.

## Λέξεις κλειδιά

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, Βελτιστοποίηση, Πρόβλημα Κάλυψης, Πρόβλημα Διατήρησης Συνδεσιμότητας, Διάρκεια Ζωής Δικτύου



# Abstract

A great increase in interest in Wireless Sensor Networks (WSNs) has been observed in recent years, as they have a multitude of applications. A key feature of a wireless network is space monitoring. To preserve communication between the sensor nodes, the network is required to be connected. In this thesis, we study the problem of computing a minimal amount of sensing and communication resources of WSNs, formed by sensors placed randomly in a two-dimensional space with convex, opaque obstacles. We aim to achieve the minimization of energy consumption without degrading the network functions, therefore, under the conditions of full coverage of the space and ensuring communication between all of the sensors. Variable sensing and communication radii for all sensor nodes are considered, with energy consumption increasing when the corresponding radius is increased. Based on these radii, circular discs centered on the sensor are defined, within which the sensor can collect information or communicate respectively. We define the sensor operational cost as the sum of the energy required to collect information from the surrounding space, the energy consumed by a sensor to communicate with others, and the energy required to place the sensor. To achieve our goal we divide the problem of minimizing the total energy consumption into the problems of reducing the energy consumption for sensor communication and reducing the energy consumption for gathering information. For the first subproblem, we propose an energy consumption reduction algorithm that creates a graph based on the network, with nodes the corresponding sensors and edges between the two nodes if and only if the distance of the corresponding sensors is less than or equal to the maximum communication radius and an obstacle does not intervene. On these edges, the distance between the two sensors is used as an edge weight. Finally, the minimum spanning tree (MST) is calculated and thus we can choose for each sensor the maximum weight from the weights of the edges incident on the corresponding node as a communication radius value. To reduce the energy required to gather information greedy algorithms –distributed and centralized – found in the literature are used. We also propose a distributed algorithm that is closely related to the existing ones in the literature. In the variant we propose, the entire area of interest is partitioned in equal-sized squares (grids) which define node neighborhoods, i.e. the nodes close to it that it uses to make the decisions to increase or decrease its radius. Also, the termination criterion is changed, addressing the issue of incomplete coverage of the region of interest of the Distributed Algorithm of Christos N. Tsanikidis. The paper concludes by performing extensive simulations and evaluating and comparing the above algorithms using various metrics.

## Keywords

Wireless Sensor Networks, Optimization, Coverage, Connectivity, Network Lifetime, Topology Control





## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Συμεών Παπαβασιλείου για την καθοδήγηση του και την ευκαιρία που μου έδωσε με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον και σύγχρονο ερευνητικό πεδίο.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την μεταδιδάκτορα ερευνήτρια Δρ. Μαργαρίτα Βιτοροπούλου για την εξαιρετική συνεργασία και υποστήριξη που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για την κατανόησή της στα διάφορα προβλήματα που αντιμετώπισα.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου που ήταν στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και τη Βασιλική και τους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου.

*Σύλλας Γεώργιος,  
Αθήνα, Ιούνιος 2022*



# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	14
Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	16
2.1 Γραφοί – Χωρικά Δίκτυα.....	16
2.1.1 Γραφοθεωρητικοί Ορισμοί .....	16
2.1.2 Χωρικά Δίκτυα (Spatial Networks) .....	18
2.1.3 Γράφοι Τομής.....	19
2.2 Σημειακές Διαδικασίες (Point Processes) .....	20
2.3 Μαθηματική Βελτιστοποίηση .....	20
2.3.1 Εισαγωγικές Έννοιες.....	20
2.3.2 Βελτιστοποίηση Πολλαπλών Κριτηρίων.....	21
2.3.3 Κυρτή και μη κυρτή βελτιστοποίηση .....	22
2.4 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	23
2.4.1 Τοποθέτηση Αισθητήρων.....	23
2.4.2 Μοντέλα Κάλυψης.....	24
2.4.3 Μοντέλα επικοινωνίας.....	25
2.4.4 WSN μοντέλο .....	25
2.4.5 Είδη Κάλυψης.....	25
2.4.6 Είδη Αίσθησης.....	26
2.4.7 Αρχιτεκτονική Αισθητήρων.....	27
2.4.8 Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (WSN) .....	28
Κεφάλαιο 3 Προβλήματα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων .....	30
3.1 Έλεγχος Τοπολογίας (Topology Control).....	30
3.2 Θέματα και προκλήσεις για την επίλυση προβλημάτων κάλυψης και συνδεσιμότητας .....	31
3.2.1 Στατικά και Κινητά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Static vs Mobile WSNs) .....	32
3.2.2 Δισδιάστατα και τρισδιάστατα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (2D vs 3D WSNs) .....	32
3.2.3 Συγκεντρωτικές και κατανεμημένες προσεγγίσεις.....	33
3.2.4 Μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου .....	33
3.2.5 Μεταβίβαση Πληροφορίας.....	33
3.3 Προσεγγίσεις για την επίλυση προβλημάτων μεγιστοποίησης κάλυψης.....	34
3.3.1 Προσεγγίσεις βασισμένες στην υπολογιστική γεωμετρία (Computational geometry based approaches) .....	34
3.3.2 Προσεγγίσεις βασισμένες σε πιθανοτικά μοντέλα τοποθέτησης αισθητήρων (Probabilistic based approaches) .....	35

3.4 Σχέση κάλυψης και επικοινωνίας.....	35
3.5 Ανίχνευση Κάλυψης.....	35
Κεφάλαιο 4 Πρόβλημα επίτευξης κάλυψης σε συνδεδεμένο δίκτυο αισθητήρων μεταβλητής ακτίνας.....	37
4.1 Το μοντέλο του Ασύρματου δικτύου αισθητήρων.....	37
4.1.1 Μοντελοποίηση του χώρου.....	37
4.1.2 Μοντελοποίηση των εμποδίων.....	37
4.1.3 Μοντελοποίηση Αισθητήρων.....	39
4.1.4 Ενεργειακό Μοντέλο.....	39
Κεφάλαιο 5 Ανάλυση του προβλήματος.....	40
5.1 Χρήσιμες Έννοιες.....	40
5.2 Ελαχιστοποίηση της ενέργειας επικοινωνίας.....	42
5.3 Ελαχιστοποίηση της ενέργειας κάλυψης.....	44
5.3.1 Μεγιστοποίηση του coverage-to-energy ratio.....	44
5.3.2 Απλοποιημένη Τυποποίηση του προβλήματος της μεγιστοποίησης του coverage to energy ratio.....	45
5.4 Κεντρικοποιημένοι Αλγόριθμοι.....	46
5.4.1 Άπληστος Κεντρικοποιημένος αλγόριθμος.....	46
5.4.2 Τυχαιοποιημένος Κεντρικοποιημένος Αλγόριθμος.....	47
5.5 Κατανεμημένος Τοπικός Αλγόριθμος.....	48
5.5.1 Γράφος εξάρτησης.....	48
5.5.2 Τοπικό κριτήριο σύγκλισης.....	49
5.5.3 Υλοποίηση Κατανεμημένου Τοπικού Αλγορίθμου.....	49
5.6 Κατανεμημένος αλγόριθμος βασισμένος σε πλέγμα.....	50
5.6.1 Διαμέριση της περιοχής ενδιαφέροντος.....	50
5.6.2 Τοπικό κριτήριο σύγκλισης.....	51
5.6.3 Υλοποίηση grid based κατανεμημένου αλγορίθμου.....	51
Κεφάλαιο 6 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	53
6.1 Μετρικές Αξιολόγησης των αλγορίθμων.....	53
6.2 Παράμετροι του συστήματος.....	54
6.3 Μελέτη Ποσοστού Κάλυψης Περιοχής ενδιαφέροντος.....	55
6.4 Μελέτη Ποσοστού Συνδεδεμένων Αισθητήρων.....	56
6.5 Αποτελέσματα μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης επικοινωνίας των αισθητήρων.....	57
6.6 Αξιολόγηση Αλγορίθμων Μείωσης Ενεργειακής Κατανάλωσης Αίσθησης.....	59
6.6.1 Λόγος Κατανάλωσης Ενέργειας Αίσθησης.....	60

6.6.2 Ποσοστό Απενεργοποιημένων Αισθητήρων .....	61
6.6.3 Διασπορά Λόγου Κατανάλωσης Ενέργειας Αίσθησης .....	62
6.6.4 Λόγος Κατανάλωσης Συνολικής Ενέργειας .....	63
6.6.5 Συγκρίσεις.....	64
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα – Επίλογος.....	67
7.1 Συμπεράσματα .....	67
7.2 Δυνατές Επεκτάσεις.....	68
Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφία.....	69

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση του ενδιαφέροντος στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSNs) [1] [2]. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του χαμηλού τους κόστους, της χαμηλής ενεργειακής τους κατανάλωσης, της ευρησιότητας τους και της προόδου και εξέλιξης των τεχνολογιών των δικτύων αυτών. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες αισθητήρες-κόμβους, οι οποίοι απαρτίζονται από πολυλειτουργικές συσκευές που περιλαμβάνουν αισθητήρια τμήματα, μονάδα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, μονάδα αποθήκευσης, μονάδα μετάδοσης δεδομένων και τροφοδοτικό.

Ένα δίκτυο αισθητήρων έχει ως στόχο την παρακολούθηση μίας δεδομένης περιοχής ενδιαφέροντος (Region of Interest - RoI) ή την επιτήρηση κάποιου συγκεκριμένου στόχου – στόχων. Ωστόσο εξαιτίας του περιορισμένου μεγέθους και της χωρητικότητας της μπαταρίας των κόμβων, οι δυνατότητες των τελευταίων για επεξεργασία δεδομένων και για επικοινωνία είναι περιορισμένες [3]. Είναι επομένως αναγκαία η χρήση και η συνεργασία πολλών κόμβων ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητοί στόχοι του WSN. Η τοποθέτηση των αισθητήρων στην περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να γίνει είτε με τυχαίο είτε με ντετερμινιστικό τρόπο. Τα συνεκτικά ασύρματα δίκτυα που προκύπτουν μπορούν να φέρουν εις πέρας πολλές και περίπλοκες διεργασίες, με αποτέλεσμα να έχουν πολλές εφαρμογές, π.χ. παρακολούθηση ως μέρος στρατιωτικών επιχειρήσεων, συνοριακός έλεγχος, επιτήρηση γεωργικών δραστηριοτήτων κ.α. [4].

Αν και η ντετερμινιστική τοποθέτηση των αισθητήρων εξασφαλίζει την επίτευξη των στόχων του δικτύου με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο (π.χ. απαιτείται μικρότερος αριθμός αισθητήρων), υπάρχουν περιπτώσεις που δεν μπορεί να εφαρμοστεί, όπως σε δυσπρόσιτες περιοχές ή ακόμα και σε περιοχές που μπορούν να εγκυμονούν κινδύνους για την ασφάλεια των ατόμων που θα τοποθετήσουν τους αισθητήρες, π.χ. πεδίο μάχης, υποθαλάσσια, ηφαίστεια κ.α. Η τοποθέτηση των αισθητήρων γίνεται τυχαία, πιθανώς με ρίψη τους από ένα αεροπλάνο, καθιστώντας δύσκολη την επαναφόρτιση/αντικατάσταση των μπαταριών των αισθητήρων. Επομένως σε αυτά τα δίκτυα ένα από τα κύρια προβλήματα είναι η βέλτιστη ενεργειακή κατανάλωση που συνεπάγεται μέγιστη διάρκεια ζωής του δικτύου, χωρίς ωστόσο να παρεμποδίζεται η ομαλή λειτουργία του. Οι δύο βασικές λειτουργίες του δικτύου είναι η αίσθηση και η επικοινωνία. Σχετίζονται άμεσα με τις έννοιες της κάλυψης του χώρου ενδιαφέροντος (ποσοστό του χώρου το οποίο καλύπτεται από τουλάχιστον έναν αισθητήρα) και της συνδεσιμότητας (ποσοστό των κόμβων του δικτύου που επικοινωνούν μεταξύ τους). Για να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του δικτύου πρέπει παράλληλα με την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας να διατηρηθούν η κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος και η διατήρηση της συνδεσιμότητας του δικτύου. Η κάλυψη του δικτύου (coverage) είναι ένα μέτρο που δείχνει πόσο αποτελεσματικά παρακολουθείται από το δίκτυο η περιοχή ενδιαφέροντος. Η συνδεσιμότητα (connectivity) είναι συνήθως βασική προϋπόθεση για κάθε αισθητήρα-κόμβο ώστε να έχει συνεισφορά στη λειτουργία του δικτύου, καθώς είναι απαραίτητη ώστε να μπορέσει ένας κόμβος να επικοινωνεί με τους γείτονές του και να μεταφέρει τα δεδομένα που συνέλεξε σε έναν κεντρικό κόμβο (data sink).

Επομένως τα WSNs χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση μίας περιοχής ενδιαφέροντος, με τη συγκέντρωση των πληροφοριών που προκύπτουν από αυτήν, να γίνεται συνήθως σε έναν κεντρικό κόμβο (data sink). Σημειώνεται λοιπόν ότι η κάλυψη

χωρίς την εγγύηση της πλήρους συνδεσιμότητας δεν είναι ωφέλιμη καθώς δεν μπορούμε να έχουμε πρόσβαση στα δεδομένα που παρατηρήθηκαν από μη συνδεδεμένους κόμβους. Θεωρείται λοιπόν βασική απαίτηση η διατήρηση της κάλυψης για τη λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου. Τα προβλήματα διατήρησης συνδεσιμότητας και κάλυψης συσχετίζονται μεταξύ τους το εξεταζόμενο δίκτυο αισθητήρων διαθέτει ρυθμιζόμενες/μεταβαλλόμενες ακτίνες αίσθησης - επικοινωνίας, μάλιστα η επιλογή αυτών των ακτίνων για τη διατήρηση της κάλυψης και της συνδεσιμότητας αναφέρεται ως έλεγχος τοπολογίας.

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στη μελέτη αποδοτικών τεχνικών ελέγχου τοπολογίας σε ασύρματα δικτυα αισθητηρων με μεγάλα πλήθη κόμβων, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεταβαλλόμενες ακτίνες αίσθησης και ακτίνες επικοινωνίας. Ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης στα ΑΔΑ, διασφαλίζοντας παράλληλα τη διατήρηση της συνδεσιμότητας των δικτύων και την πλήρη κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος από αυτά. Ως αποτέλεσμα θα μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου, ζήτημα το οποίο είναι μία από τις κύριες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα ΑΔΑ. Η μελέτη αυτή γίνεται πάνω σε μία μη κυρτή περιοχή ενδιαφέροντος – υπάρχουν αδιαφανή κυρτά εμπόδια (δεν χρειάζεται να καλυφθούν και εμποδίζουν τη συλλογή πληροφοριών από σημεία ανάμεσα στα οποία και τον αισθητήρα παρεμβάλλονται).

Η εργασία δομείται ως εξής: Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που θα Αξιοποιείται στην παρούσα εργασία (και παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες για τα Ασύρματα Δικτυα Αισθητηρων), το οποίο είναι απαραίτητο για την κατανόηση των υπόλοιπων εννοιών. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά σε προβλήματα κάλυψης και συνεκτικότητας σε ΑΔΑ. Στο Κεφάλαιο 4 δίνεται ο αυστηρός ορισμός του προβλήματος και γίνεται λεπτομερής αναφορά στη μοντελοποίηση του χώρου ενδιαφέροντος, των εμποδίων, των αισθητήρων και του ενεργειακού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί. Στο Κεφάλαιο 5 δίνονται ορισμένες ευρετικές λύσεις για το πρόβλημα, τις οποίες θα αξιολογήσουμε και θα συγκρίνουμε μεταξύ τους σε τοπολογίες με διάφορα πλήθη αισθητήρων και εμποδίων, για διάφορες μετρικές επίδοσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6 και γίνεται σχολιασμός τους. Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται μία σύνοψη της εργασίας και παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για την περαιτέρω επέκτασή της.

## Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Γραφοί – Χωρικά Δίκτυα

#### 2.1.1 Γραφοθεωρητικοί Ορισμοί

Γράφος (ή γράφημα)  $G$ , ονομάζεται ένα διατεταγμένο ζεύγος συνόλων  $(V, E)$ , όπου  $V$  είναι μη κενό σύνολο στοιχείων και  $E$  ένα σύνολο μη διατεταγμένων ζευγών του  $V$ , δηλαδή

$$E \subseteq \binom{V}{2}$$

#### *Παράδειγμα 2-1*

Εάν  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$  είναι ένα μη κενό σύνολο στοιχείων και  $E = \{\{v_1, v_2\}, \{v_1, v_3\}, \{v_4, v_5\}\}$  τότε το διατεταγμένο ζεύγος  $G = (V, E)$  είναι ένας γράφος.

Τα στοιχεία του μη κενού συνόλου  $V$  λέγονται κορυφές ή κόμβοι (vertices, nodes) του γράφου. Τα στοιχεία του συνόλου  $E$  λέγονται ακμές (edges) και μπορούν να συμβολιστούν και με ένα γράμμα π.χ.  $e = \{u, v\}, u, v \in V, u \neq v$ . Δεδομένης της συνολοθεωρητικής αυτής περιγραφής των γράφων όλοι οι αντίστοιχοι συμβολισμοί των συνόλων έχουν εφαρμογή, όπως για παράδειγμα το πλήθος των κόμβων που συμβολίζεται με  $|V|$ . Αν  $e = \{u, v\}$  είναι ακμή ενός γράφου  $G$ , αυτή ενώνει ή συνδέει τους κόμβους  $u, v$  του  $G$  και μπορεί να συμβολιστεί επίσης ως  $u_1 u_2$  ή  $u_2 u_1$ . Οι κόμβοι  $u_1, u_2$  λέγονται άκρα (endpoints) της ακμής  $e$ . Επειδή δε η ακμή  $e$  τους συνδέει, λέγονται γειτονικοί (adjacent) κόμβοι στο  $G$ .

Ο ορισμός του γράφου όπως δόθηκε παραπάνω, δεν διευκολύνει την εποπτική αντίληψη του όρου. Είναι δυνατόν και πολλές φορές επιβάλλεται, για την αναγνώριση και τη μελέτη ιδιοτήτων των γράφων, η απεικόνιση αυτών με τη βοήθεια διαγράμματος.

Για την κατασκευή του διαγράμματος, κάθε κόμβο του γράφου τον σχεδιάζουμε με ένα σημείο, μία κουκίδα και κάθε ακμή με ένα τμήμα καμπύλης γραμμής. Από τον τρόπο κατασκευής του διαγράμματος, είναι φανερό πως δεν υπάρχει μοναδικός τρόπος σχεδίασης ενός γράφου.

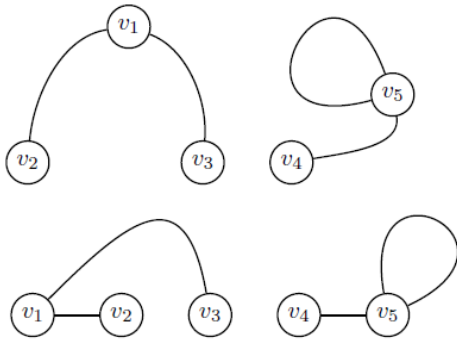
#### *Παράδειγμα 2-2*

Το διάγραμμα του γραφήματος  $G$  με

$$E = \{\{v_1, v_2\}, \{v_1, v_3\}, \{v_4, v_5\}, \{v_5, v_5\}\}$$

Μπορεί να είναι οποιοδήποτε από τα παρακάτω σχήματα.





Σχήμα 2-1: Διάγραμμα γραφήματος  $G$  με  $E = \{\{v_1, v_2\}, \{v_1, v_3\}, \{v_4, v_5\}, \{v_5, v_5\}\}$ .

### Ορισμός 2-1

Ένας γράφος  $G' = (V', E')$  είναι υπογράφος (subgraph) ενός άλλου γράφου  $G = (V, E)$ , εάν ισχύει  $V' \subseteq V$  και  $E' \subseteq E$ .

### Ορισμός 2-2

Έστω  $G' = (V', E')$  υπογράφος ενός γράφου  $G = (V, E)$ . Αν ισχύει  $V' = V$  τότε ο υπογράφος λέγεται παράγων υπογράφος (spanning subgraph) του γράφου  $G$ .

### Ορισμός 2-3

Σε ένα γράφο  $G$ , μια πεπερασμένη ακολουθία εναλλάξ κόμβων και ακμών του  $G$  που αρχίζει και τελειώνει σε κόμβο και που κάθε ακμή που περιέχεται στην ακολουθία προσπίπτει στον κόμβο που προηγείται και σε αυτήν που έπεται, λέγεται δρόμος ή διαδρομή (walk) στο  $G$ . Αν σε έναν δρόμο ενός γράφου κάθε ακμή του δρόμου εμφανίζεται μόνο μία φορά, ο δρόμος λέγεται δρομίσκος ή μονοπάτι (trail). Ένας δρόμος στον οποίο κάθε κόμβος και κάθε ακμή του εμφανίζονται ακριβώς μία φορά, λέγεται απλό μονοπάτι (path).

### Ορισμός 2-4

Έστω ένας γράφος  $G = (V, E)$ . Δύο κόμβοι  $u, v$  του  $G$  είναι συνδεδεμένες (connected) αν υπάρχει έστω ένα  $uv$  μονοπάτι στον  $G$ . Η σύνδεση 2 κόμβων στο  $G$  είναι μία σχέση ισοδυναμίας στο σύνολο  $V$  του  $G$  η οποία δημιουργεί μία διαμέριση (partition) σε κλάσεις ισοδυναμίας π.χ τις  $V_1, V_2, \dots, V_k$ . Για τις κλάσεις αυτές ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} V_i &\subseteq V, & 1 \leq i \leq k \\ V_i \cap V_j &= \emptyset, & \forall i, j \\ V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_k &= V \end{aligned}$$

Προφανώς κάθε ζεύγος κόμβων  $u, v$  συνδέονται αν και μόνο αν οι κόμβοι  $u, v$  ανήκουν στην ίδια κλάση ισοδυναμίας  $V_i$ .

### Ορισμός 2-5

Έστω ένας γράφος  $G = (V, E)$  και  $V' \subseteq V$ . Ο υπογράφος που έχει σύνολο κόμβων το  $V'$  και σύνολο ακμών  $E'$  όλες τις ακμές του  $G$ , των οποίων και τα δύο άκρα ανήκουν στο  $V'$ , λέγεται επαγόμενος υπογράφος (induced subgraph) από τον  $V'$  και συμβολίζεται  $G(V', E')$ .

### Ορισμός 2-6

Έστω ένα γράφος  $G = (V, E)$  και  $V_1, V_2, \dots, V_k$  οι κλάσεις ισοδυναμίας του  $V$  που δημιουργούνται από τη σχέση “σύνδεση δύο κόμβων”. Τα υπογραφήματα  $G[V_1], G[V_2], \dots, G[V_k]$  λέγονται συνεκτικές συνιστώσες (connected components) του γράφου  $G$ . Ο αριθμός των συνιστωσών ενός γράφου  $G$  συμβολίζεται με  $(G)$ .

### **Ορισμός 2-7**

Ένας γράφος λέγεται συνεκτικός αν αποτελείται από μία μόνο συνιστώσα. Αν ο αριθμός των συνιστωσών ενός γράφου είναι μεγαλύτερος από το ένα, ο γράφος λέγεται μη συνεκτικός. Είναι φανερό πως ένας γράφος είναι συνεκτικός, αν για κάθε ζεύγος κόμβων του γράφου υπάρχει ένα μονοπάτι τουλάχιστον, που τους συνδέει.

### **Ορισμός 2-8**

Δένδρο λέγεται ένας συνεκτικός γράφος που δεν περιέχει κύκλους.

### **Ορισμός 2-9**

Ελάχιστο Συνδετικό Δένδρο (Minimum Spanning Tree) λέγεται το ελαχίστου βάρους συνεκτικό υπογράφημα που κττει όλους τους κόμβοι ενός γράφου.

## **2.1.2 Χωρικά Δίκτυα (Spatial Networks)**

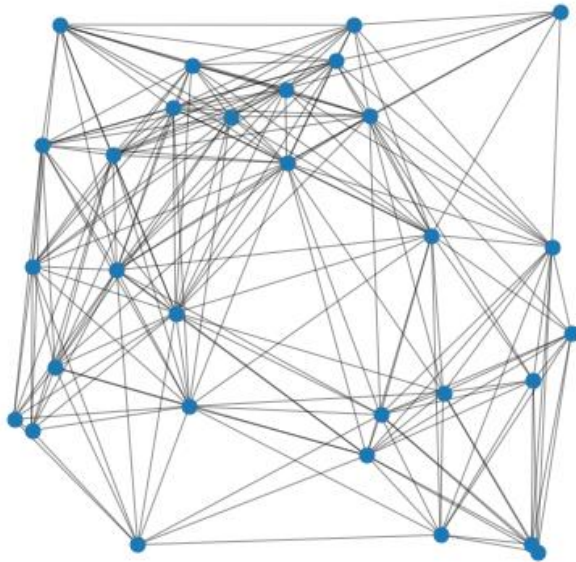
Στην εργασία μας θα ασχοληθούμε με τη μελέτη Χωρικών Δικτύων (Spatial Networks) τα οποία ορίζονται ως γράφοι των οποίων οι κόμβοι έχουν τοπολογικά χαρακτηριστικά, βρίσκονται δηλαδή σε έναν μετρικό χώρο. Η πιο συχνή περίπτωση είναι αυτή του δισδιάστατου χώρου και η νόρμα που χρησιμοποιείται είναι η Ευκλείδεια απόσταση [5]. Παραδείγματα χωρικών δικτύων περιλαμβάνουν πόλεις, δρόμους, αεροδρόμια, το διαδίκτυο, δίκτυα νευρώνων, κοινωνικά δίκτυα, δίκτυα μετάδοσης ασθeneιών. Σημειώνεται πως ο γεωμετρικός χώρος δεν χρειάζεται να είναι πάντοτε το Ευκλείδειο επίπεδο, αλλά μπορεί να είναι και μία πιο σύνθετη επιφάνεια όπως για παράδειγμα η επιφάνεια της Γης. Αρκεί να μπορεί να οριστεί η έννοια της απόστασης. Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρουν γράφοι των οποίων οι κόμβοι βρίσκονται στο  $R^2$  ενώ οι ακμές ενώνουν τα σημεία αυτά, επομένως ο καθορισμός ενός μέτρου απόστασης ή βάρους είναι εύκολος. Ορίζεται ως το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος που τα ενώνει. Όσον αφορά την αναπαράσταση των χωρικών δικτύων τρία από τα πιο απλά και συνήθη μοντέλα περιγραφής χωρικών δικτύων είναι [6]:

- Διαγράμματα Voronoi (3.3.1)
- Τυχαίοι Γεωμετρικοί Γράφοι (Random Geometric Graphs – RGG)
- Γράφοι Waxman: Παραλλαγή των Gilbert-Erdos-Renyi (GER) Random Graphs – Waxman 1988. Ο GER random graph συνδέει ή όχι κάθε κόμβων βάσει μίας σταθερής πιθανότητας. Στον Waxman γράφο, οι ακμές ανάμεσα σε κόμβους που βρίσκονται μακριά ο ένας από τον άλλον κοστίζουν παραπάνω για να δημιουργηθούν, κάνοντας την ύπαρξή τους πιο απίθανη [7].

Οι γεωμετρικοί γράφοι παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς είναι αρκετά εύρηστοι και έχουν πολλές εφαρμογές. Οι γράφοι αυτοί κατασκευάζονται από ένα σύνολο κόμβων που βρίσκονται στο επίπεδο και από ένα σύνολο ακμών που κατασκευάζονται με κάποια γεωμετρική συνθήκη. Διακρίνονται σε ντετερμινιστικούς όπου υπάρχει ένας σαφής κανόνας για το πως κατανέμονται ακμές και κόμβοι και σε

τυχαίους όπου τόσο οι θέσεις των κόμβων όσο και οι ακμές περιλαμβάνουν κάποια τυχαιότητα. Ο τυχαίος γεωμετρικός γράφος (Random Geometric Graph) ορίζεται συνδέοντας με ακμές όλα τα ζεύγη κόμβων που έχουν ευκλείδεια απόσταση μικρότερη από  $R$ , όπου το  $R$  είναι παράμετρος του μοντέλου. Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την ερμηνεία αυτού του μοντέλου είναι να ληφθεί υπόψιν ότι κάθε κόμβος  $i$  έχει μία ακτίνα επιρροής  $R$ , η οποία καθορίζει ένα δίσκο με κέντρο τον κόμβο  $i$ . Με οποιοδήποτε άλλο κόμβο βρίσκεται μέσα σε αυτήν την ακτίνα επιρροής δημιουργείται μία σύνδεση, που αναπαρίσταται με μία ακμή που ενώνει τους δύο κόμβους.

Random Geometric Graph



Σχήμα 2-2: Παράδειγμα ενός τυχαίου γεωμετρικού γραφήματος.

### 2.1.3 Γράφοι Τομής

Έστω μία οικογένεια συνόλων  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ . Εάν η οικογένεια αυτή εκφράζει τους κόμβους ενός γράφου ενώ δύο κόμβοι έστω  $v_i$  και  $v_j$  ενώνονται από μία ακμή η τομή των αντίστοιχων συνόλων είναι μη κενή (δεν επιτρέπονται οι ανακυκλώσεις) :

$$E = \{\{S_i, S_j\} | (i \neq j) \wedge (S_i \cap S_j \neq \emptyset)\}$$

Αν και ο παραπάνω ορισμός είναι κάπως γενικός, οι γράφοι τομής (intersection graphs) έχουν πολλές εφαρμογές όπως γράφοι διαστημάτων (interval graphs -  $S$  είναι ένα σύνολο διαστημάτων σε μία γραμμή πραγματικών αριθμών), γράφοι μετάθεσης (permutation graphs -  $S$  είναι το σύνολο των τμημάτων γραμμών ανάμεσα σε δύο άλλα τμήματα), οι γράφοι δίσκων (disk graphs -  $S$  είναι το σύνολο που αντιστοιχεί σε κύκλους σε ένα επίπεδο), κ.α. [8]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι γράφοι μοναδιαίων δίσκων (Unit Disk Graphs), οι οποίοι έχουν μία πολύ φυσική περιγραφή από γράφους τομής βασισμένους σε δίσκους και τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε για να εκφράσουμε την ορατότητα των αισθητήρων. Ορίζονται ως δίσκοι με ακτίνα 1 μονάδας μέτρησης. Μπορούν να αναπαρασταθούν (στο επίπεδο) με τους παρακάτω τρόπους:

- Σε μοντέλα τομής οι κόμβοι του γράφου αντιστοιχούν σε μοναδιαίους δίσκους στο επίπεδο οι οποίοι ενώνονται με μία ακμή αν και μόνο αν οι αντίστοιχοι δίσκοι τέμνονται.
- Οι κόμβοι αντιστοιχούν σε σημεία του επιπέδου με δύο κόμβους να είναι γείτονες αν και μόνο αν η απόστασή τους είναι μικρότερη από την μονάδα [8].

## 2.2 Σημειακές Διαδικασίες (Point Processes)

Οι σημειακές διαδικασίες περιγράφουν διαδικασίες ή αλλιώς γεννήτορες τυχαίων μοτίβων σημειακών αντικειμένων. Μία σημειακή διαδικασία σε μία διάσταση είναι ένα χρήσιμο μοντέλο για την ακολουθία των τυχαίων χρόνων που συμβαίνει ένα συγκεκριμένο γεγονός. Μία σημειακή διαδικασία σε δύο και παραπάνω διαστάσεις λέγεται, χωρική σημειακή διαδικασία (spatial point process) και είναι ένα χρήσιμο μοντέλο την αναπαράσταση ενός τυχαίου μοτίβου στον  $d$ -διάστατο χώρο ( $d \geq 2$ ) [9]. Στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσουν σημειακές διαδικασίες στον  $\mathbb{R}^2$ . Δύο βασικές σημειακές διαδικασίες οι οποίες σχετίζονται μεταξύ τους είναι οι περιπτώσεις των Poisson Point Process και της Binomial Point Process. Η σημειακή διαδικασία Poisson (Poisson Point Process - PPP) με ομοιόμορφη πυκνότητα  $\beta > 0$ , που εκφράζει τον μέσο αριθμό σημείων που εμφανίζονται σε κάθε μονάδα χώρου, ορίζεται ως μία σημειακή διαδικασία στο δισδιάστατο χώρο ώστε για κάθε φραγμένο κλειστό σύνολο  $B$  ο αναμενόμενος αριθμός σημείων θα είναι μία κατανομή Poisson με μέσο  $\beta \cdot \lambda(B)$  όπου  $\lambda(B)$  το εμβαδόν της περιοχής  $B$ . Στην Binomial Point Process (BPP) είναι δεδομένο το πλήθος των σημείων,  $n$ , και αυτά κατανομούνται με ομοιόμορφο τρόπο στο χώρο ενδιαφέροντος, σε αντιπαράθεση με την περίπτωση του PPP όπου το πλήθος των σημείων είναι τυχαία μεταβλητή. Με δεσμευμένο το πλήθος των σημείων η PPP ταυτίζεται με την BPP.

Μπορεί κανείς να καταλήξει σε νέες διαδικασίες με απεικονίσεις (mapping) με τη χρήση συναρτήσεων, εκλεπτύνσεις (thinning) - διαγραφή κάποιων σημείων της διαδικασίας και την επιλογή ενός υποσυνόλου, υπερθέσεις (superposition) όπου χρησιμοποιούνται πάνω από μία διαδικασίες και τα σημεία τους για να λάβουμε το σύνολο των σημείων μίας νέας διαδικασίας και η ομαδοποίηση (clustering) όπου χρησιμοποιούμε τα σημεία μίας διαδικασίας ως κέντρα γύρω από τα οποία δημιουργούνται ομάδες σημείων (clusters) μέσω μίας δεύτερης διαδικασίας.

## 2.3 Μαθηματική Βελτιστοποίηση

### 2.3.1 Εισαγωγικές Έννοιες

Η μαθηματική βελτιστοποίηση (mathematical optimization) αναφέρεται στη διαδικασία με την οποία γίνεται η εύρεση/επιλογή των καταλληλότερων παραμέτρων/μεταβλητών ώστε να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί μία ζητούμενη ποσότητα/κριτήριο. Ένα πρόβλημα μαθηματικής βελτιστοποίησης έχει τη μορφή [10]

$$\begin{aligned} & \text{minimize maximize } f_0(x) \\ & \text{subject to } g_i(x) \leq b_i, i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

Όπου το διάνυσμα  $x = (x_1, \dots, x_n)$  είναι η μεταβλητή βελτιστοποίησης, η συνάρτηση  $f_0: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , αποκαλείται αντικειμενική συνάρτηση (objective function), οι συναρτήσεις  $g_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, m$  είναι οι συναρτήσεις περιορισμών (constraint functions) και οι σταθερές  $b_1, \dots, b_m$  είναι τα όρια των περιορισμών. Ένα διάνυσμα  $x^*$  λέγεται βέλτιστο ή λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης εάν για αυτό η

αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τη μικρότερη/μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με κάθε άλλο διάνυσμα που ικανοποιεί τους περιορισμούς:

$$\forall z \text{ όπου } f(z_1) \leq b_1, \dots, f(z_m) \leq b_m$$

έχουμε  $f_0(z) \geq f_0(x^*)$  ή  $f_0(z) \leq f_0(x^*)$  αντίστοιχα.

### 2.3.2 Βελτιστοποίηση Πολλαπλών Κριτηρίων

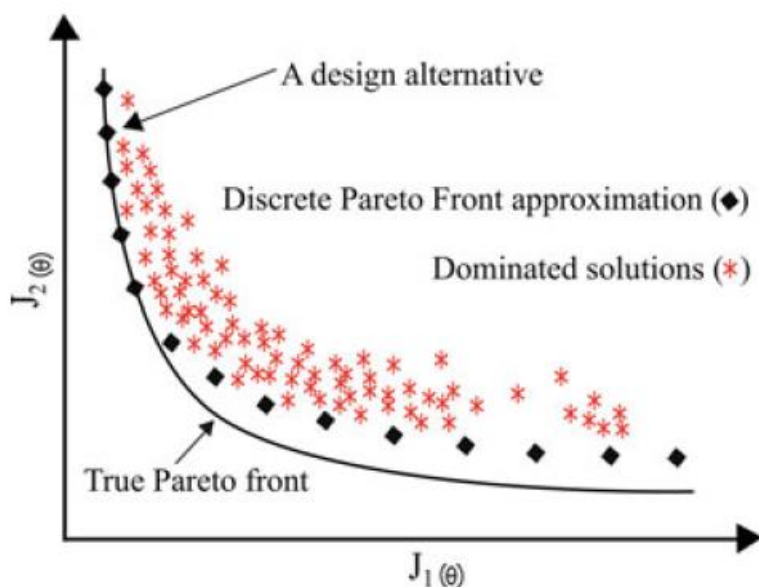
Πέρα από τη βελτιστοποίηση μιας μόνο ποσότητας υπάρχουν διάφορα προβλήματα στα οποία είναι ζητούμενο να ελαχιστοποιηθούν/μεγιστοποιηθούν παραπάνω από μία ποσότητες. Έτσι έχουμε [11]

$$\begin{aligned} & \text{minimize maximize } f_i(x), \quad i = 1, \dots, n \\ & \text{subject to } g_i(x) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

Δεδομένου ότι τα παραπάνω κριτήρια συχνά δεν μπορούν να συγκριθούν και η σημαντικότητα του ενός σε σχέση με του άλλου δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, δεν μπορούμε να αποφασίσουμε ποια λύση είναι καλύτερη ανάμεσα σε δύο με προφανή τρόπο (απουσία εγγενούς διάταξης). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υιοθέτηση της μη επικρατούσας βελτιστοποίησης ώστε να βρεθούν κάποιες λύσεις που είναι ίσης κατάταξης με τη βέλτιστη, με την έννοια ότι καμία άλλη λύση δεν είναι εγγενώς καλύτερη από αυτές που θεωρήσαμε προηγουμένως. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται ως βελτιστοποίηση Pareto. Ως Pareto βέλτιστη θεωρείται μία λύση εάν ανήκει στο σύνολο λύσεων έξω από το οποίο δεν είναι δυνατόν να βρεθεί άλλη λύση τέτοια ώστε να βελτιωθεί η τιμή μίας αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς να χειροτερέψει κάποιας άλλης. Για παράδειγμα σε μία βελτιστοποίηση δύο κριτηρίων έστω ότι τα κριτήρια λαμβάνουν αντίστοιχα τις τιμές  $x_1$  και  $y_1$ . Εάν μπορούμε να βελτιώσουμε το ένα από αυτά, έστω το  $x_1$  σε μία καλύτερη τιμή  $x_2$  χωρίς την μεταβολή του δευτέρου κριτηρίου, τότε διαλέγουμε, χωρίς αμφιβολία την λύση  $x_2$  και  $y_1$ . Η δεύτερη λύση επικρατεί έναντι της πρώτης (dominate). Εάν καταλήξουμε σε μία λύση, από την οποία δεν μπορούμε να βελτιώσουμε την τιμή μίας αντικειμενικής συνάρτησης, χωρίς να χειροτερέψει η τιμή κάποιας άλλης, τότε, σύμφωνα και με τον παραπάνω ορισμό, έχουμε βρει μία Pareto βέλτιστη λύση. Το μέτωπο Pareto αντιπροσωπεύει το σύνολο των λύσεων αυτών και εάν θεωρήσουμε  $m$  κριτήρια με πιθανές λύσεις  $X \subseteq R^n$  και τιμές αντικειμενικής συνάρτησης  $Y \subseteq R^m$ , ένα σημείο  $y''$  είναι εγγενώς καλύτερο από ένα άλλο  $y'$ , το συμβολίζουμε ως  $y'' > y'$  και το μέτωπο Pareto ορίζεται:

$$P(Y) = \{y' \in Y: \{y'' \in Y: y'' > y', y'' \neq y'\} = \emptyset\}$$

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τόσο όλες οι πιθανές λύσεις ενός προβλήματος βελτιστοποίησης δύο κριτηρίων, όσο και το μέτωπο Pareto. Οι λύσεις με κόκκινο απεικονίζουν τις Pareto optimal λύσεις, αυτές δηλαδή που δεν γίνονται strictly dominate από καμία άλλη.



Σχήμα 2-3: Διάγραμμα απεικόνισης μετώπου Pareto (Pareto front). Μεταξύ των μαύρα χρωματισμένων λύσεων δεν υπάρχει προφανής επιλογή – είναι όλες επιτρεπτές [12]

### 2.3.3 Κυρτή και μη κυρτή βελτιστοποίηση

Γενικά μελετάμε τα προβλήματα βελτιστοποίησης χωρισμένα σε διάφορες κλάσεις, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Για παράδειγμα, εάν οι συναρτήσεις αυτές είναι γραμμικές, δηλαδή [10]

$$f_i(\alpha x + \beta y) = \alpha f_i(x) + \beta f_i(y) \quad \forall x, y \in R^n \text{ και } \alpha, \beta \in R$$

τότε λέμε ότι έχουμε ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, ενώ εάν είναι μη-γραμμικές τότε λέμε ότι έχουμε ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ένας διαχωρισμός με περισσότερο ενδιαφέρον είναι αυτός ανάμεσα σε κυρτά και μη κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης.

Σε ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης η αντικειμενική συνάρτηση και οι constraint functions είναι κυρτές, δηλαδή ικανοποιούν την παρακάτω σχέση.

$$f_i(\alpha x + \beta y) \leq \alpha f_i(x) + \beta f_i(y) \quad \forall x, y \in R^n \text{ και } \alpha, \beta \in R \text{ με } \alpha + \beta = 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0$$

Η κυρτότητα είναι όπως βλέπουμε πιο γενική από τη γραμμικότητα και κάθε γραμμικό πρόβλημα είναι και κυρτό. Επομένως η κυρτότητα είναι μια γενίκευση της γραμμικότητας. Για την επίλυση κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης υπάρχουν πολύ αποτελεσματικές μέθοδοι. Μπορούμε σε ένα κυρτο πρόβλημα να ακολουθήσουμε μία τοπικά βέλτιστη λύση (local optimum) για να καταλήξουμε σε μία ολική βέλτιστη λύση (global optimum). Όταν έχουμε μία αναλυτική μορφή αρκεί να ακολουθήσουμε την κατεύθυνση της κλίσης (gradient), για προβλήματα μεγιστοποίησης, ώστε να καταλήξουμε σε ολικό ακρότατο. Η πρόκληση στην κυρτή βελτιστοποίηση είναι η αναγνώριση του πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πρόβλημα καθώς και η διατύπωσή της.

Αντίθετα σε ένα μη κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης η παραπάνω σχέση δεν ισχύει και δεν εφαρμόζονται οι τρόποι επίλυσης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων δεν είναι αποτελεσματικές όπως στην περίπτωση των κυρτών προβλημάτων και απαιτούν κάποιο συμβιβασμό. Σύνηθες είναι να γίνεται μία τοπική βελτιστοποίηση, κάτι που σημαίνει ότι επιλέγεται μία πιθανή λύση που βρίσκει τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για σημεία σε μία περιοχή, αλλά όχι σε όλο το σύνολο των πιθανών λύσεων, γι αυτό διατυπώνονται ευρετικές μέθοδοι και προσεγγιστικοί αλγόριθμοι, που θα χρησιμοποιηθούν και στην επίλυση του παρόντος προβλήματος. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μη κυρτών προβλημάτων γίνεται εξαντλητική αναζήτηση του ολικού βέλτιστου, κάτι το οποίο όμως έχει πολύ μεγάλο κόστος και χαμηλή απόδοση. Έχει νόημα να επιλεγθούν τέτοιες μέθοδοι μόνο στην περίπτωση που είναι πολύ σημαντικό να βρεθεί το ολικό ακρότατο, όπως οι περιπτώσεις worst case analysis ή η επιβεβαίωση της ασφάλειας ενός κρίσιμου συστήματος.

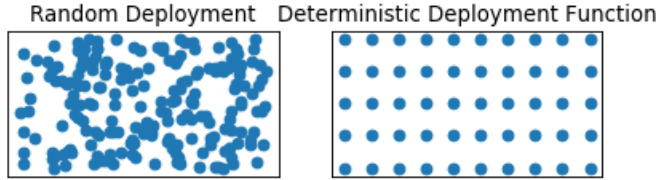
## 2.4 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks) είναι ασύρματα δίκτυα που αποτελούνται από μεγάλο αριθμό καταναμημένων συσκευών (κόμβων) που είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες (όργανα που μετρούν ποσότητες στο περιβάλλον τους) έτσι ώστε να μπορούν να παρακολουθούν φυσικά ή περιβαλλοντικά φαινόμενα. Συνήθως ένας μεγάλος αριθμός κόμβων τοποθετείται με τυχαίο ή ντετερμινιστικό τρόπο σε μία περιοχή ώστε να δημιουργηθεί ένα πυκνό και συνδεδεμένο δίκτυο. Παρακολουθούν την περιοχή στην οποία τοποθετούνται, την περιοχή ενδιαφέροντος (Region Of Interest), συλλέγουν τα δεδομένα από τα υπό παρακολούθηση γεγονότα και βρίσκουν ένα μονοπάτι ώστε να φτάσουν τα δεδομένα στον κόμβο στόχο. Αυτές οι συσκευές λειτουργούν αυτόνομα και επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας πληροφορίες και δεδομένα. Για παράδειγμα πληροφορίες για το περιβάλλον όπως θερμοκρασία, πίεση, υγρασία ή ρύποι στέλνονται σε έναν σταθμό-βάση ο οποίος στέλνει τις πληροφορίες σε ένα άλλο ενσύρματο δίκτυο ή ενεργοποιεί έναν συναγερμό ή εκτελεί κάποια άλλη ενέργεια, ανάλογα με το είδος και το μέγεθος των δεδομένων που παρακολουθούνται. Η κύρια ίσως πρόκληση που συναντάται στα δίκτυα αυτά είναι η κάλυψη ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος. Τα δύο πιο θεμελιώδη ζητήματα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η κάλυψη και η συνδεσιμότητα, τα οποία έχουν μεγάλη επίδραση και στην απόδοση και αποτελεσματικότητά τους. Η στοχευμένη τοποθέτηση των αισθητήρων, ο χρονοπρογραμματισμός των αισθητήρων και η μεταβολή - προσδιορισμός των ακτινών αίσθησης και επικοινωνίας των αισθητήρων μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα όχι μόνο την μείωση του κόστους λειτουργίας τέτοιων δικτύων αλλά και την αύξηση της διάρκειας ζωής τους [13].

### 2.4.1 Τοποθέτηση Αισθητήρων

Η τοποθέτηση των αισθητήρων γίνεται, είτε με ντετερμινιστικό είτε με τυχαίο τρόπο. Η ντετερμινιστική ανάπτυξη του δικτύου τοποθετεί τους κόμβους σε συγκεκριμένα σημεία μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος, χωρίζοντάς την με κανονική (π.χ. σε τετράγωνα, τρίγωνα, εξάγωνα) διάταξη ή μη κανονική [14]. Σε εφαρμογές που επιτρέπουν την ντετερμινιστική τοποθέτηση των κόμβων, μπορούν οι θέσεις τους να υπολογιστούν κατάλληλα ώστε να είναι βέλτιστες με κάποιο κριτήριο όπως το

επιθυμητό επίπεδο κάλυψης, η συνδεσιμότητα, η ελαχιστοποίηση του κόστους του δικτύου κ.α. Η τυχαία τοποθέτηση επιλέγεται σε περιπτώσεις όπου η τοποθέτηση των αισθητήρων σε προκαθορισμένες θέσεις δεν είναι εφικτή, Αυτό μπορεί να συμβεί είτε σε περιοχές οι οποίες είναι δυσπρόσιτες και εγκυμονούν κινδύνους για τον άνθρωπο λόγω ακραίων περιβαλλοντικών φαινομένων (σε ένα ηφαίστειο, υποθαλάσσια) είτε σε εχθρικές περιοχές που η πρόσβαση είναι περιορισμένη. Για παράδειγμα, με τη χρήση εναέριου μέσου ρίχνονται αισθητήρες στον κρατήρα ενός ηφαιστείου και γύρω από αυτόν ώστε να παρατηρείται η λειτουργία του. Η αντιμετώπιση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη διαμέριση της περιοχής ενδιαφέροντος σε πυκνά καλυμμένες και σε περιοχές με αραιή κάλυψη απο το δικτυο αισθητηρων.



Σχήμα 2-4: Τοποθέτηση αισθητήρων στο χώρο τυχαία και ντετερμινιστικά.

## 2.4.2 Μοντέλα Κάλυψης

Τα μοντέλα κάλυψης (coverage models) μετρούν την ικανότητα παρακολούθησης των γεγονότων που συμβαίνουν στην περιοχή ενδιαφέροντος Region of Interest (RoI). Δύο βασικά μοντέλα κάλυψης απαντώνται στη βιβλιογραφία [14] , [15]. Το πρώτο είναι το μοντέλο δυαδικού δίσκου (Binary Disk Model) που είναι ένα είδος Boolean μοντέλου, στο οποίο η πιθανότητα ανίχνευσης ενός συμβάντος είναι 1 εντός του εύρους ανίχνευσης  $R_s$  του κόμβου-αισθητήρα και διαφορετικά 0. Μαθηματικά το μοντέλο αυτό αναπαρίσταται ως εξής:

$$p(s_i, P) = \begin{cases} 1, & d(s_i, P) \leq R_s \\ 0, & d(s_i, P) > R_s \end{cases}$$

όπου  $p(s_i, P)$  είναι η πιθανότητα ένα σημείο P να μπορεί να γίνει αισθητό από έναν αισθητήρα  $s_i$  και  $d(s_i, P)$  είναι η απόσταση ανάμεσα στο σημείο P και τον αισθητήρα  $s_i$ . Όμως το μοντέλο του δυαδικού δίσκου είναι πολύ απλό για να καταφέρει να αποδώσει όλα τα περίπλοκα χαρακτηριστικά του αληθινού κόσμου. Για να μπορέσουμε να ξεπεράσουμε τις αδυναμίες του, προτείνεται ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο, το πιθανοτικό μοντέλο κάλυψης, το οποίο λαμβάνει υπόψιν την αβεβαιότητα στην ικανότητα ανίχνευσης του αισθητήρα και μπορεί να αναπαρασταθεί ως εξής:

$$p(s_i, P) = \begin{cases} 1, & d(s_i, P) \leq R_s - R_e \\ e^{-\omega \alpha^\beta}, & R_s - R_e < d(s_i, P) \leq R_s + R_e \\ 0, & d(s_i, P) > R_s + R_e \end{cases}$$

όπου  $\alpha = d(s_i, P) - (R_s - R_e)$  ω και β είναι παράμετροι που επηρεάζουν την πιθανότητα ανίχνευσης όταν ένα σημείο βρίσκεται στο διάστημα  $[R_s - R_e, R_s + R_e]$ , όπου  $R_e$  ένας οποιοσδήποτε θετικός αριθμός και  $R_s - R_e \geq 0, R_s + R_e \leq R_{max}$ . Βέβαια ακόμα και το μοντέλο αυτό είναι πολύ ιδανικό για να μπορέσει να λάβει υπόψιν



όλες τις παραμέτρους του αληθινού κόσμου, αφού πάλι θεωρείται ότι η περιοχή αίσθησης ενός κόμβου είναι ένας δίσκος. Η περιοχή αυτή σε πραγματικές συνθήκες επηρεάζεται από διάφορα πράγματα όπως εμπόδια και καιρικές συνθήκες και το σχήμα της μπορεί να μεταβάλλεται.

### 2.4.3 Μοντέλα επικοινωνίας

Στο παρόν επιλέγεται το το μοντέλο δυαδικού δίσκου για τη μοντελοποίηση της επικοινωνίας των κόμβων [15]. Όπως και στην περίπτωση του αντίστοιχου μοντέλου κάλυψης, κάθε αισθητήρας μπορεί να επικοινωνήσει με όποιους αισθητήρες βρίσκονται σε απόσταση, έστω  $R_t$ , μικρότερη ή ίση από αυτόν, η οποία ορίζεται ως η ακτίνα επικοινωνίας του αισθητήρα. Οι αισθητήρες μπορούν να διαφοροποιούν τις ακτίνες  $R_t$ , διαφοροποιώντας ανάλογα την ενεργειακή τους κατανάλωση. Είναι αναγκαίο για την ομαλή λειτουργία του δικτύου να είναι συνδεδεμένο, επομένως πρέπει να διασφαλίζεται ότι κάθε ενεργός αισθητήρας βρίσκεται εντός της ακτίνας επικοινωνίας ενός ή παραπάνω ενεργών αισθητήρων.

### 2.4.4 WSN μοντέλο

Συνήθως για τη μοντελοποίηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων χρησιμοποιούνται γράφοι. Ιδιαίτερα η περίπτωση των τυχαίων γεωμετρικών γράφων έχει πολλές τοπολογικές ομοιότητες με τα WSN με τυχαία τοποθέτηση. Ένα WSN μοντελοποιείται από ένα γράφο  $G(V, E, r)$  που είναι  $V$  το σύνολο των αισθητήρων, και το είναι  $r$  μία προκαθορισμένη τιμή (π.χ. μέγιστη ακτίνα επικοινωνίας) που καθορίζει το σύνολο των ακμών  $E$ . Ο επαγόμενος γράφος επικοινωνίας του ορίζεται αντίστοιχα  $G_c(V, E_c, r_c)$  με  $r_c$  την μέγιστη ακτίνα επικοινωνίας κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει ακμή ανάμεσα σε δύο κόμβους μόνο εάν η Ευκλείδεια απόστασή τους είναι μικρότερη ή ίση με τις ακτίνες επικοινωνίας τους. Το δίκτυο που αναπαρίσταται από έναν επαγόμενο γράφο επικοινωνίας θεωρείται συνδεδεμένο μόνο εάν στον  $G_c$  υπάρχει για κάθε ζευγάρι κόμβων ένα μονοπάτι που να τους συνδέει.

### 2.4.5 Είδη Κάλυψης

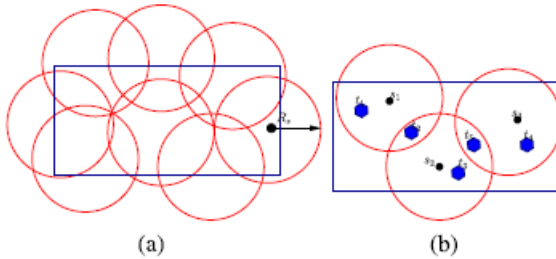
Όπως έχουμε πει τα WSN χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση ενός RoI. Η επίτευξη της επιθυμητής κάλυψης για το RoI είναι η επαρκής προϋπόθεση για την επίτευξη του στόχου αυτού. Ως κάλυψη ορίζεται: εάν ένα οποιοδήποτε σημείο στο RoI βρίσκεται εντός της ακτίνας αίσθησης από έναν συγκεκριμένο αριθμό κόμβων-αισθητήρων. Το πρόβλημα της επίτευξης της κάλυψης έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον από την ερευνητική κοινότητα και έχουν προταθεί πολλές προσεγγίσεις. Στρατηγικές τοποθέτησης κόμβων για την επίτευξη της επιθυμητής κάλυψης και σχήματα χρονοπρογραμματισμού των κόμβων για την παράταση της διάρκειας της ζωής των WSN με παράλληλη διατήρηση της κάλυψης, κ.α.

Σημαντικό είναι να αναγνωρίσουμε τους στόχους της κάλυψης που πρέπει να ανιχνευθούν/παρακολουθηθούν σε ένα RoI, έτσι ώστε να μπορέσουμε να παρατάξουμε αποτελεσματικά το WSN. Με βάση τους διάφορους στόχους κάλυψης έχουμε έτσι την παρακάτω κατηγοριοποίηση των διαφόρων προβλημάτων κάλυψης [14] :

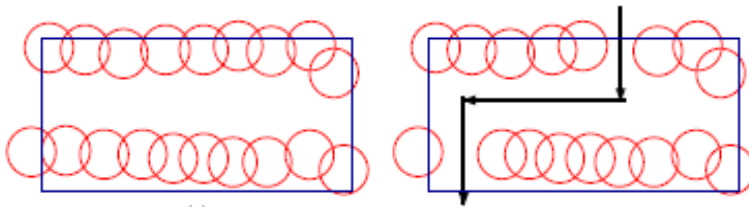
- Πλήρης κάλυψη (blanket coverage): ολόκληρη η περιοχή του RoI πρέπει να βρίσκεται υπό αυστηρή επιτήρηση, πράγμα που σημαίνει ότι οποιοδήποτε

σημείο στο RoI θα πρέπει να ανιχνεύεται από  $n$  τουλάχιστον κόμβους αισθητήρων ( $n$ -coverage problem).

- Κάλυψη στόχων (target coverage): σε αντίθεση με την πλήρη κάλυψη, απαιτείται μόνο η παρακολούθηση συγκεκριμένων σημείων στόχων (targets) σε μία δεδομένη περιοχή. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική κάλυψη υιοθετείται πάντα ένας ντετερμινιστικός τρόπος για την τοποθέτηση των κόμβων-αισθητήρων.
- Κάλυψη διαδρομής (path/barrier coverage): μία συγκεκριμένη περίπτωση κάλυψης όπου όλα τα σημεία ενδιαφέροντος βρίσκονται σε μία διαδρομή.



Σχήμα 2-5: (a) Blanket Coverage (b) Target Coverage [14]



Σχήμα 2-6: Path/Barrier Coverage [14]

## 2.4.6 Είδη Αίσθησης

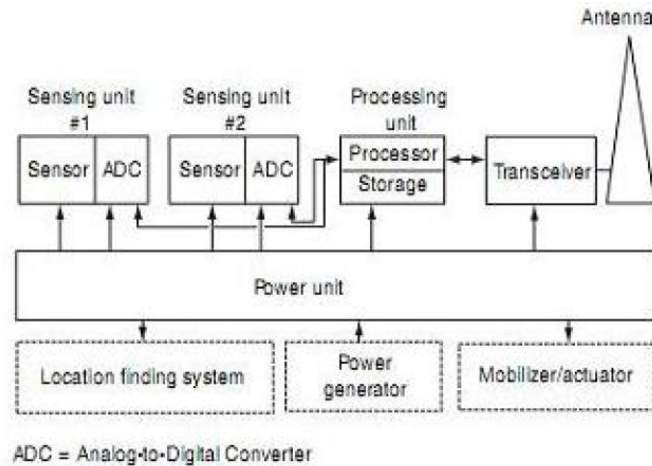
Το είδος της τοπικής πληροφορίας που συλλέγεται μπορεί να είναι σημειακή, δηλαδή ένας κόμβος τοποθετημένος σε ένα σημείο να συλλέγει πληροφορία για το συγκεκριμένο αυτό σημείο. Συνήθως όμως το ζητούμενο δεν είναι να εξάγουμε συμπεράσματα για τον πεπερασμένο αριθμό των σημείων από τα οποία συλλέγουν οι κόμβοι πληροφορία αλλά με τη χρήση αυτών να βγουν συμπεράσματα για ολόκληρο το χώρο ενδιαφέροντος. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την υπόθεση της ύπαρξης μίας κάποιας χωρικής ή χρονικής συσχέτισης με τα γειτονικά σημεία.

Μια διαφορετική κατηγορία αισθητήρων από αυτήν των σημειακών μπορεί να θεωρηθεί αυτή, στην οποία, ο κόμβος θα συλλέγει πληροφορία σε μία περιοχή κοντά στη σημείο στο οποίο είναι τοποθετημένος.

## 2.4.7 Αρχιτεκτονική Αισθητήρων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) αποτελείται από πολλούς κόμβους, οι οποίοι μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους. Οι κόμβοι(αισθητήρες), το δομικό στοιχείο των WSN αποτελούνται τόσο από Hardware όσο και από Software.

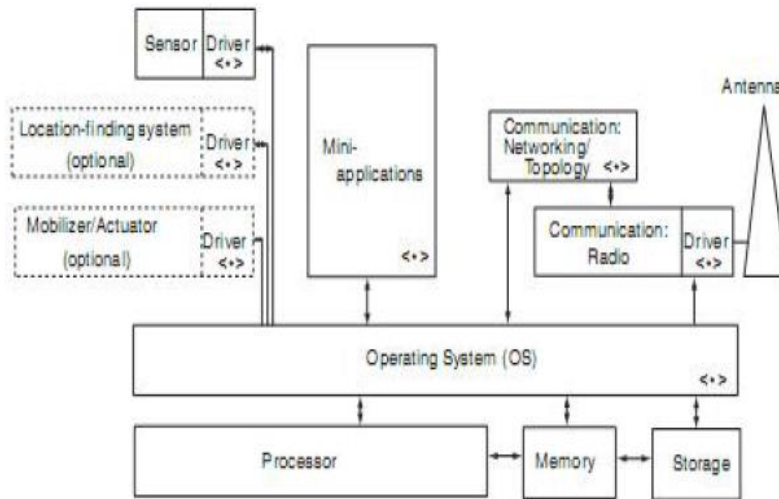
Το hardware ενός κόμβου περιλαμβάνει συνήθως τα παρακάτω κομμάτια:



Σχήμα 2-7: Hardware architecture of a Wireless Sensor Network node. [16]

- Μονάδα ανίχνευσης: αλληλεπιδρά με τον φυσικό κόσμο γύρω από τον κόμβο. Βασικό χαρακτηριστικό της είναι η εμβέλεια αίσθησης η οποία ορίζεται ως η μέγιστη απόσταση από τον κόμβο από την οποία μπορεί να συλλέξει δεδομένα. Συνήθως το σχήμα της περιοχής, από την οποία ένας κόμβος συλλέγει δεδομένα, είναι ενός δίσκου, η ακτίνα του οποίου είναι ίση με την εμβέλεια αίσθησης των αισθητήρων (θα αναφέρεται ως ακτίνα αίσθησης). [14]
- Μονάδα επεξεργασίας: αλληλεπιδρά με τα διάφορα μέρη του κόμβου και εκτελεί το αντίστοιχο λογισμικό [14]. Οι κόμβοι έχουν διάφορους τύπους μικροεπεξεργαστών—με βάση τα καθήκοντά τους, όπως μικροελεγκτές, επεξεργαστές επικοινωνίας και ενσωματωμένα κυκλώματα για ειδικές εφαρμογές και ειδικές εργασίες.
- Μονάδα αποθήκευσης: έχουν σχετικά μικρές μονάδες αποθήκευσης χαμηλού κόστους. Αποθηκεύουν σύνολο εντολών και αισθητηριακά δεδομένα. Συνήθως αποτελούνται από μνήμη τυχαίας πρόσβασης (RAM), μνήμη μόνο για ανάγνωση (ROM), στατική μνήμη τυχαίας πρόσβασης (SRAM) και μη πτητική μνήμη.
- Μονάδα επικοινωνίας: είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση και την λήψη εντολών και πακέτων δεδομένων.
- Πηγή ενέργειας: Συνήθως μία μικρή μπαταρία. Η πεπερασμένη ισχύς της είναι πιθανό να είναι το bottleneck στις περισσότερες εφαρμογές WSN.

Οι εφαρμογές λογισμικού ενός κόμβου χωρίζονται συνήθως στα παρακάτω υποσυστήματα:



Σχήμα 2-8: Software architecture of a Wireless Sensor Network node. [16]

- Λειτουργικό Σύστημα (Operating System Microcode): αναφέρεται επίσης ως middleware. Αντιπροσωπεύει τον κώδικα που χρησιμοποιείται από λογισμικό υψηλού επιπέδου για την υποστήριξη ποικίλων λειτουργιών.
- Sensor Drivers: μονάδες λογισμικού που διαχειρίζονται βασικές λειτουργίες των αισθητήρων.
- Οι επεξεργαστές επικοινωνίας: διαχειρίζονται τις λειτουργίες επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένης της δρομολόγησης, της αποθήκευσης και προώθησης πακέτων, τη διατήρηση της τοπολογίας και της κρυπτογράφησης.
- Communication Drivers: Αυτές οι μονάδες λογισμικού ρυθμίζουν τις λεπτομέρειες των συνδέσεων μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένου του χρονισμού και του συγχρονισμού, της κωδικοποίησης του σήματος, της ανάκτησης και μέτρησης bit και της διαμόρφωσης σήματος.
- Mini-εφαρμογές επεξεργασίας δεδομένων: Βασικές εφαρμογές όπως επεξεργασία δεδομένων, αποθήκευση τιμής ενός σήματος και διάφοροι χειρισμοί. Υποστηρίζονται στο επίπεδο κόμβου για επεξεργασία εντός δικτύου.

#### 2.4.8 Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (WSN)

Μία ειδική περίπτωση των WSN μπορούν να θεωρηθούν τα Οπτικά Δίκτυα Αισθητήρων (Visual Sensor Networks). Έχουν αναδειχθεί ως μία σημαντική κατηγορία καταναμημένων ευφών συστημάτων που βασίζονται σε αισθητήρες με ιδιαίτερες προκλήσεις απόδοσης, πολυπλοκότητας και ποιότητας υπηρεσιών. Αποτελούνται από μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών κόμβων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης οι οποίοι μπορούν να παρατηρούν το περιβάλλον σύμφωνα με μία ορατότητα γραμμής (line of sight), δηλαδή ακτινική ορατότητα σε όλα τα σημεία με τα οποία μεταξύ του παρατηρούμενου σημείου και του σημείου που βρίσκεται ο αισθητήρας δεν παρεμβάλλεται εμπόδιο. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση αισθητήρων εικόνας (image sensors). Οι κόμβοι παρέχουν πληροφορίες από την υπό εξέταση περιοχή εκτελώντας καταναμημένη και συνεργατική επεξεργασία των συλλεγομένων δεδομένων. Η χρήση πολλαπλών αισθητήρων για τη συλλογή πληροφοριών από ένα σημείο ή μία περιοχή μπορούν να ενισχύσουν την αξιοπιστία της συλλεγόμενης πληροφορίας. Ωστόσο η

μεγάλη ποσότητα των δεδομένων, σε συνδυασμό με τους ενεργειακούς περιορισμούς του ασύρματου δικτύου απαιτούν την εξερεύνηση νέων μέσων για την επεξεργασία των δεδομένων, την επικοινωνία και τη διαχείριση των αισθητήρων. Τη δεδομένη χρονική στιγμή τα περισσότερα οπτικά δίκτυα αισθητήρων έχουν μία κεντρικοποιημένη αρχιτεκτονική, με την έννοια ότι τα δεδομένα μαζεύονται σε μία κεντρική τοποθεσία (κόμβο) ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ενέργειες από έναν χειριστή. Ωστόσο η ανάπτυξη κατανεμημένων αρχιτεκτονικών σε συνδυασμό με την αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων, ως αντίδραση στα υπό παρατήρηση γεγονότα, σε τοπικό επίπεδο για κάθε κόμβο προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες επέκτασης των δικτύων και απαιτεί πολύ πιο σπάνια εώς καθόλου την παρουσία ενός χειριστή που θα αποφασίζει τις κατάλληλες ενέργειες με βάση τα δεδομένα που παρατηρούνται [17]. Η αντιμετώπιση των προκλήσεων αυτών απαιτεί διεπιστημονικές προσεγγίσεις οι οποίες συνδυάζουν γνώσεις τηλεπικοινωνιών, δικτύων καθώς και ενσωματωμένων συστημάτων.

## Κεφάλαιο 3 Προβλήματα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

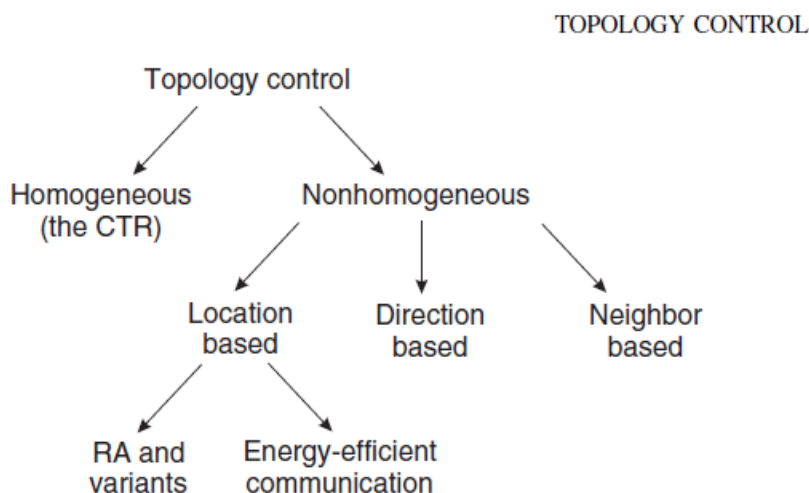
### 3.1 Έλεγχος Τοπολογίας (Topology Control)

Ο έλεγχος τοπολογίας είναι η τεχνική του προσδιορισμού των ακτίνων αίσθησης/επικοινωνίας των κόμβων, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα δίκτυο με τις επιθυμητές ιδιότητες (π.χ συνδεσιμότητα) μειώνοντας παράλληλα την ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου ή/και αυξάνοντας την χωρητικότητά του [18]. Αν και αυτός είναι ένας αρκετά γενικός χαρακτηρισμός, αποτυπώνει το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ελέγχου τοπολογίας σε σχέση με άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ή/και την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου: την ανάλυση σε επίπεδο δικτύου. Με άλλα λόγια οι κόμβοι λαμβάνουν αποφάσεις τοπικά (ρύθμιση του επιπέδου ισχύος της μετάδοσης) με στόχο την επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου συνολικά στο δίκτυο (network wide). Έτσι δεν μπορούν να θεωρηθούν ως topology control :

- Ο ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός του ασύρματου πομποδέκτη επειδή γίνεται σε επίπεδο κόμβου (nodewide).
- Τεχνικές ελέγχου ισχύος, στόχος των οποίων είναι να βελτιστοποιήσουν την επιλογή του επιπέδου ισχύος της μετάδοσης για μία ασύρματη μετάδοση πιθανώς κατά μήκος πολλών hops. Αυτό λαμβάνει χώρα σε επίπεδο καναλιού(channel wide).

Να τονιστεί ότι ο ορισμός μας για τον έλεγχο τοπολογίας δεν επιβάλλει κανέναν περιορισμό στη φύση του μηχανισμού που χρησιμοποιείται για να ελέγξει την τοπολογία του δικτύου. Έτσι τόσο συγκεντρωτικές (centralized) όσο και κατακευματισμένες (distributed) τεχνικές μπορούν να ταξινομηθούν ως μέθοδοι ελέγχου τοπολογίας.

Διαφορετικές τεχνικές μπορούν να ταξινομηθούν ως μηχανισμοί ελέγχου τοπολογίας. Μία ενδιαφέρουσα διάκριση γίνεται με βάση την κρίσιμη ακτίνα εκπομπής των κόμβων του δικτύου, και έτσι έχουμε να διακρίνουμε μεταξύ ομοιογενούς (homogeneous) κρίσιμης ακτίνας εκπομπής (CTR) και μη ομοιογενούς (nonhomogeneous) ελέγχου τοπολογίας [18].



Σχήμα 3-1: Έλεγχος τοπολογίας Πηγή [18]

Στην πρώτη περίπτωση όλοι οι κόμβοι του δικτύου έχουν την ίδια ακτίνα μετάδοσης  $r$  και το πρόβλημα του ελέγχου τοπολογίας ανάγεται στο απλούστερο πρόβλημα προσδιορισμού της ελάχιστης τιμής του έτσι ώστε να ικανοποιείται μία συγκεκριμένη ιδιότητα σε όλο το δίκτυο. Αυτή η τιμή του είναι γνωστή ως η κρίσιμη ακτίνα εκπομπής (CTR) αφού χρησιμοποιώντας μικρότερη ακτίνα από αυτήν το δίκτυο δεν θα μπορούσε να πετύχει με βεβαιότητα τους στόχους του. Στην περίπτωση του μη ομογενούς ελέγχου τοπολογίας επιτρέπεται στους κόμβους να επιλέξουν διαφορετική ακτίνα εκπομπής (υπό την προϋπόθεση ότι η επιλεγμένη ακτίνα δεν υπερβαίνει την μέγιστη ακτίνα). Η περίπτωση του ομοιογενούς ελέγχου τοπολογίας είναι αρκετά απλούστερη, έχει ωστόσο προκαλέσει αρκετό ενδιαφέρον καθώς λόγω της απλότητας αυτής η εξαγωγή καθαρών θεωρητικών αποτελεσμάτων στο πλαίσιο αυτό είναι ένα εφικτό, αν και απαιτητικό, έργο.

Ο μη ομοιογενής έλεγχος τοπολογίας ταξινομείται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο της πληροφορίας που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τοπολογίας του δικτύου. Σε προσεγγίσεις που βασίζονται στην τοποθεσία των κόμβων, θεωρείται ότι ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τη θέση του κόμβου είναι γνωστές. Αυτές χρησιμοποιούνται έτσι ώστε είτε να υπολογιστούν συνολικά με εποπτεία όλου του δικτύου (centralized) οι ακτίνες μετάδοσης όλων των κόμβων που βελτιστοποιούν μία συγκεκριμένη μετρική. Εναλλακτικά ανταλλάσσονται οι πληροφορίες ανάμεσα στους κόμβους και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό μιας «σχεδόν» βέλτιστης τοπολογίας με πλήρως καταναμημένο τρόπο (distributed). Στις προσεγγίσεις που βασίζονται στην κατεύθυνση, θεωρείται ότι οι κόμβοι δεν γνωρίζουν την θέση τους, αλλά μπορούν να εκτιμήσουν την σχετική κατεύθυνση των γειτόνων τους. Στις τεχνικές που βασίζονται σε γείτονες, οι κόμβοι θεωρείται ότι έχουν πρόσβαση σε ένα ελάχιστο ποσό πληροφορίας σχετικά με τους γείτονές τους, όπως η ταυτότητά τους και μπορούν να τους διαλέξουν με κάποιο κριτήριο (π.χ. απόσταση ή ποιότητα σύνδεσης).

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι με τον όρο Έλεγχος Τοπολογίας εννοούμε τεχνικές που χρησιμοποιούνται ώστε να μεταβούμε από τον μέγιστο δυνατό γράφο επικοινωνίας ενός δικτύου (για μέγιστη ακτίνα επικοινωνίας σε κάθε κόμβο) σε έναν αρκετά μικρότερο, με πιθανώς πολύ λιγότερες ακμές, αλλά παρόμοια συνδεδεμένο γράφο και παράλληλα να διατηρηθεί ένα επιθυμητό επίπεδο κάλυψης στο δίκτυο παρά την, όπου αυτό είναι εφικτό, μείωση των ακτίνων αίσθησης. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα:

- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Πολυβηματικές διαδρομές (multihop) είναι αρκετά συχνά πιο αποδοτικές (efficient) από μία μεγάλη, ενεργειακά αναποτελεσματική ακμή. Ο στόχος του ελέγχου τοπολογίας είναι ο εντοπισμός και η αφαίρεση αυτών των μη ενεργειακά αποδοτικών ακμών από το γράφο επικοινωνίας.
- Αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου καθώς οι παρεμβολές που προκύπτουν σε έναν πυκνά συνδεδεμένο γράφο οδηγούν στο να χάνονται πακέτα. Προτιμούνται πολλαπλές διαδρομές μεταξύ του αποστολέα και του προορισμού.

### **3.2 Θέματα και προκλήσεις για την επίλυση προβλημάτων κάλυψης και συνδεσιμότητας**

Σε αυτήν την ενότητα θα δούμε κάποια ζητήματα που προκύπτουν στα WSN σχετικά με την επίτευξη και τη διατήρηση των επιθυμητών επιπέδων κάλυψης και της επικοινωνίας, και θα αναφέρουμε κάποιες μεθόδους επίλυσής τους.

### 3.2.1 Στατικά και Κινητά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Static vs Mobile WSNs)

Στα στατικά WSN οι αισθητήρες δεν μπορούν να μεταβάλλουν την θέση τους. Στην περίπτωση των φορητών WSN οι θέσεις των αισθητήρων μπορούν να μεταβληθούν ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου [14]. Η κινητικότητα αυτή των αισθητήρων βοηθάει στην ενίσχυση της ποιότητας των υπηρεσιών των WSN (Quality of Services). Ένας αισθητήρας που έχει τη δυνατότητα να αλλάζει τη θέση του επαρκεί για την παρακολούθηση μίας περιοχής ενδιαφέροντος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος του δικτύου. Ωστόσο, για να το πετύχει αυτό αυξάνει τις ενεργειακές του απαιτήσεις. Η κινητικότητα στα WSN δημιουργεί και ένα νέο πεδίο έρευνας, τον προγραμματισμό μονοπατιών των αισθητήρων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Τέτοιες έρευνες εστιάζουν στο να βρουν ένα μονοπάτι από την εκάστοτε τοποθεσία τους στον επόμενο προορισμό τους ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Αυτή η διαδικασία δυσκολεύει εάν υπάρχουν εμπόδια στην περιοχή ενδιαφέροντος.

### 3.2.2 Δισδιάστατα και τρισδιάστατα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (2D vs 3D WSNs)

Σημαντικό ρόλο στην επιλογή των υπάρχουσών επιλογών αισθητήρων και τρόπων αντιμετώπισης των ζητημάτων που προκύπτουν σε ένα WSN παίζουν οι διαστάσεις της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι περισσότερες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία, όπως και στην παρούσα εστιάζουν στην ανάλυση δισδιάστατων WSN, θεωρώντας δηλαδή δεδομένη την τοποθέτηση των αισθητήρων σε ένα δισδιάστατο χώρο. Ωστόσο σε πρακτικές εφαρμογές (π.χ. υποβρύχια παρακολούθηση, ανίχνευση απειλών, παρακολούθηση φυσικών φαινομένων) η περίπτωση θεώρησης τρισδιάστατου χώρου ταιριάζει καλύτερα. Υπάρχουν όμως μερικά ζητήματα [14], που καλείται κανείς να λάβει υπόψη, όταν προσπαθεί να επεκτείνει τις ήδη υπάρχουσες σε δισδιάστατα δίκτυα μεθοδολογίες στον τρισδιάστατο χώρο:

- Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις που είναι βασισμένες στην υπολογιστική γεωμετρία για την ανίχνευση των περιττών κόμβων σε πυκνά WSNs, όπως τα διαγράμματα Voronoi. Ο χρόνος και η υπολογιστική πολυπλοκότητα τέτοιων προσεγγίσεων είναι πολύ μεγάλος στην περίπτωση τρισδιάστατων δικτύων
- Ο πολύ μεγαλύτερος αριθμός γειτόνων στα τρισδιάστατα δίκτυα που αυξάνει τις απαιτήσεις μνήμης του κάθε αισθητήρα που χρειάζεται πληροφορία από τους γείτονες του για διάφορους υπολογισμούς (πιθανό redundancy, ρύθμιση ακτίνας αίσθησης και επικοινωνίας)
- Οι πιθανοτικές προσεγγίσεις για την επίλυση των προβλημάτων επικοινωνίας και συνδεσιμότητας στα WSNs δεν λαμβάνουν υπόψη το σύνορο της περιοχής ενδιαφέροντος. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο εάν θεωρηθεί αμελητέο σε σχέση με την περιοχή ενδιαφέροντος, κάτι που στην περίπτωση των τρισδιάστατων δικτύων δεν συμβαίνει.



Υποδηλώνεται έτσι η σημασία των διαστάσεων της περιοχής ενδιαφέροντος κατά την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων κάλυψης και επικοινωνίας που παρατηρούνται στα τρισδιάστατα WSN.

### 3.2.3 Συγκεντρωτικές και κατανεμημένες προσεγγίσεις

Οι υπάρχουσες λύσεις για την αντιμετώπιση των προβλημάτων κάλυψης και επικοινωνίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να ταξινομηθούν σε συγκεντρωτικές και κατανεμημένες. Οι πρώτες περιλαμβάνουν έναν κεντρικό κόμβο που συλλέγει την πληροφορία από όλο το δίκτυο, την επεξεργάζεται, εκτελεί κάποιους αλγόριθμους και κατόπιν μεταδίδει τα αποτελέσματα στο υπόλοιπο δίκτυο. Στην κατανεμημένη προσέγγιση όλοι οι κόμβοι συλλέγουν δεδομένα από τους γείτονές τους, λύνουν το πρόβλημα και μοιράζονται την λύση. Όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση, οι κατανεμημένες μέθοδοι αυξάνουν το κόστος της επεξεργασίας των δεδομένων από τους αισθητήρες, μειώνοντας παράλληλα το κόστος επικοινωνίας και αίσθησης. Συμπεραίνουμε επομένως ότι οι συγκεντρωτικές προσεγγίσεις είναι εφικτές μόνο όταν το μέγεθος του δικτύου είναι μικρό και απαιτείται η λήψη μίας συνολικής απόφασης. Σε WSN μεγάλης κλίμακας και σε πιο δυναμικά δίκτυα, οι κατανεμημένες λύσεις έχουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

Αναπτύσσονται στο [19] τόσο συγκεντρωτικές όσο και κατανεμημένες προσεγγίσεις για την επίτευξη n-κάλυψης (2.4.5). Και οι δύο προσεγγίσεις έχουν ως αποτέλεσμα μία σχεδόν βέλτιστη λύση. Οι ερευνητές στο [20] χρησιμοποιούν έναν συλλέκτη δεδομένων για να συγκεντρώσουν πληροφορίες από όλο δίκτυο ώστε να αποφασιστεί ποιοι κόμβοι μπορούν να μπου σε λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας (sleep).

### 3.2.4 Μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου

Η επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα των WSN. Ωστόσο η επαναφόρτιση των μπαταριών των κόμβων-αισθητήρων είναι συνήθως δύσκολη έως μη εφικτή, ιδιαίτερα όταν η τοποθέτησή τους είναι τυχαία. Διάφορες τεχνικές χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού. Η πιο συνηθισμένη είναι ο χρονοπρογραμματισμός των κόμβων [14]. Οι περιττοί κόμβοι μπαίνουν σε κατάσταση αδράνειας (sleep) ενώ παράλληλα διατηρούνται οι σημαντικές ιδιότητες του δικτύου (π.χ. συνδεσιμότητα και επιθυμητή κάλυψη). Άλλες τεχνικές είναι μείωση των broadcast μηνυμάτων και η κοινή χρήση των αισθητηριακών δεδομένων μόνο σε μία ορισμένη χρονική στιγμή. Ένα παράδειγμα χρονοπρογραμματισμού των κόμβων είναι η περίπτωση του όπου προτείνεται ένας αλγόριθμος που μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση αδρανοποιώντας ορισμένους περιττούς κόμβους [21]. Προτείνονται τρία διαφορετικά κριτήρια με βάση τα οποία ένας κόμβος γίνεται πλεονάζων (redundant). Ένα από αυτά είναι το Neighbor Number Based (NNB), σύμφωνα με το οποίο ένας κόμβος είναι περιττός εάν καλύπτεται από τους γείτονές του. Χρησιμοποιήθηκε η απόσταση των γειτόνων ώστε να υπολογιστεί η περιοχή της τομής ενός κόμβου και των γειτόνων του.

### 3.2.5 Μεταβίβαση Πληροφορίας

Η μεταβίβαση της πληροφορίας προς τον κεντρικό κόμβο συχνά δεν είναι εφικτό ή δεν είναι προτιμητέο ενεργειακά να γίνει άμεσα (1-hop) αλλά είναι καλύτερο να εμπλακούν γειτονικοί κόμβοι ως μεταγωγοί έτσι ώστε από τον αρχικό κόμβο να

φτάσει η πληροφορία στον κόμβο στόχο [22]. Ένας λόγος που μπορεί να συμφέρει η μεταφορά της πληροφορίας με τη χρήση ενδιάμεσων κόμβων ακόμα και στην περίπτωση που μπορεί να γίνει άμεση επικοινωνία του αρχικού κόμβου με τον κόμβο στόχο είναι το γεγονός ότι για την επικοινωνία σε απόσταση  $R$  απαιτείται ενέργεια ανάλογη του  $r^\alpha$ ,  $\alpha \geq 2$  και συνεπώς οι μεγάλες ακτίνες είναι πολύ χειρότερες από πολλές μικρές, ακόμα και συνυπολογίζοντας το κόστος της μεταβίβασης και της δρομολόγησης.

### 3.3 Προσεγγίσεις για την επίλυση προβλημάτων μεγιστοποίησης κάλυψης

Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση των προβλημάτων κάλυψης σε WSN μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, σε προσεγγίσεις υπολογιστικής γεωμετρίας και σε πιθανοτικές προσεγγίσεις.

#### 3.3.1 Προσεγγίσεις βασισμένες στην υπολογιστική γεωμετρία (Computational geometry based approaches)

Είναι ένα πεδίο έρευνας που εστιάζει στη συστηματική μελέτη των αλγορίθμων και των δομών δεδομένων για χρήση σε γεωμετρικά αντικείμενα, όπως σημεία, γραμμές και πολύγωνα με στόχο τη δημιουργία αλγορίθμων επίλυσης των προβλημάτων της ενότητας 3.2. Δημοφιλείς μέθοδοι είναι τα διαγράμματα Voronoi, η τριγωνοποίηση Delaunay και τα Power διαγράμματα [14]. Ένα διάγραμμα Voronoi ορίζεται ως ο διαχωρισμός ενός επιπέδου σε ξεχωριστές περιοχές ή πολύγωνα με βάση την απόσταση από ορισμένα σημεία του επιπέδου. Στην περίπτωση μας το επίπεδο είναι η περιοχή ενδιαφέροντος και τα σημεία είναι οι αισθητήρες. Με βάση τον ορισμό των διαγραμμάτων Voronoi ένα πολύγωνο καλύπτεται από την περιοχή κάλυψης ενός αισθητήρα εάν αυτός βρίσκεται μέσα στο πολύγωνο αυτό. Εάν ένα σημείο ενός πολυγώνου δεν καλύπτεται από τον αισθητήρα που βρίσκεται μέσα σε αυτό τότε είναι ένα σημείο που δεν είναι δυνατό να καλυφθεί ούτε από κάποιον άλλον αισθητήρα. Χρησιμοποιείται σε ομογενή WSN, όπου αισθητήρες με ίδια ακτίνα αίσθησης τοποθετούνται στην περιοχή ενδιαφέροντος. Το power διάγραμμα, ή αλλιώς Voronoi διάγραμμα με βάρη, χρησιμοποιεί την μικρότερη τιμή της απόστασης υψωμένη σε μία δύναμη για να χωρίσει τον χώρο σε περιοχές. Στα ετερογενή WSN θεωρείται ότι οι περιοχές αίσθησης κάθε αισθητήρα είναι κύκλοι με διαφορετικές ακτίνες.

Για την αύξηση της διάρκειας ζωής ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, είναι κριτική η ανίχνευση και η εξάλειψη/μείωση της πλεονάζουσας κάλυψης. Εφαρμογές του διαγράμματος Voronoi περιλαμβάνουν τη μελέτη για την επίτευξη του προηγούμενου σε ομογενή WSNs καθώς και μία παραλλαγή του (Multiplicatively Weighted Voronoi Diagram) για μη ομογενή WSNs [14]. Επιλύθηκε επίσης το πρόβλημα της ανίχνευσης της συνοριακής κάλυψης. Ζητούμενο του προβλήματος αυτού είναι εάν ένας αισθητήρας βρίσκεται κοντά στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Με τη χρήση των διαγραμμάτων Voronoi αποδείχθηκε ότι ένας αισθητήρας ανήκει σε αυτήν την κατηγορία αν και μόνο αν υπάρχει μία μη επικαλυπτόμενη περιοχή ανάμεσα στο πολύγωνο Voronoi του αισθητήρα και της περιοχής κάλυψής του. Αναπτύχθηκε έτσι μία κατανομημένη αντιμετώπιση για τη συντήρηση του δικτύου για την ενημέρωση εκτός λειτουργίας (failed) αισθητήρων και την προσθήκη νέων αισθητήρων στο δίκτυο. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούν τις πληροφορίες αυτές για την ανίχνευση και την εξάλειψη της πλεονάζουσας κάλυψης στο ενημερωμένο δίκτυο.

Ένας κεντρικοποιημένος αλγόριθμος προτείνεται στο [23] που λύνει ένα πρόβλημα κάλυψης και επικοινωνίας με στόχο τη δημιουργία ενός ελάχιστου ενωμένου σύνολο αισθητήρων που διατηρεί την επιθυμητή κάλυψη. Η βασική ιδέα είναι να υπολογιστεί το σύνολο των αισθητήρων που είναι αναγκαίο για την κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος και κατόπιν να διασφαλιστεί ότι το δίκτυο είναι συνδεδεμένο. Ο αλγόριθμος που προτείνεται επιλέγει τους ελάχιστους αισθητήρες για την επίτευξη της επιθυμητής κάλυψης χρησιμοποιώντας το Voronoi διάγραμμα. Έτσι αυξάνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου, ωστόσο είναι ένας κεντρικοποιημένος αλγόριθμος που δεν είναι εφαρμόσιμος σε μεγάλα δίκτυα, καθώς ο χρόνος εκτέλεσής του και η πολυπλοκότητά του αυξάνεται πολύ με την αύξηση του μεγέθους του δικτύου.

### **3.3.2 Προσεγγίσεις βασισμένες σε πιθανοτικά μοντέλα τοποθέτησης αισθητήρων (Probabilistic based approaches)**

Με την τυχαία τοποθέτηση αισθητήρων στο δίκτυο έχουμε την ομοιόμορφη κατανομή τους στην περιοχή ενδιαφέροντος. Μπορεί η διαδικασία τοποθέτησης τους να μοντελοποιηθεί από μία Poisson point process. Αυτό χρησιμοποιούν οι διάφοροι πιθανοτικοί αλγόριθμοι που αντιμετωπίζουν προβλήματα των WSN. Στο [24] προτείνεται από τον S. Chellappan ένας αλγόριθμος που βασίζεται σε αισθητήρες, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα, μία φορά κατά τη διάρκεια της ζωής τους να κάνουν μία μετακίνηση και να μεταφερθούν από το σημείο από το οποίο τοποθετήθηκαν σε έναν άλλο ορισμένο προορισμό. Μετά μετατρέπονται σε στατικούς κόμβους. Μπορούν έτσι να μεγιστοποιήσουν την κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος ενώ παράλληλα διατηρούν το δίκτυο συνδεδεμένο.

### **3.4 Σχέση κάλυψης και επικοινωνίας**

Σε αυτήν την ενότητα εστιάζουμε στην κατανόηση της σχέσης μεταξύ μερικής κάλυψης και πλήρους συνδεσιμότητας σε στατικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Βρίσκουμε επίσης τις συνθήκες όπου η μερική κάλυψη συνεπάγεται πλήρη συνδεσιμότητα [15]. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις

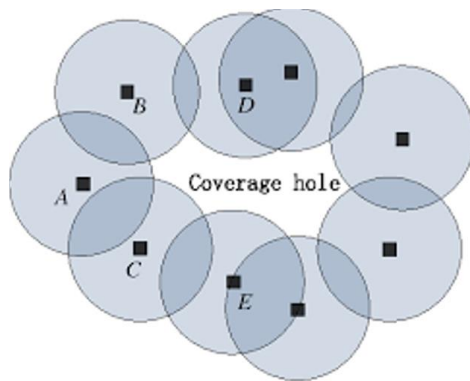
- η κάλυψη να συνεπάγεται συνδεσιμότητα
- η συνδεσιμότητα να συνεπάγεται κάλυψη.

Ένα συνδεδεμένο δίκτυο δεν μπορεί να εγγυηθεί την κάλυψη διότι για να επιτευχθεί ολική κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος πρέπει να καλυφθεί κάθε σημείο του RoI. Αντίθετα μπορεί υπό προϋποθέσεις ένα δίκτυο με πλήρη κάλυψη να εγγυηθεί συνδεσιμότητα, καθώς για την επίτευξή της χρειάζεται να καλυφθούν μόνο ορισμένα σημεία του επιπέδου (οι θέσεις των κόμβων) κάτι που είναι πολύ πιθανό να συμβαίνει όταν έχουν καλυφθεί μεγάλα ποσοστά της περιοχής ενδιαφέροντος. Σύμφωνα με το παραπάνω, εάν υποθέσουμε ότι η περιοχή είναι κυρτή τότε η συνθήκη  $R_c \geq 2R_s$  είναι τόσο απαραίτητη όσο και επαρκής για να εγγυηθεί την συνδεσιμότητα του δικτύου, δεδομένου ότι υπάρχει πλήρη κάλυψη. Αυτό το συμπέρασμα εάν και πολύ χρήσιμο δεν μπορεί να αξιοποιηθεί στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η οποία εξετάζει το πρόβλημα της κάλυψης παρουσία εμποδίων, τα οποία καθιστούν τον χώρο μη κυρτο.

### **3.5 Ανίχνευση Κάλυψης**

Μπορεί κάποιος να εξάγει συμπεράσματα για την ύπαρξη πλήρους κάλυψης ενός χώρου ελέγχοντας την κάλυψη των σημείων της περιφέρειάς του [25]. Για να

κατανοήσουμε λοιπόν εάν η περιοχή την οποία καλύπτει ένας αισθητήρας (ένας κυκλικός δίσκος) καλύπτεται από το ασύρματο δίκτυο, ανεξάρτητα από τον ίδιο τον αισθητήρα, από τους γείτονές του δηλαδή, αρκεί να ελέγξουμε εάν καλύπτεται η περιφέρεια του κυκλικού δίσκου. Εξετάζουμε λοιπόν εάν οι γείτονες – λαμβάνοντας υπόψιν τα εμπόδια καθώς και τα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος- κάθε κόμβου καλύπτουν την περιφέρεια του. Μπορούμε έτσι να έχουμε ένα τοπικό κριτήριο για την εύρεση των περιττών κόμβων σε ένα σύνολο. Αρκεί να εξετάσει κανείς εάν όλοι οι γειτονικοί κόμβοι ενός συγκεκριμένου κόμβου έχουν την περιφέρειά τους καλυμμένη (χωρίς να ληφθεί υπόψιν ο συγκεκριμένος κόμβος). Τότε δεν υπάρχει κάποιο κενό κάλυψης που να συμπληρώνεται από τον συγκεκριμένο κόμβο επομένως είναι περιττός. Αντίθετα εάν όλοι οι κόμβοι μίας περιοχής δεν έχουν καλυμμένη την περιφέρειά τους τότε έχουμε μία τρύπα κάλυψης (Σχήμα 3-2). Τα παραπάνω θα μας φανούν πολύ χρήσιμα σε καταναμημένες μεθόδους που θα υπολογίζουν την ακτίνα αίσθησης του κάθε κόμβου σε επίπεδο γειτονιάς.



Σχήμα 3-2: Λόγω της μη κάλυψης της περιφέρειας κάποιων κόμβων εμφανίζεται ένα κενό κάλυψης (coverage hole) [26]

## Κεφάλαιο 4 Πρόβλημα επίτευξης κάλυψης σε συνδεδεμένο δίκτυο αισθητήρων μεταβλητής ακτίνας

Σε αυτήν την ενότητα θα ορίσουμε το μοντέλο του δικτύου που θα χρησιμοποιήσουμε ώστε να λύσουμε το πρόβλημα της κάλυψης μίας περιοχής από ένα συνδεδεμένο δίκτυο με μεταβλητές ακτίνες (variable radii connected sensor cover). Το ζητούμενο στο variable radii connected sensor είναι ο προσδιορισμός των ακτίνων αίσθησης και επικοινωνίας με στόχο την μεγιστοποίηση της κάλυψης του δικτύου και την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της ενεργειακής του κατανάλωσης, ενώ παράλληλα το δίκτυο παραμένει συνδεδεμένο.

Σε αυτό το πρόβλημα, μία συνήθης υπόθεση είναι ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος δεν υπάρχουν εμπόδια. Ωστόσο σε ρεαλιστικά σενάρια υπάρχουν εμπόδια που περιορίζουν την ικανότητα κάλυψης ορισμένων αισθητήρων ή παρεμποδίζουν την επικοινωνία ανάμεσα στους αισθητήρες. Στο κεφάλαιο αυτό μελετούμε το variable radii connected sensor πρόβλημα σε μία μη κυρτή περιοχή, με την απουσία κυρτότητας να οφείλεται στην ύπαρξη πολυγωνικών, κυρτών, αδιαφανών εμποδίων. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με τη χρήση ευριστικών μεθόδων που θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

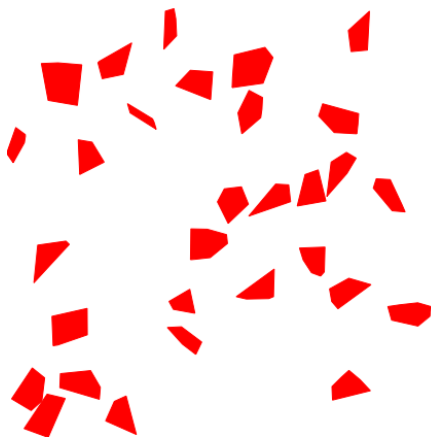
### 4.1 Το μοντέλο του Ασύρματου δικτύου αισθητήρων

#### 4.1.1 Μοντελοποίηση του χώρου

Η περιοχή ενδιαφέροντος στην οποία τοποθετείται το WSN, έστω  $F$ , θεωρείται, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ως μία τετραγωνική περιοχή, πλευράς  $L_0$ ,  $F = [0, L_0]^2 \subset \mathbb{R}^2$ .

#### 4.1.2 Μοντελοποίηση των εμποδίων

Στην περιοχή ενδιαφέροντος, στην οποία τοποθετούνται οι αισθητήρες που συγκροτούν το δίκτυο μας, υπάρχουν κυρτά αδιαφανή εμπόδια. Τα εμπόδια μοντελοποιούνται ως ένα σύνολο μη επικαλυπτόμενων, κυρτών πολυγώνων στην περιοχή  $F$ , όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4-1: Η μοντελοποίηση των εμποδίων.

Στην περίπτωση του δισδιάστατου χώρου, μπορούμε να θεωρήσουμε τα εμπόδια ως κλειστές καμπύλες με πεπερασμένο πλήθος οπών. Στο πλαίσιο του προβλήματός μας όμως, απλά πολυγωνικά εμπόδια χωρίς οπές είναι αρκετά για να μελετηθεί η επίδρασή τους στο δίκτυο των αισθητήρων, καθώς η θεώρηση οπών θα είχε ως αποτέλεσμα τη διαμέριση του χώρου ενδιαφέροντος που θα έπρεπε να καλυφθεί (χώρος χωρίς εμπόδια) σε περιοχές που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, κάτι που θα περιέπλεκε την περιγραφή του. Για τη δημιουργία των εμποδίων αυτών στον τετραγωνικό χώρο που περιγράψαμε παραπάνω, μία απλή λύση είναι βασισμένη στο convex hull (κυρτή θήκη).

#### Ορισμός 4-1

**Κυρτή Θήκη (Convex Hull):** ή κυρτό κλείσιμο ενός συνόλου  $S$  σημείων σε ένα Ευκλείδειο επίπεδο ή σε ένα χώρο είναι το μικρότερο δυνατό κυρτό σύνολο που περιλαμβάνει όλα τα σημεία του  $S$ .

Για να δημιουργήσουμε ένα εμπόδιο [25], τοποθετούμε  $N$  το πλήθος σημεία σε ένα τετράγωνο, έστω  $L$ . Έπειτα λαμβάνουμε το convex hull αυτών. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το κέντρο μάζας του convex hull έστω  $[x_0, y_0]^T$ . Μετατοπίζουμε το εμπόδιο κατά  $[-x_0, -y_0]^T$ , ώστε να βρεθεί στην αρχή των αξόνων και κατόπιν παράγουμε ένα τυχαίο διάνυσμα  $[x_1, y_1]^T$  και μετατοπίζουμε με βάση αυτό το εμπόδιο. Εάν στο σημείο που το τοποθετούμε τέμνεται με κάποιο προϋπάρχον εμπόδιο, αναιρείται η τελευταία μετατόπιση και παράγουμε ένα νέο τυχαίο διάνυσμα, ώστε να έχουμε έναν καλύτερο έλεγχο στον αναμενόμενο εμβαδόν που θα καλύπτουν τα εμπόδια.

Για το αναμενόμενο εμβαδόν υπάρχει ένας γενικός τύπος [27]. Σύμφωνα με αυτόν το αναμενόμενο εμβαδόν ενός τυχαίου Convex Hull (έστω  $o$ ) σε ένα τετράγωνο με πλευρά  $L_1$ .

$$E[area(o)] = L_1^2 - \frac{8 * L_1^2}{3 * (K+1)} * (\sum_{k=1}^{K+1} \frac{1}{k} * (1 - \frac{1}{2^k})) - \frac{1}{K+1} * 2^{K+1}$$

Θεωρώντας  $N$  εμπόδια το συνολικό αναμενόμενο εμβαδόν σε μία περιοχή ενδιαφέροντος είναι

$$E[area_{obstacles}] = N * E[area(o)]$$

Για τα εμπόδια ισχύει ότι δεν χρειάζεται να καλύψουμε τον χώρο που περιλαμβάνει το εμπόδιο. Επίσης ένας αισθητήρας δεν μπορεί να καλύψει το χώρο πίσω από το εμπόδιο, επειδή η ορατότητα γραμμής (line of sight) διακόπτεται από το εμπόδιο. Επομένως τα εμπόδια αντιπροσωπεύουν οποιοδήποτε χώρο χαρακτηρίζεται από αυτές τις ιδιότητες.

Βλέπουμε παρακάτω τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για να παραχθούν τα εμπόδια.

```
function Obstacles(obstacleNum, K) :#K:number of points used to create
the obstacle
Obs= []# initially empty obstacle set
for i in range(1, obstacleNum) :
    points = randomPointsGenerator()
    ob = convexHull(K, points)
    centerOfMass = massCenter(ob)
    centeredOb = translate(ob, -centerOfMass)
```

```

while 1 do:
    randomPoint = rand(2)
    newOb = translate(ob, randomPoint)
    if (!newOb.intersects(item) for item in Obs):
        break
Obs.append(newOb)
return Obs

```

### 4.1.3 Μοντελοποίηση Αισθητήρων

Το δίκτυο στην περίπτωση μας αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό αισθητήρων καταναμημένων τυχαία σε μια περιοχή (περιοχή ενδιαφέροντος) (με εμπόδια [25]). Το σύνολο των αισθητήρων, έστω  $S = \{s_1, s_1, \dots, s_n\}$  μοντελοποιείται από ένα σύνολο σημείων  $P = \{p_1, p_1, \dots, p_n\}$  με  $P \subset F$ . Για την τυχαία τοποθέτηση των αισθητήρων στην περιοχή ενδιαφέροντος, θεωρούμε ως γεννήτρια των παραπάνω σημείων μία Poisson Point Process στον χώρο που δεν υπάρχουν εμπόδια. Κάθε αισθητήρας έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό (ID) και ορίζεται μία μέγιστη ακτίνα αίσθησης  $S^*$  και μία μέγιστη ακτίνα επικοινωνίας  $T^*$ . Ορίζουμε για όλους τους αισθητήρες στο δίκτυο τις ίδιες μέγιστες ακτίνες αίσθησης και επικοινωνίας. Κάθε αισθητήρας  $i$  επιλέγει μία ακτίνα αίσθησης  $S(i) \leq S^*$  και μία ακτίνα επικοινωνίας  $T(i) \leq T^*$  με αποτέλεσμα να συλλέγει δεδομένα μέχρι απόσταση  $S(i)$  και να μπορεί να επικοινωνήσει με τους υπόλοιπους αισθητήρες που βρίσκονται μέχρι απόσταση  $T(i)$ . Η περιοχή από την οποία ο αισθητήρας  $i$  συλλέγει δεδομένα, έστω  $\theta(i)$ , είναι ένας κυκλικός δίσκος ακτίνας  $S(i)$  με κέντρο την τοποθεσία του αισθητήρα.

### 4.1.4 Ενεργειακό Μοντέλο

Έστω ένας αισθητήρας  $i$  με ακτίνα αίσθησης  $S(i)$  και ακτίνα μετάδοσης  $T(i)$ . Στον κόμβο αυτόν το κόστος λειτουργίας μπορεί να οριστεί [28] ως άθροισμα του κόστους τοποθέτησης, της ενεργειας αίσθησης και της ενεργειας επικοινωνίας. Ως ένα άθροισμα δηλαδή της ενέργειας που καταναλώνεται για την τοποθέτηση του κόμβου, που είναι μία σταθερά, της ενέργειας που καταναλώνει για την επικοινωνία του με άλλους κόμβους, που είναι μία συνάρτηση που εξαρτάται από την ακτίνα μετάδοσης του  $T(i)$ , και από την ενέργεια που καταναλώνει ο κόμβος για την συλλογή πληροφοριών από το περιβάλλον του, που είναι μία συνάρτηση που εξαρτάται από την ακτίνα αίσθησης  $S(i)$ . Έχουμε λοιπόν για τον κόμβο  $i$  την παρακάτω συνάρτηση για τον υπολογισμό της ενέργειάς του:

$$E(i) = f(S(i)) + g(T(i)) + C$$

όπου οι  $f, g$  είναι αύξουσες συναρτήσεις και το  $C$  είναι μία σταθερά που αντιπροσωπεύει την ενεργειακή κατανάλωση σε κατάσταση αδράνειας [28].

## Κεφάλαιο 5 Ανάλυση του προβλήματος

Για να καταφέρουμε να πετύχουμε την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ παράλληλα διατηρούμε την πλήρη κάλυψη του χώρου ενδιαφέροντος και την επικοινωνία όλου του δικτύου των κόμβων πρέπει με τις παραπάνω συνθήκες να ελαχιστοποιήσουμε την συνολική ενεργειακή κατανάλωση  $E = f(S(I)) + g(T(I)) + C|I|$ , όπου  $I$  είναι το σύνολο όλων των κόμβων. Αρκεί λοιπόν για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης να χρησιμοποιήσουμε όσο λιγότερους κόμβους επιτυγχάνουν την επιθυμητή κάλυψη και διατηρούν την επικοινωνία και επίσης να μειώσουμε την ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη συλλογή πληροφοριών από την περιοχή ενδιαφέροντος καθώς και αυτή για την επικοινωνία των κόμβων.

### 5.1 Χρήσιμες Έννοιες

#### Ορισμός 5-1

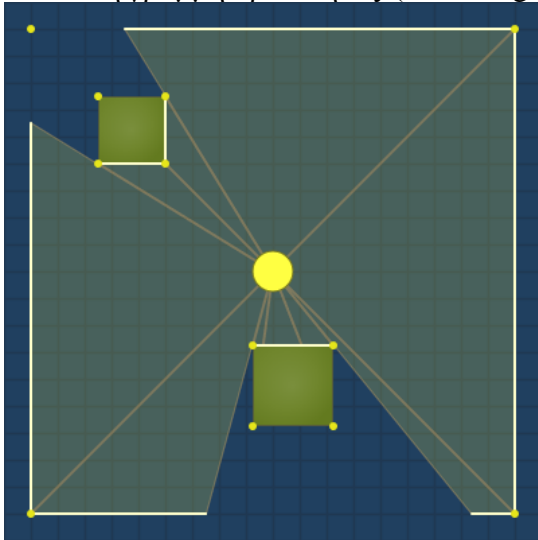
**Coverable region:** Συμβολίζεται  $F_c$  και είναι ο χώρος ενδιαφέροντος  $F$ , χωρίς τα εμπόδια, ο οποίος είναι μη κυρτός χώρος (έχει ακανόνιστο σχήμα).

#### Ορισμός 5-2

**Feasible coverable region:** Συμβολίζεται  $F'_c$  και είναι η τομή του χώρου  $F_c$  με την περιοχή που καλύπτουν όλοι οι αισθητήρες του δικτύου ρυθμισμένοι στη μέγιστη ακτίνα αίσθησής τους [25].

#### Ορισμός 5-3

**Πολύγωνο Ορατότητας (Visibility Polygon):** Το πολύγωνο ορατότητας (VP) ενός κόμβου  $i$  συμβολίζεται  $VP_i$  και αντιστοιχεί σε όλα τα σημεία  $u \in F$  τέτοια ώστε η γραμμή  $(u, p_i)$  δεν τέμνει κανένα εμπόδιο. Περιλαμβάνει δηλαδή όλα τα σημεία που είναι στη γραμμή ορατότητας (line of sight) του κόμβου  $i$  [29].



Σχήμα 5-1: Παράδειγμα πολυγώνου ορατότητας ενός κόμβου με πολλά εμπόδια.  
– Πηγή [redblobgames.com](http://redblobgames.com)



#### Ορισμός 5-4

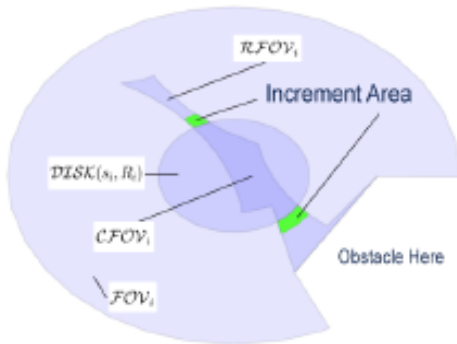
**Πεδίο Ορατότητας (Field of Vision):** Το πεδίο ορατότητας (FOV) ενός κόμβου  $i$  συμβολίζεται  $FOV_i$  περιγράφει όλα τα σημεία που ένας κόμβος καλύπτει όταν είναι ρυθμισμένος στη μέγιστη ακτίνα αίσθησής του και ορίζεται από τη σχέση  $FOV_i = VP_i \cap DISK(p_i, r_{max})$  όπου  $DISK(p_i, r_{max})$  είναι ο δίσκος με κέντρο τον κόμβο και ακτίνα τη μέγιστη ακτίνα επικοινωνίας [29].

#### Ορισμός 5-5

**Τρέχον πεδίο ορατότητας (Current Field of Vision):** Το πεδίο ορατότητας (CFOV) ενός κόμβου  $i$  συμβολίζεται  $CFOV_i$  περιγράφει όλα τα σημεία που ένας κόμβος καλύπτει όταν είναι ρυθμισμένος στην τρέχουσα ακτίνα αίσθησής ( $r_{current}$ ) του και ορίζεται  $CFOV_i = FOV_i \cap DISK(p_i, r_{current})$ .

#### Ορισμός 5-6

**Μειωμένο πεδίο ορατότητας (reduced field of vision):** Το μειωμένο πεδίο ορατότητας ενός κόμβου  $i$  συμβολίζεται ως  $RFOV_i$ , είναι το  $FOV$  του κόμβου εάν αφαιρεθεί το  $CFOV$  των γειτονικών κόμβων και ορίζεται:  $RFOV_i = FOV_i \setminus \cup_{i \neq j} CFOV_j$ .



Σχήμα 5-2: [29]

#### Ορισμός 5-7

**Συνολική Τρέχουσα Κάλυψη (Total Coverage):** Ορίζεται ως όλα τα σημεία τα οποία καλύπτονται από τουλάχιστον έναν κόμβο για την τρέχουσα ανάθεση ακτίνων στο δίκτυο:  $TC(r) = \cup_i CFOV_i(r_i)$  [29].

#### Ορισμός 5-8

**Καλυμμένη Περιφέρεια:** Είναι το τμήμα της περιφέρειας ενός κόμβου που είναι καλυμμένο από άλλους αισθητήρες εμπόδια ή τα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος.

$$CCIRC_i = (CFOV_i) \cap \left( \left( \cup_{j \neq i} CFOV_j \right) \cup \left( \cup_k O_k \right) \cup F^c \right)$$

#### Ορισμός 5-9

**Ποσοστό κάλυψης περιφέρειας:** Ορίζεται το ποσοστό κάλυψης της περιφέρειας ενός αισθητήρα ως το ποσοστό του μήκους το οποίο τέμνεται είτε με κάποιον άλλον αισθητήρα, είτε με κάποιο εμπόδιο, ή με τα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος  $F$  της συνολικής περιφέρειας.

$$PCOV_i = \frac{\text{length}(CCIRC_i)}{\text{length}(\partial(CFOV_i))}$$

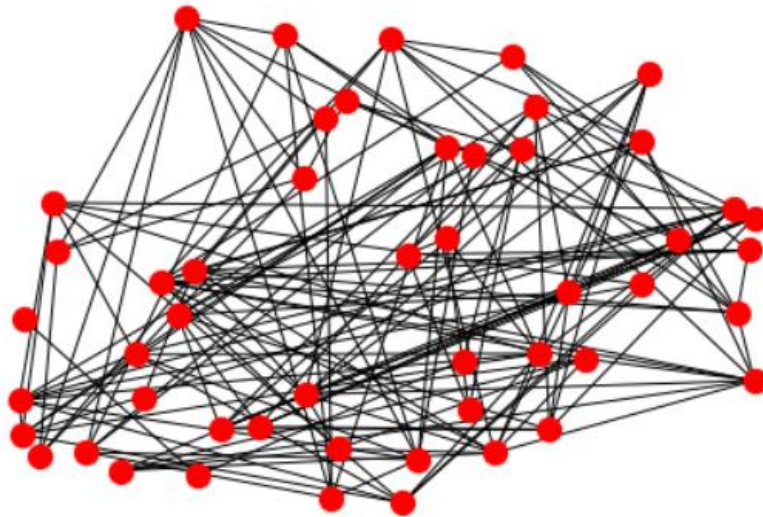
Όπου το  $\text{length}$  το θεωρούμε ως μία συνάρτηση που επιστρέφει το μήκος μίας καμπύλης.

### Ορισμός 5-10

**Γράφος επικοινωνίας:** Δεδομένου ενός συνόλου κόμβων έστω  $M$  σε ένα δίκτυο ο γράφος επικοινωνίας του  $M$  είναι ένας γράφος με το  $M$  ως το σύνολο των κόμβων του και ακμές ανάμεσα σε όσους κόμβους μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα (1-hop) με βάση την ακτίνα επικοινωνίας που τους έχει ανατεθεί [18]. Πλήρης γράφος επικοινωνίας λέγεται η ειδική περίπτωση, στην οποία οι ακτίνες επικοινωνίας σε όλους τους κόμβους είναι ρυθμισμένες στο μέγιστο.

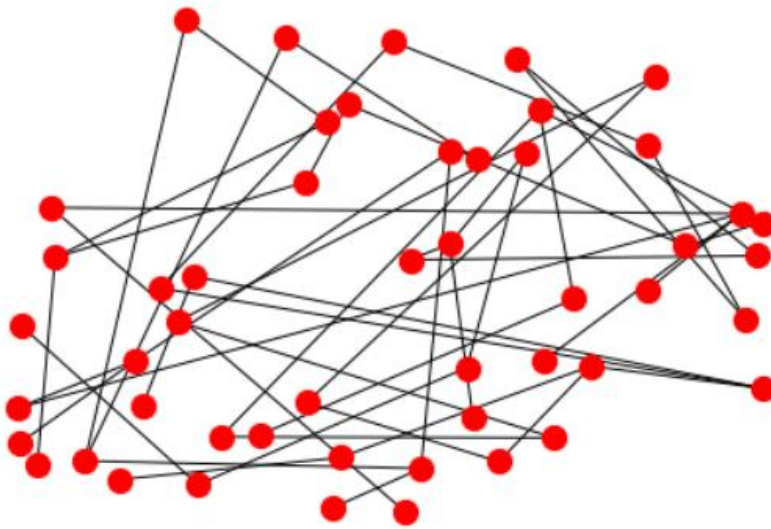
## 5.2 Ελαχιστοποίηση της ενέργειας επικοινωνίας

Στην περίπτωσή μας οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία στην περιοχή ενδιαφέροντος. Επομένως είναι λογικό, θα τοποθετηθούν κόμβοι σε ορισμένες περιοχές με μεγάλη πυκνότητα, με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η διατήρηση της συνδεσιμότητας όλου του δικτύου ενώ οι κόμβοι λειτουργούν σε μικρότερες ακτίνες επικοινωνίας από τη μέγιστή τους. Για να μειώσουμε τις ακτίνες επικοινωνίας στις ελάχιστες αυτές τιμές χρησιμοποιούμε τον πλήρη γράφο επικοινωνίας του δικτύου, με την εξής προσθήκη. Στις ακτίνες που ενώνουν δύο κόμβοι δίνουμε ένα βάρος το οποίο είναι η απόσταση των δύο κόμβων. Έτσι έχουμε τον παρακάτω γράφο



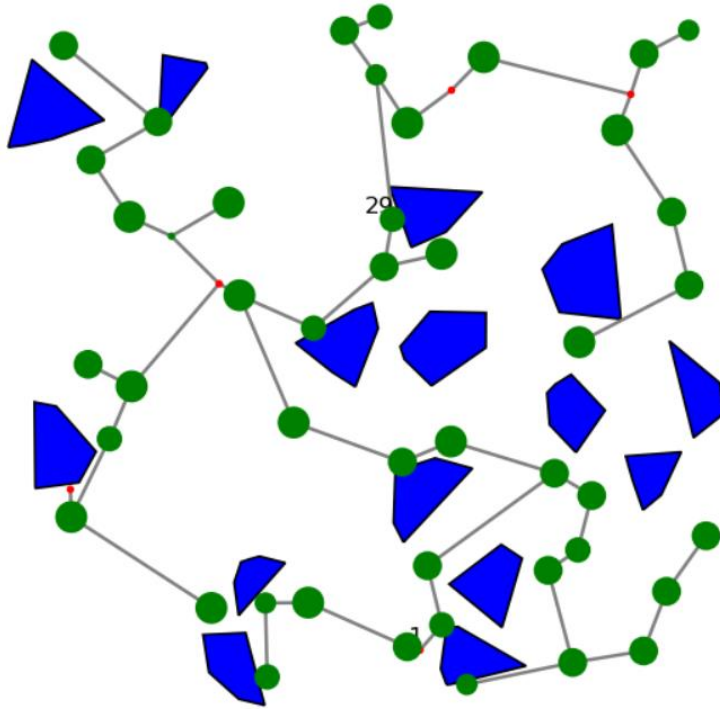
Σχήμα 5-3: Ο πλήρης γράφος επικοινωνίας του δικτύου (με βάρη)

Στον παραπάνω γράφο βρίσκουμε το ελάχιστο συνδετικό δένδρο (Minimum Spanning Tree - MST)



Σχήμα 5-4: Ελάχιστο Συνδετικό Δένδρο (MST)

Κατόπιν ρυθμίζουμε κατάλληλα την ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερη ή ίση με την ακμή μέγιστου βάρους που προσπίπτει πάνω στον κόμβο που αντιστοιχεί σε αυτόν. Έτσι εάν υπάρχει στο ελάχιστο συνδετικό δένδρο μία ακμή ανάμεσα στους κόμβους  $x$  και  $y$  τότε πρέπει η ακτίνα επικοινωνίας των αντίστοιχων sensor να ρυθμιστεί τουλάχιστον ίση με την απόστασή τους. Καθώς ένας κόμβος του MST είναι πιθανό να έχει πάνω από έναν γείτονες, για να ρυθμίσουμε την ακτίνα επικοινωνίας ψάχνουμε τον γείτονα με τον οποίο συνδέεται με ακμή μεγαλύτερου βάρους. Η επιλογή τιμών των ακτίνων επικοινωνίας γίνεται από ένα διάστημα τιμών  $[r_{min}, r_{max}]$ , με κάποιο βήμα  $\Delta r$ . Εάν για έναν κόμβο του MST ισχύει ότι, η ακμή με το μεγαλύτερο βάρος με την οποία συνδέεται έχει βάρος  $w_{max}$ , τότε ορίζουμε ως ακτίνα επικοινωνίας του την τιμή στο επιτρεπτό διάστημα τιμών  $(r_{min} + k * \Delta r), k = 0, 1, \dots, (r_{max} - r_{min}) / \Delta r$ . Καταλήγουμε λοιπόν στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5-5) όπου οι ακμές υποδηλώνουν επικοινωνία μεταξύ των αντίστοιχων κόμβων, με κόκκινο σημειώνονται κόμβοι με μηδενική ακτίνα αίσθησης που χρησιμοποιούνται μόνο για την διασφάλιση της συνδεσιμότητας, ενώ στους πράσινους κόμβους μεγαλύτερο μέγεθος σημαίνει μεγαλύτερη ακτίνα αίσθησης.



Σχήμα 5-5: Οι ακμές υποδηλώνουν επικοινωνία μεταξύ των αντίστοιχων κόμβων, με κόκκινο σημειώνονται κόμβοι με μηδενική ακτίνα αίσθησης, ενώ στους πράσινους κόμβους έχουμε μεγαλύτερη ακτίνα αίσθησης.

### 5.3 Ελαχιστοποίηση της ενέργειας κάλυψης

#### 5.3.1 Μεγιστοποίηση του coverage-to-energy ratio

Για να καταφέρουμε να βρούμε μία ανάθεση που να έχει την επιθυμητή κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, προσεγγίσεις που μεγιστοποιούν το coverage-to-energy ratio μελετούνται. Συγκεκριμένα στόχος είναι να βρεθεί η ανάθεση τιμών στις ακτίνες των αισθητήρων τέτοια ώστε να είναι μέγιστος ο λόγος της καλυμμένης περιοχής ως προς την ενεργειακή κατανάλωση με δεδομένη μία ελάχιστη οριακή τιμή κάλυψης  $T$  (threshold).

$$\operatorname{argmax}_{r \in S \subseteq D} \left\{ \frac{\text{Covered}(r)}{\text{Energy}(r)} \right\}$$

Όπου το σύνολο  $S$  (feasible set) ορίζεται:

$$S = \left\{ r \in D \mid \frac{\text{Covered}(r)}{\text{Covered}(r_{\max})} \geq T \right\}$$

Ενώ  $D$  είναι ο χώρος των επιτρεπτών ακτίνων.

Η μεγιστοποίηση του παραπάνω λόγου δεν είναι τετριμμένη ή ευκολη. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης (αναφορά στο παραπάνω) είναι μη κυρτό και η  $\text{Covered}(r)$  είναι μία συνάρτηση που μας δίνει το εμβαδόν της επιφάνειας που καλύπτουν συνεργατικά όλοι οι κόμβοι και η οποία εξαρτάται τόσο από τα εμπόδια όσο και από τους αισθητήρες.

Ορίζεται και η συνάρτηση  $Energy(r)$  η οποία εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται σε ολόκληρο το δίκτυο για την κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος για την ανάθεση των ακτίνων  $r \in D$  και υπολογίζεται ως το επιμέρους άθροισμα των ενεργειών κάλυψης όλων των αισθητήρων του δικτύου.

### 5.3.2 Απλοποιημένη Τυποποίηση του προβλήματος της μεγιστοποίησης του coverage to energy ratio

Μία απλοποίηση στην έκφραση βελτιστοποίησης του προβλήματος εστιάζει στην ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας που καταναλώνει το δίκτυο και οδηγεί στην παρακάτω σχέση:

$$\operatorname{argmin}_{r \in S \subseteq D} \{Energy(r)\}$$

Η παραπάνω συνάρτηση κατανάλωσης ενέργειας είναι αύξουσα. Αυτό σημαίνει ότι αύξηση της ακτίνας αίσθησης σε έναν κόμβο συνεπάγεται την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης δηλαδή

$$r_1 \leq r_2 \Rightarrow Energy(r_1) \leq Energy(r_2)$$

Ας θεωρήσουμε ένα σημείο στο εσωτερικό του συνόλου των εφικτών λύσεων για το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της ενέργειας αίσθησης,  $S$ . Στο διάνυσμα  $r$  που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό θα μπορούμε πάντα να μειώσουμε κάποια από τις ακτίνες καταλήγοντας σε ένα διάνυσμα  $r'$  μία από τις ακτίνες του οποίου θα είναι μειωμένη κατά μία ποσότητα  $\epsilon, \epsilon \in \mathbb{R}^n$  και να ανήκει ακόμα στο σύνολο  $S$ . Αυτό όμως συνεπάγεται ότι  $Energy(r') \leq Energy(r)$  επομένως δεν γίνεται να πετύχω την ελάχιστη ενέργεια στο εσωτερικό του συνόλου  $S$  παρά μόνο στο σύνορο (frontier)  $\partial S$  στο οποίο μπορούμε να περιορίσουμε την αναζήτησή μας. Ορίζεται το

$$\partial S = cl(\partial S \setminus \partial D) \subseteq \partial S$$

Το παραπάνω δεν ταυτίζεται γενικά με το σύνολο

$$S = \left\{ r \in D \mid \frac{Covered(r)}{Covered(r_{max})} \geq T \right\}$$

Στην περίπτωση της μερικής κάλυψης τα παραπάνω σύνολα ταυτίζονται, ωστόσο στην δικής μας περίπτωση όπου θέλουμε να πετύχουμε πλήρη κάλυψη ( $T = 1$ ) ισχύει  $\partial S \subseteq S$ . Αυτό συμβαίνει καθώς μπορούμε να πετύχουμε την πλήρη κάλυψη με ανάθεση ακτίνων μικρότερη των μέγιστων.

**Σημειώνεται** ότι καθώς  $Covered(r)$  είναι σταθερό και ισούται με

$$T \cdot Covered(r_{max}) = Covered(r_{max}) \quad (T = 1)$$

Έχουμε ότι

$$\begin{aligned} \operatorname{argmax}_{r \in S \subseteq D} \left\{ \frac{Covered(r)}{Energy(r)} \right\} &= \operatorname{argmax}_{r \in S \subseteq D} \left\{ \frac{Constant}{Energy(r)} \right\} \\ &= \operatorname{argmin}_{r \in S \subseteq D} \{Energy(r)\} \end{aligned}$$

## 5.4 Κεντριοποιημένοι Αλγόριθμοι

### 5.4.1 Άπληστος Κεντριοποιημένος αλγόριθμος

Για την μεγιστοποίηση του coverage to energy ratio χρησιμοποιείται ένας άπληστος κεντριοποιημένος αλγόριθμος, που προτείνεται στο [25], ο οποίος εκτελείται μέχρι να επιτευχθεί η πλήρης κάλυψη στην περιοχή ενδιαφέροντος. Κατά την επανάληψη  $t$ , ένας κόμβος  $s_i$  επιλέγεται για να αυξήσει την ακτίνα επικοινωνίας του κατά  $\Delta r$ , εάν έχει μεγαλύτερο ratio αύξησης κάλυψης προς αύξηση ενεργειακής κατανάλωσης ορισμένο ως

$$R(i, t) = \frac{m(RFOV_i(r') \setminus RFOV_i(r))}{Energy(r') - Energy(r)}$$

Όπου  $r' = r + e_i \min\{r_i + \Delta r, r_{max}\}$  λαμβάνουμε υπόψιν ότι  $r' \neq r$ . Εάν σε μία επανάληψη οι κόμβοι έχουν ίσους λόγους  $R(i, t) = R(j, t) = R_{max}$  τότε ο αλγόριθμος επιλέγει έναν τυχαία. Σημειώνεται ότι οι κόμβοι επιλέγονται με βάση την τιμή του λόγου της ακάλυπτης περιοχής προς την επιπλέον ενέργεια στο δαχτυλίδι που ορίζεται από το  $r_i$  και το  $\Delta r_i$ . Εάν χωρίσουμε το πεδίο ορατότητας (FOV) ενός κόμβου σε τέτοια δαχτυλίδια σε καθένα από αυτά μπορούμε να ορίσουμε μία τιμή που να αντιστοιχεί στο παραπάνω ratio του εν λόγω δαχτυλιδιού. Η τιμή αυτή στο  $FOV_i$  είναι σταθερή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου, ενώ μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλονται οι ακτίνες των γειτονικών κόμβων εάν αντί για το  $FOV_i$  λάβουμε υπόψιν το  $RFOV_i$ . Κόμβοι οι οποίοι στην αρχή μπορεί να είχαν μία υψηλή τιμή ratio μπορούν κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου να χειροτερέψουν και να μην έχουν την κατάλληλη τιμή ώστε να αυξηθούν ξανά. Αυτό μπορεί να συμβεί γιατί μπορεί να καλυφθούν ολοκληρωτικά από τις αυξήσεις ακτίνων γειτονικών κόμβων καθιστώντας τους έτσι περιττούς (redundant). Για να μετριάσουμε το φαινόμενο αυτό εισάγουμε μία διαδικασία μείωσης ακτίνων. Στοχαστικά γίνεται περιοδικά μία μείωση ακτίνας από τους κόμβους με το χειρότερο λόγο  $\frac{\Delta(Area)}{\Delta(Energy)}$ , όπου το  $\Delta(Area)$  εκφράζει το εμβαδόν που δεν θα καλύπτει πλέον ο κόμβος μετά την μείωση της ακτίνας.

Η υλοποίηση του παραπάνω αλγορίθμου αναλύεται παρακάτω. Θεωρούμε τις συναρτήσεις:

- Covered(): υπολογίζει το ποσοστό της περιοχής ενδιαφέροντος το οποίο καλύπτεται από τους κόμβους με βάση την ανάθεση ακτίνων που έχουν
- Argmax (argmin): υπολογίζει το σύνολο των τιμών που μεγιστοποιούν (αντίστοιχα ελαχιστοποιούν) την παράσταση που του δίνεται ως όρισμα
- Select επιστρέφει τυχαία ένα στοιχείο από το σύνολο των στοιχείων που της δίνεται

```
function greedyCentralized (obstacles, sensors):
    R = 0# initially all sensing ranges are zero
    while(covered(R)<1):
        S = argmax(incrementRatio(i)) for i in sensors
        i = random.choice(S)
        R(i) = min(R(i)+Δr, Rmax(i))
        if(random.random() < probability):
            S = argmin(decrementRatio(i)) for i in sensors
            i = random.choice(S)
            R(i) = max(R(i)-Δr, 0)
    return R
```

Στην αρχή μηδενίζονται οι ακτίνες κάλυψης όλων των κόμβων του δικτύου μας. Στη συνέχεια, και μέχρι να πετύχουμε την επιθυμητή κάλυψη (πλήρη), εκτελούμε επαναληπτικά τα παρακάτω. Βρίσκουμε το σύνολο των κόμβων με το βέλτιστο λόγο περιοχής που καλύπτουν προς την ενέργεια που χρειάζεται για να το πετύχουν αυτό. Επιλέγουμε τυχαία έναν από αυτούς και αυξάνουμε την ακτίνα του. Κατόπιν με μία πιθανότητα μειώνουμε την ακτίνα ενός κόμβου από αυτούς που ανήκουν στο σύνολο των κόμβων οι οποίοι θα «απελευθερώσουν» την μικρότερη δυνατή περιοχή με μία μείωση της ακτίνας τους κατά  $\Delta r$ . Αυτό το κάνουμε διότι αν μονάχα αυξάνουμε τις ακτίνες των κόμβων ελλοχεύει ο κίνδυνος κόμβοι οι οποίοι είχαν στην αρχή αρκετά καλό λόγο αύξησης περιοχής προς καταναλισκόμενης ενέργειας, κατόπιν και λόγω της αύξησης της ακτίνας από γειτονικούς κόμβους να καλυφθούν ολόκληροι.

Στον αλγόριθμο χρησιμοποιούμε την συνάρτηση `incrementRatio` της οποίας την υλοποίηση βλέπουμε παρακάτω: Έστω  $r$  η αρχική ακτίνα του κόμβου. Εάν η ακτίνα του υπό εξέταση κόμβου δεν είναι η μέγιστη έχουμε αύξηση της κατά  $\Delta r$ . Κατόπιν υπολογίζουμε το δαχτυλίδι που προκύπτει από τους δύο κυκλικούς δίσκους με κέντρο τον κόμβο και ακτίνες τις  $r + \Delta r$  και  $r$  αντίστοιχα. Βρίσκουμε στη συνέχεια την τομή του δαχτυλιδιού αυτού με το Μειωμένο πεδίο ορατότητας (`reduced field of vision`) του κόμβου, καθώς επίσης και την διαφορά ανάμεσα στην ενέργεια που καταναλώνει ο κόμβος για την συλλογή πληροφοριών από το περιβάλλον με ακτίνες τις  $r + \Delta r$  και  $r$  αντίστοιχα. Κατόπιν, και με βάση την υπόθεση ότι οι ακτίνες αυτές δεν είναι ίδιες (ο κόμβος δεν ήταν ήδη ρυθμισμένος στη μέγιστη ακτίνα αίσθησης) επιστρέφουμε το λόγο  $\frac{\Delta(Area)}{\Delta(Energy)}$ . Ανάλογα γίνεται και ο υπολογισμός του `decrementRatio`.

```
function incrementRatio(i) :
    newRad = min(R(i)+Δr, Rmax(i))
    ring = RING(i, R(i), newRad)
    reducedRing = ring.intersection(reducedFieldOfView(i))
    energyIncrease = energyConsumed(i, newRad) -
energyConsumed(i, R(i))
    if(energyIncrease != 0) :
        return area(reducedRing)/energyIncrease
    else:
        return 0
```

#### 5.4.2 Τυχαιοποιημένος Κεντρικοποιημένος Αλγόριθμος

Μία παραλλαγή του παραπάνω αλγορίθμου η οποία μπορεί να θεωρηθεί γενίκευσή του είναι η εξής: αντί να ψάχνουμε το μέγιστο (ελάχιστο) στο σύνολο του πλήθους των κόμβων πριν αυξήσουμε (μειώσουμε) την ακτίνα σε κάποιον κάνουμε την ίδια διαδικασία σε ένα υποσύνολο των κόμβων σταθερού πλήθους  $n$ . Στην ακραία περίπτωση που το  $n$  ισούται με τον συνολικό αριθμό των κόμβων του δικτύου ο Τυχαιοποιημένος Κεντρικοποιημένος Αλγόριθμος εκφυλίζεται στον Άπληστο Κεντρικοποιημένο Αλγόριθμο που αναφέραμε παραπάνω. Με την προσέγγιση αυτή εικάζεται ότι εάν και το σύνολο των κόμβων θα είναι μικρότερο του αρχικού, θα υπάρχει πάλι ένας «ικανοποιητικός» κόμβος να αυξήσει την ακτίνα του (αντίστοιχα να τη μειώσει). Βέβαια αυτό, καθώς πλησιάζουμε σε μεγάλη κάλυψη είναι προφανές ότι θα γίνεται όλο και πιο δύσκολο, καθώς μικραίνει η πιθανότητα να βρίσκουμε

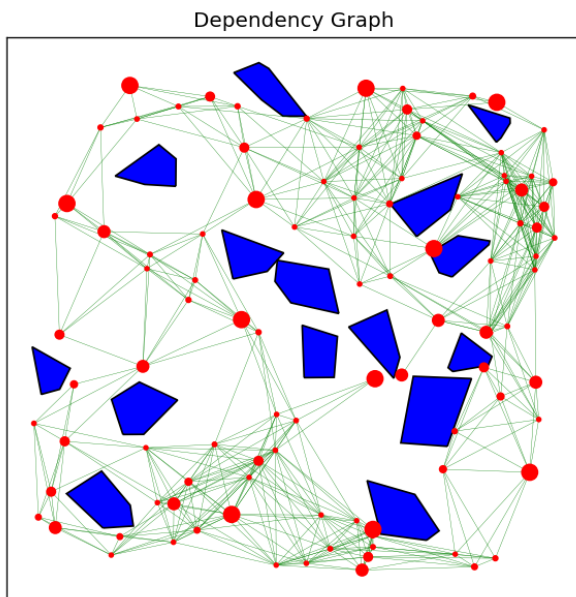
ικανοποιητικές αυξήσεις σε μικρά υποσύνολα. Η αξία της μεθόδου αυτής αναγνωρίζεται όταν έχουμε να κάνουμε με μεγάλα δίκτυα. Για παράδειγμα σε ένα δίκτυο με  $10^9$  κόμβους και ένα με  $10^{12}$  κόμβους. Εάν και στα δύο χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο που αναπτύξαμε με  $n=10^3$  για παράδειγμα, θα παρατηρήσουμε ότι η ταχύτητα εκτέλεσης στα δύο δίκτυα είναι παρόμοια και επίσης ότι η απόκλιση των αποτελεσμάτων είναι αρκετά μικρή παρά την τυχαioποιημένη φύση του αλγορίθμου.

## 5.5 Κατανεμημένος Τοπικός Αλγόριθμος

Ένα βασικό μειονέκτημα της προηγούμενης προσέγγισης είναι ότι όλες οι αποφάσεις για την ρύθμιση των ακτίνων ώστε να επιτευχθεί μία αποδοτική ενεργειακή κάλυψη πρέπει να γίνουν κεντρικά για όλο το δίκτυο, κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα όταν το δίκτυο διαθέτει μεγάλο αριθμό κόμβων καθώς θα πρέπει σε κάθε βήμα να εξετάζονται όλοι οι κόμβοι του δικτύου. Προτείνεται λοιπόν στο [25] μία εναλλακτική στις παραπάνω προσεγγίσεις, μέσα από έναν κατανεμημένο αλγόριθμο, με βάση τον οποίον ο κάθε κόμβος μεταβάλλει ξεχωριστά την ακτίνα του (με δεδομένα που συλλέγει από τους γείτονες του).

### 5.5.1 Γράφος εξάρτησης

Ο γράφος εξάρτησης αναπαριστά την αλληλεξάρτηση των κόμβων για τη συνεργατική τους κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος  $F_c$  (coverable region). Ορίζεται ως ο μη-κατευθυνόμενος γράφος  $G = (V, E)$  τέτοιος ώστε  $\{u_i, u_j\} \in E \Leftrightarrow FOV_i \cap FOV_j \neq \emptyset$ . Επομένως στο γράφο αυτό μία ακμή υποδηλώνει ότι δύο γειτονικοί κόμβοι καλύπτουν κοινά κομμάτια της περιοχής ενδιαφέροντος και επομένως θα χρειαστεί να επικοινωνήσουν ώστε να αποφασίσουν τοπικά για το πως θα ρυθμίσουν τις αντίστοιχες ακτίνες τους.



Σχήμα 5-6: Γράφημα εξαρτήσεων

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τον γράφο εξάρτησης ενός δικτύου. Οι κόμβοι οι οποίοι έχουν τον μικρότερο αριθμό γειτονικών κόμβων με τους οποίους έχουν επικάλυψη στην περιοχή την οποία καλύπτουν παρουσιάζονται με μεγαλύτερο μέγεθος στο διάγραμμα, έτσι ώστε να καταστεί σαφής η σημαντικότητά τους.



### 5.5.2 Τοπικό κριτήριο σύγκλισης

Για την αύξηση της ακτίνας αίσθησης ενός κόμβου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω ευρετικό τρόπο για την αύξηση ή την μείωσή της: Εξετάζουμε όλους τους γειτονικούς κόμβους (ορισμένοι από τον γράφο εξάρτησης). Αυξάνουμε την ακτίνα του κόμβου που έχει τον καλύτερο λόγο εμβαδού κάλυψης προς ενέργειας σε σχέση με όλους τους γείτονές του. Επειδή πάντα θα υπάρχει τουλάχιστον ένας κόμβος με τον καλύτερο λόγο σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου θα αυξάνεται τουλάχιστον η ακτίνα ενός κόμβου. Στην πράξη αυξάνονται σε κάθε βήμα οι ακτίνες πολλών κόμβων. Εγείρεται από την παραπάνω διαδικασία ωστόσο το ερώτημα του πότε θα σταματήσει ένας κόμβος να αυξάνει την ακτίνα του. Για παράδειγμα ένας απομονωμένος κόμβος θα αυξάνει την ακτίνα του συνέχεια. Πρέπει λοιπόν να εισάγουμε έναν τρόπο ώστε να σταματήσει. Σύμφωνα με το [30] σε κάθε επανάληψη, κάθε κόμβος θα υπολογίζει το ποσοστό της κάλυψης της περιφέρειας του (*restricted sensing perimeter*), που ορίζεται ως το μήκος της *sensing circumference* ( $\partial CFOV_i$ ) που περιορίζεται από τα  $CFOV_i$  των γειτονικών κόμβων, τα γειτονικά εμπόδια και τα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Σημειώνεται πως οι γειτονικοί στα πλαίσια του γράφου εξάρτησης κόμβοι δεν επικοινωνούν απευθείας απαραίτητα (μπορεί να το κάνουν με περισσότερα από 1-Hop).

$$PCOV_i = \frac{length(CCIRC_i)}{length(\partial(CFOV_i))}$$

Εάν το ποσοστό κάλυψης της περιφέρειας ενός κόμβου γίνει μεγαλύτερο από μία ορισμένη τιμή έστω  $l$  τότε ο κόμβος θα σταματήσει να μεταβάλλει την ακτίνα του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε μία σταθερή τιμή  $l$  να αντιστοιχούν διαφορετικά ποσοστά κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος, ωστόσο με την αύξηση του μεγέθους του δικτύου η διασπορά αναμένεται να μειωθεί σημαντικά και να γίνει αμελητέα (αναφορά από κάτω). Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν όλοι οι κόμβοι έχουν ποσοστό κάλυψης περιφέρειας μεγαλύτερο ή ίσο από την προκαθορισμένη τιμή  $l$ . Σε κάθε επανάληψη οι κόμβοι που δεν έχουν ακόμη το επιθυμητό επίπεδο κάλυψης της περιφέρειας τους υπολογίζουν την γειτονιά τους στον γράφο εξάρτησης του δικτύου. Καθένας από αυτούς τους κόμβους συγκρίνει το ratio του με αυτό των γειτόνων και αυτοί με το καλύτερο αυξάνουν τις ακτίνες τους κατά μία τιμή  $\Delta r$ .

### 5.5.3 Υλοποίηση Κατανημημένου Τοπικού Αλγορίθμου

Για την υλοποίηση του παραπάνω αλγορίθμου χρησιμοποιούμε τις παρακάτω συναρτήσεις:

- *Neighbors*(node  $i$ ): λαμβάνει ως είσοδο έναν γράφο  $i$  και επιστρέφει όλους τους γείτονές του, με βάση τον γράφο εξάρτησης
- *radiusIncrease*(set nodeSet): λαμβάνει ως όρισμα ένα σύνολο κόμβων και σε καθέναν από αυτούς αυξάνει την ακτίνα αίσθησής τους κατά  $\Delta r$
- *redundantNodes*(set nodeSet): λαμβάνει ως όρισμα ένα σύνολο κόμβων και επιστρέφει αυτούς τους αισθητήρες που είναι περιττοί, δηλαδή μπορούμε να μηδενίσουμε την ακτίνα αίσθησής τους
- *zeroNodes*(set nodeSet): μηδενίζει τις ακτίνες όλων των κόμβων που περιλαμβάνονται στο σύνολο κόμβων που λαμβάνει ως όρισμα.

```

function greedyDistributed(obstacles, sensors, l):
    R=0# initially zero all sensing ranges
    while Rnew!=R:#Assignment of radii changed in last
iteration
        for i in range (1,n):
            if PCOV(i)>=l:
                continue
            if i in
argmax(incrementRatio(neighbors(i).union(i))):
                setToIncrease.update(i)
                setToZero = redundantNodes(sensors)
                radiusIncrease(setToIncrease)
                zeroNodes(setToZero)
    return R

```

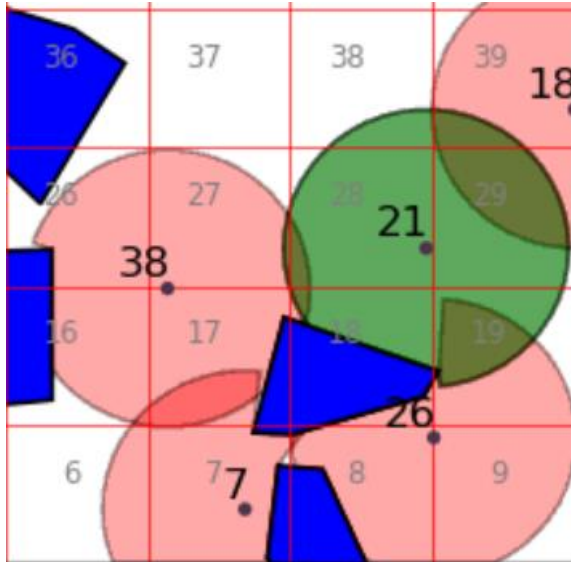
Στην αρχή του αλγορίθμου εξετάζεται κάθε κόμβος για να βρούμε αυτούς τους οποίους πληρούν το κριτήριο τερματισμού (insert νόυμερο σχέσης) και τους προσπερνάμε. Κατόπιν για όσους κόμβους δεν έχει ακόμη καλυφθεί η περιφέρειά τους στο επιθυμητό ποσοστό κάνουμε τα παρακάτω βήματα. Βρίσκουμε στη γειτονιά κάθε κόμβου αυτόν ή αυτούς με το καλύτερο *incrementRatio* και τους τοποθετούμε σε ένα σύνολο. Κατόπιν βρίσκουμε σε όλο το δίκτυο τους περιττούς κόμβους, δηλαδή αυτούς τους οποίους μπορούμε να μηδενίσουμε την ακτίνα τους. Τέλος αυξάνουμε τις ακτίνες των προς αύξηση κόμβων και μηδενίζουμε αυτές των προς μηδένιση κόμβων.

## 5.6 Κατανεμημένος αλγόριθμος βασισμένος σε πλέγμα

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον παραπάνω αλγόριθμο παρουσιάζεται στην επιλογή της γειτονιάς του κάθε κόμβου. Η γειτονιά αποτελείται από τους γειτονικούς κόμβους στον γράφο εξάρτησης του κόμβου που αντιστοιχεί στον υπό εξέταση αισθητήρα. Με βάση το πως δημιουργείται ο γράφος εξάρτησης όπως περιγράψαμε στο (5.5.1) έχουμε ότι δύο κόμβοι θεωρούνται γειτονικοί όταν καλύπτουν κοινά τμήματα της περιοχής ενδιαφέροντος. Μπορούμε στην παραπάνω θεώρηση να κάνουμε μια τροποποίηση η οποία έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και με βάση την οποία προτείνουμε έναν κατανεμημένο αλγόριθμο μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης αίσθησης.

### 5.6.1 Διαμέριση της περιοχής ενδιαφέροντος

Η περιοχή ενδιαφέροντος διαμερίζεται με τη χρήση τετραγωνικού πλεγματος. Δημιουργούνται τετράγωνα πλέγματα (grids) ίσου μεγέθους, στα οποία μπορούμε να αναφερόμαστε επίσης ως κελιά [31]. Ως γειτονιά ορίζουμε τους κόμβους οι οποίοι καλύπτουν κοινά κελιά, ακόμα και εάν δεν καλύπτουν ίδια σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος. Θεωρούνται δηλαδή δύο κόμβοι  $i, j$  ως γείτονες εάν και μόνο αν τα σύνολα  $cellsCoveredBy(i)$ ,  $cellsCoveredBy(j)$  έχουν μη κενή τομή. Η επικοινωνία των κόμβων διασφαλίζεται, μιας και το δίκτυο είναι συνδεδεμένο, αν και μπορεί να μην γίνεται απευθείας, αλλά με ενδιάμεσο κόμβο. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα:



Σχήμα 5-7: Γειτονιά ενός κόμβου

Η γειτονιά του κόμβου 21 ορίζεται ως οι κόμβοι οι οποίοι καλύπτουν ίδια κελιά με τον κόμβο αυτόν. Έτσι στο σχήμα σε αυτήν ανήκουν οι κόμβοι 38, 26, 18 καθώς και ο κόμβος 7 ο οποίος με βάση τον προηγούμενο αλγόριθμο δεν θα ήταν μέρος της γειτονιάς του κόμβου 21. Καλύπτουν όμως και οι δύο κόμβοι το κελί με αριθμό 17. Μπορούμε να ορίσουμε ότι δύο κόμβοι  $i, j$  θεωρούνται γείτονες αν και μόνο αν  $cells_i \cap cell_j \neq \emptyset$  όπου  $cells_i$  τα κελιά μέρος των οποίων καλύπτει ο κόμβος  $i$  και  $cells_j$  που καλύπτει ο κόμβος  $j$  αντίστοιχα.

### 5.6.2 Τοπικό κριτήριο σύγκλισης

Επιλέγεται για τον GridDistributed αλγόριθμο και ένα διαφορετικό τοπικό κριτήριο σύγκλισης. Για να μπορέσουμε να αποφασίσουμε πότε θα σταματήσει ένας κόμβος να αυξάνει την ακτίνα του δεν ελέγχουμε πλέον το ποσοστό της κάλυψης της περιφέρειας του (restricted sensing perimeter). Ελέγχουμε το ποσοστό στο οποίο είναι πλήρως καλυμμένα τα γειτονικά κελιά του κόμβου. Εάν αυτά είναι καλυμμένα σε ποσοστό μεγαλύτερο μίας οριακής τιμής, έστω  $l$ , σταματάμε να αυξάνουμε την ακτίνα του. Είναι το παρακάτω λοιπόν η συνθήκη με βάση την οποία σταματάει να αυξάνει η ακτίνα ενός κόμβου  $i$ :

$$cellCoverage(j)_{j \in A} \leq l, A = neighboringCells(i)$$

Όπου η  $cellCoverage$  υπολογίζει το λόγο της κάλυψης ενός κελιού με την τρέχουσα ανάθεση ακτίνων στο δίκτυο,  $R$  προς την κάλυψή του με την ανάθεση των μέγιστων ακτίνων,  $R_{max}$ , και η  $neighboringCells$  επιστρέφει όλα τα κελιά της γειτονιάς ενός κόμβου, όλα τα κελιά δηλαδή των οποίων καλύπτεται μέρος από τον κόμβο.

### 5.6.3 Υλοποίηση grid based καταναμημένου αλγορίθμου

Για την υλοποίηση του παρακάτω αλγορίθμου χρησιμοποιούμε τις παρακάτω συναρτήσεις:

- $neighboringCells(\text{node } i)$ : λαμβάνει ως είσοδο έναν κόμβο  $i$  και επιστρέφει όλα τα γειτονικά του κελιά, όπου γειτονικά ως προς έναν κόμβο θεωρούνται τα κελιά μέρος των οποίων ο κόμβος καλύπτει.

- `radiusIncrease(set nodeSet)`: λαμβάνει ως όρισμα ένα σύνολο κόμβων και σε καθέναν από αυτούς αυξάνει την ακτίνα αίσθησής τους κατά  $\Delta r$
- `redundantNodes(set nodeSet)`: λαμβάνει ως όρισμα ένα σύνολο κόμβων και επιστρέφει αυτούς τους αισθητήρες που είναι περιττοί, δηλαδή μπορούμε να μηδενίσουμε την ακτίνα αίσθησής τους
- `zeroNodes(set nodeSet)`: μηδενίζει τις ακτίνες όλων των κόμβων που περιλαμβάνονται στο σύνολο κόμβων που λαμβάνει ως όρισμα.
- `cellCoverage(cell i)`: επιστρέφει το ποσοστό του κελιού που είναι καλυμμένο από την τρέχουσα ανάθεση ακτινών στο δίκτυο σε σχέση με την ανάθεση των μέγιστων ακτίνων αίσθησης

```

function GridDistributed(obstacles, sensors, l):
    R=0# initially zero all sensing ranges
    while Rnew!=R:#Assignment of radi changed in last
iteration
        for i in range (1,n):
            for cell in neighboringCells(i):
                if cellCoverage(i)>1:
                    continue
            if i in
argmax(incrementRatio(neighbors(i).union(i))):
                setToIncrease.update(i)
                setToZero = redundantNodes(sensors)
                radiusIncrease(setToIncrease)
                zeroNodes(setToZero)
    return R

```

Ο αλγόριθμος όπως βλέπουμε και στον ψευδοκώδικα παραπάνω είναι παρόμοιος με αυτός για τον καταναμημένο τοπικό αλγόριθμο με τις διαφορές να εντοπίζονται στο τοπικό κριτήριο σύγκλισης καθώς επίσης και στον ορισμό της γειτονιάς για κάθε κόμβο, ζητήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

## Κεφάλαιο 6 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των παραπάνω μεθόδων χρησιμοποιήσαμε διάφορες μετρικές σχετικές με την ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου. Μετρήσαμε τον λόγο της κατανάλωσης του δικτύου που προκύπτει από τις εξεταζόμενες τεχνικές σε σχέση με τη μέγιστη ενέργεια που απαιτείται για τις λειτουργίες της αίσθησης και επικοινωνίας των αισθητήρων ξεχωριστά, καθώς και συνδυαστικά (4.1.4). Λάβαμε υπόψιν μας την τυπική απόκλιση των εξεταζόμενων μετρικών για τους επιλεγμένους αλγορίθμους ώστε να υπολογιστεί η αξιοπιστία τους. Μελετήσαμε τους χρόνους εκτέλεσης τους και τέλος δοκιμάσαμε διάφορες τιμές για τις παραμέτρους του ενεργειακού μας μοντέλου (6.2), αυξομειώνοντας τα ποσοστά της βαρύτητας της ενέργειας που καταναλώνεται για την επικοινωνία των αισθητήρων και αυτής που καταναλώνεται για την κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος στον υπολογισμό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Λαμβάνοντας υπόψιν το κόστος για την τοποθέτηση των αισθητήρων εξετάζουμε την επίδραση του πλήθους των εγκατεστημένων αισθητήρων στην ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου. Τέλος μετράμε μετά την εκτέλεση κάθε αλγορίθμου το χρόνο εκτέλεσης και τον αριθμό των αισθητήρων που έχουν μηδενική ακτίνα αίσθησης, είναι δηλαδή ανενεργοί, όσον αφορά την λειτουργία αίσθησής τους.

### 6.1 Μετρικές Αξιολόγησης των αλγορίθμων

**Λόγος κατανάλωσης:** Η μετρική αυτή αναφέρεται στο λόγο της κατανάλωσης ενέργειας για την ανάθεση που επιλέχθηκε μετά από την εκτέλεση του κάθε αλγορίθμου προς την ενέργεια κατανάλωσης από την ανάθεση των μέγιστων ακτίνων, επικοινωνίας ή αίσθησης, ανάλογα με τον αλγόριθμο που εκτελέστηκε (μείωση της ενέργειας επικοινωνίας / μείωση της ενέργειας αίσθησης).

Ορίζεται:

$$consumptionRatio(R) = \frac{energy(R)}{energy(R_{max})}$$

Όπου  $R$  είναι η πραγματική ανάθεση ακτίνων του δικτύου και  $R_{max}$  η μέγιστη.

**Υπολογισμός Κόστους Λειτουργίας Αισθητήρων:** Το ενεργειακό μοντέλο ορίζεται (4.1.4):

$$E(i) = af(S(i)) + bg(T(i)) + (1 - a - b)C$$

Τα  $a, b$  συμβολίζουν το ποσοστό συμβολής στον υπολογισμό του συνολικού ενεργειακού κόστους της ενέργειας αίσθησης, επικοινωνίας και του κόστους τοποθέτησης. Η σταθερά  $C$  συμβολίζει το κόστος τοποθέτησης ενός αισθητήρα.

Επομένως ορίζεται το totalEnergyRatio:

$$totalEnergyRatio(i) = \frac{\sum E(i)}{\sum E(i)_{max}}$$

Όπου  $E(i)$  η συνολική κατανάλωση ενέργειας (αίσθησης – επικοινωνίας - τοποθέτησης) για κάθε αισθητήρα  $i$  (4.1.4).

Ένα πρόβλημα της παραπάνω κανονικοποιημένης μετρικής είναι ότι υπάρχει η τάση με την αύξηση του αριθμού των κόμβων να αυξάνεται η τιμή της. Αυτό είναι κάτι

αναμενόμενο, καθώς με μικρότερο αριθμό αισθητήρων ο καθένας από αυτούς είναι πιο πιθανό να καλύπτει χρήσιμο χώρο μόνος του (να έχουμε μικρότερη επικάλυψη των FOV των αισθητήρων) ή να χρειάζεται να λειτουργεί σε μεγάλη ακτίνα επικοινωνίας. Επομένως οι αλγόριθμοί μας πετυχαίνουν μικρότερες βελτιώσεις.

## 6.2 Παράμετροι του συστήματος

Πριν αξιολογήσουμε τους αλγόριθμους μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης σε ένα ασύρματο δίκτυο, είναι σημαντικό να καταλήξουμε στις τιμές κάποιων παραμέτρων που εκφράζουν βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου μας. Καταρχήν πρέπει να τονιστεί ότι αναφερόμαστε σε μία περιοχή ενδιαφέροντος με διαστάσεις  $10 \times 10$ , με εμπόδια το μέσο εμβαδόν των οποίων ορίζεται όπως αναφέρθηκε (4.1.2), και με μέγιστες ακτίνες αίσθησης και επικοινωνίας ορισμένες ως 1 και 2.5 αντίστοιχα. Συγκεκριμένα ισχύει ότι  $r_t = \{k * 0.25, k = 0,1, \dots, 10\}$  και  $r_s = \{k * 0.2, k = 0,1, \dots, 5\}$ .

Στο παρακάτω πίνακάκι βλέπουμε τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του τυχαιοποιημένου κεντρικού αλγόριθμου (5.4.2), όσον αφορά το Total Energy Ratio σε μία τοπολογία με 450 αισθητήρες και 40 εμπόδια για ορισμένους συνδυασμούς των παραμέτρων  $a, b$  (6.1).

alpha	beta	Total Energy ratio
0.5	0.3	0.3105
0.3	0.5	0.2967
0.3	0.3	0.5028
0.4	0.4	0.3049

Πίνακας 6-1

Επιλέγουμε  $a = b = 0.4$ . Έτσι θα δίνουμε ίδια βαρύτητα στην ενέργεια επικοινωνίας και κατανάλωσης, ενώ παράλληλα θα είναι λιγότερο βαρύνουσα η ενέργεια τοποθέτησης των αισθητήρων. Εάν επιλέξουμε να δώσουμε παραπάνω βάρος στην ενέργεια τοποθέτησης, τότε δεν είναι ικανοποιητικά τα αποτελέσματα για δίκτυα με μεγάλους αριθμούς αισθητήρων, τα οποία είναι αυτά που μελετάμε.

Η ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία της αίσθησης με ακτίνα  $S(i)$  ορίζεται να είναι  $f(i) = (2.5 * S(i))^2$ , ενώ η ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία της επικοινωνίας με ακτίνα  $T(i)$  ορίζεται να είναι  $g(i) = (T(i))^2$ .

Επομένως έχουμε την εξής συνάρτηση υπολογισμού ενέργειας κατανάλωσης σε κάθε αισθητήρα:

$$E(i) = 0.4 * (2.5 * S(i))^2 + 0.4 * (T(i))^2 + 0.2 * 8$$

Παράδειγμα 6-1

Έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε την ενέργεια κατανάλωσης ενός αισθητήρα  $i$  στη μέγιστη ακτίνα αίσθησης του και επικοινωνίας. Έχουμε  $f(S(i)) = (2.5 * 1)^2 = 6.25$   
 $g(S(i)) = (2.5)^2 = 6.25 \rightarrow E(i) = 0.4 * 6.25 + 0.4 * 6.25 + 0.2 * 8 = 2.5 + 2.5 + 1.6 = 6.6$

Το ποσοστό κάλυψης περιφέρειας που χρειαζόμαστε στην περίπτωση του Κατανεμημένου Τοπικού Αλγορίθμου (5.5) επιλέγεται πειραματικά μέσω προσομοιώσεων ώστε να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά επίπεδα κάλυψης (> 99%). Βλέπουμε από τον Πίνακα 6-2 Coverage για διάφορες τιμές κάλυψης περιφέρειας ότι στην περίπτωση του Κατανεμημένου Τοπικού αλγορίθμου διαλέγουμε την τιμή 95.

Ποσοστό κάλυψης περιφέρειας	Κάλυψη
90%	98.8%
95%	99.33%
99%	99.43%

Πίνακας 6-2 Coverage για διάφορες τιμές κάλυψης περιφέρειας

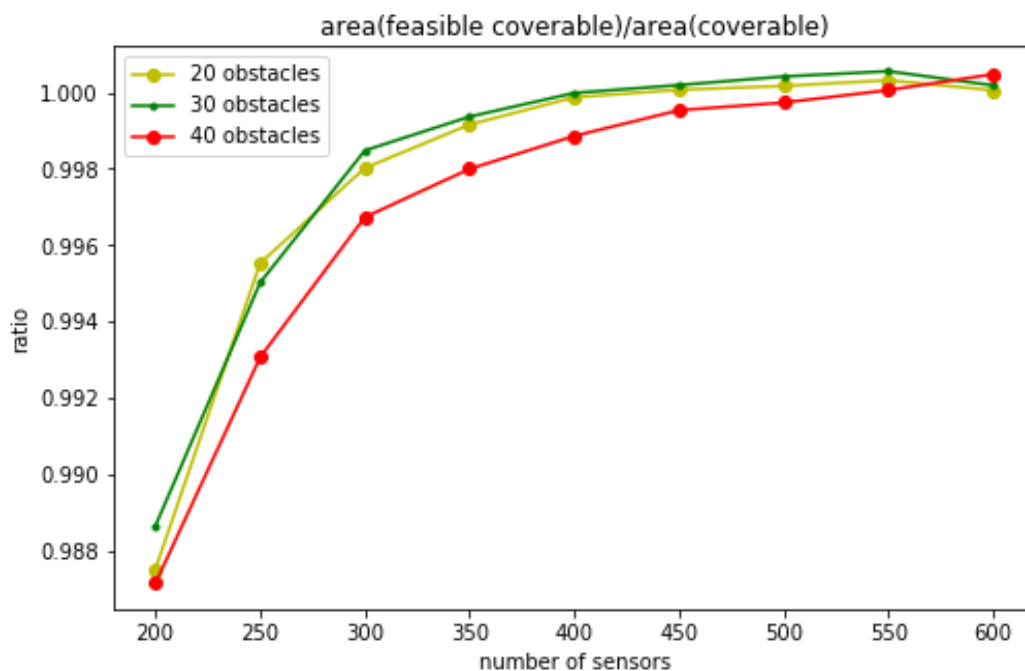
Είναι τώρα σημαντικό να επιλέξουμε τον αριθμό των αισθητήρων που θα τοποθετήσουμε στην περιοχή ενδιαφέροντος. Για να αποφασίσουμε τον επιθυμητό αριθμό πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας τους εξής περιορισμούς. Στόχος μας είναι η κάλυψη του συνόλου της περιοχής ενδιαφέροντος, κάτι το οποίο σημαίνει ότι θέλουμε να επιτύχουμε κάλυψη μεγαλύτερη του 99% της Coverable region (5.1), ενώ παράλληλα το δίκτυο πρέπει να είναι συνδεδεμένο (αισθητήρες οι οποίοι δεν θα επικοινωνούν με τη μεγαλύτερη συνεκτική συνιστώσα του δικτύου θα απενεργοποιηθούν και δεν θα θεωρούνται μέρος του). Επομένως εξετάζεται η επίδοση των αλγορίθμων μέσω προσομοιώσεων για διάφορες τιμές πλήθους εμποδίων και αισθητήρων έτσι ώστε να επιλέξουμε τις κατάλληλες τιμές για τις οποίες όλοι, ή σχεδόν όλοι οι αισθητήρες θα επικοινωνούν μεταξύ τους, και θα καλύπτουν ολόκληρη την Feasible Coverable region(5.1).

### 6.3 Μελέτη Ποσοστού Κάλυψης Περιοχής ενδιαφέροντος

Για κάθε έναν από τους παρακάτω συνδυασμούς διαφορετικών αριθμών εμποδίων και αισθητήρων παράγουμε 100 διαφορετικές τοπολογίες ώστε να μπορέσουμε να δούμε πως επηρεάζεται αντίστοιχα ο λόγος κάλυψης του Feasible coverable region προς το Coverable region (Σχήμα 6-1: Σχέση ποσοστού κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος και αριθμού αισθητήρων που τοποθετήθηκαν).

<b>Obstacles/Nodes</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>300</b>	<b>350</b>	<b>400</b>	<b>450</b>	<b>500</b>	<b>550</b>	<b>600</b>
<b>20</b>	0.988	0.996	0.998	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
<b>30</b>	0.989	0.995	0.998	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
<b>40</b>	0.987	0.993	0.997	0.998	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000

Πίνακας 6-3: Υπολογισμός του λόγου  $\frac{area(feasible\ coverable)}{area(coverable)}$  για τοπολογίες με διάφορους συνδυασμούς εμποδίων-κόμβων



Σχήμα 6-1: Σχέση ποσοστού κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος και αριθμού αισθητήρων που τοποθετήθηκαν

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6-1 για πλήθος αισθητήρων που τοποθετούνται στην περιοχή ενδιαφέροντος μεγαλύτερο του 350 έχουμε πλήρη κάλυψη της Coverable Region (περιοχή ενδιαφέροντος πλην τα εμπόδια). Ταυτίζεται δηλαδή η Coverable Region με την Feasible Coverable Region, κάτι που είναι και το ζητούμενο.

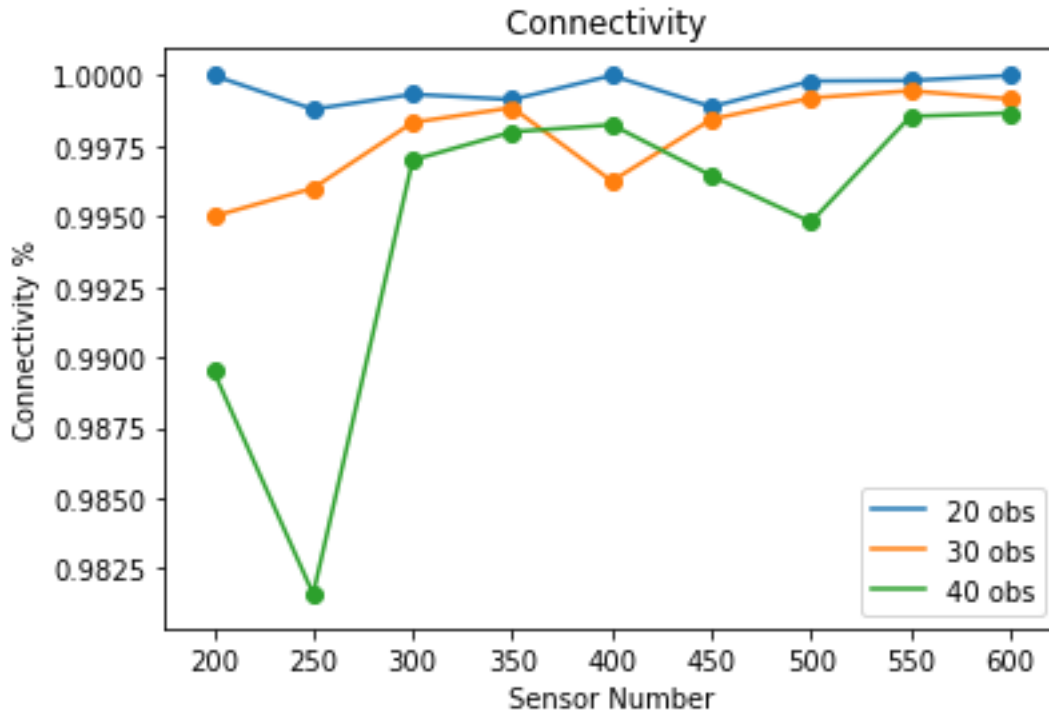
#### 6.4 Μελέτη Ποσοστού Συνδεδεμένων Αισθητήρων

Πολύ σημαντικό είναι να μελετηθεί σε διάφορες τοπολογίες και το μέγεθος της μεγαλύτερης συνεκτικής συνιστώσας (Σχήμα 6-2: Ποσοστό των αισθητήρων που τοποθετήθηκαν που ανήκουν στη μεγαλύτερη συνεκτική συνιστώσα του γράφου επικοινωνίας του δικτύου).

Obstacles/Nodes	200	250	300	350	400	450	500	550	600
<b>20</b>	1.000	0.999	0.999	0.999	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000
<b>30</b>	0.995	0.996	0.998	0.999	0.996	0.998	0.999	0.999	0.999
<b>40</b>	0.989	0.982	0.997	0.998	0.998	0.996	0.995	0.999	0.999

Πίνακας 6-4: Υπολογισμός του ποσοστού των αισθητήρων που ανήκουν στην κύρια συνεκτική συνιστώσα





Σχήμα 6-2: Ποσοστό των αισθητήρων που τοποθετήθηκαν που ανήκουν στη μεγαλύτερη συνεκτική συνιστώσα του γράφου επικοινωνίας του δικτύου

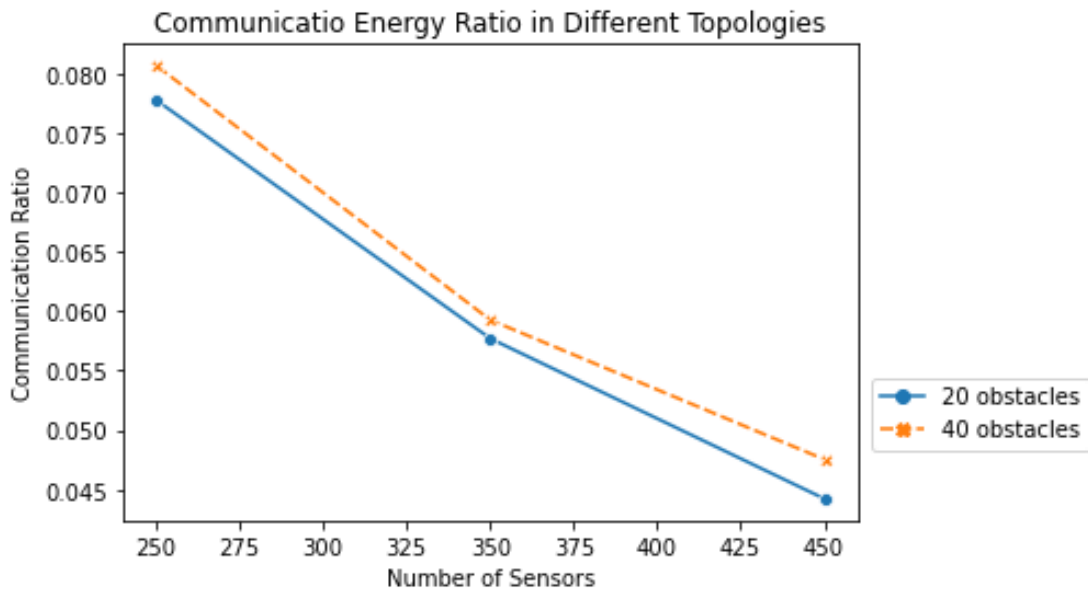
Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι η επικοινωνία ικανοποιητικού ποσοστού των αισθητήρων επηρεάζεται σημαντικά από το πλήθος των εμποδίων που τοποθετούνται στην περιοχή ενδιαφέροντος. Έτσι ενώ για 20 και 30 εμπόδια η τοποθέτηση τουλάχιστον 200 αισθητήρων είναι επαρκής, στην περίπτωση 40 εμποδίων και παραπάνω χρειαζόμαστε πάνω από 300 με 350 αισθητήρες.

### 6.5 Αποτελέσματα μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης επικοινωνίας των αισθητήρων

Για την αξιολόγηση της λύσης που προτείναμε στην ενότητα (5.2), για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης που δαπαναται για την επικοινωνία όλων των αισθητήρων του μεταξύ τους και τη διατήρηση της συνδεσιμότητάς τους, χρησιμοποιήσαμε σαν μετρική το  $consumptionRatio(R)$ , υπολογίζοντας το λόγο της ενέργειας επικοινωνίας με βάση την ανάθεση ακτίνων στους αισθητήρες μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου μας προς την ενέργεια επικοινωνίας με βάση την ανάθεση μέγιστων ακτίνων επικοινωνίας. Χρησιμοποιούνται για τις επιτρεπτές τιμές των ακτίνων επικοινωνίας και για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης για την επικοινωνία, οι τιμές που αναφέρονται στην ενότητα (6.2).

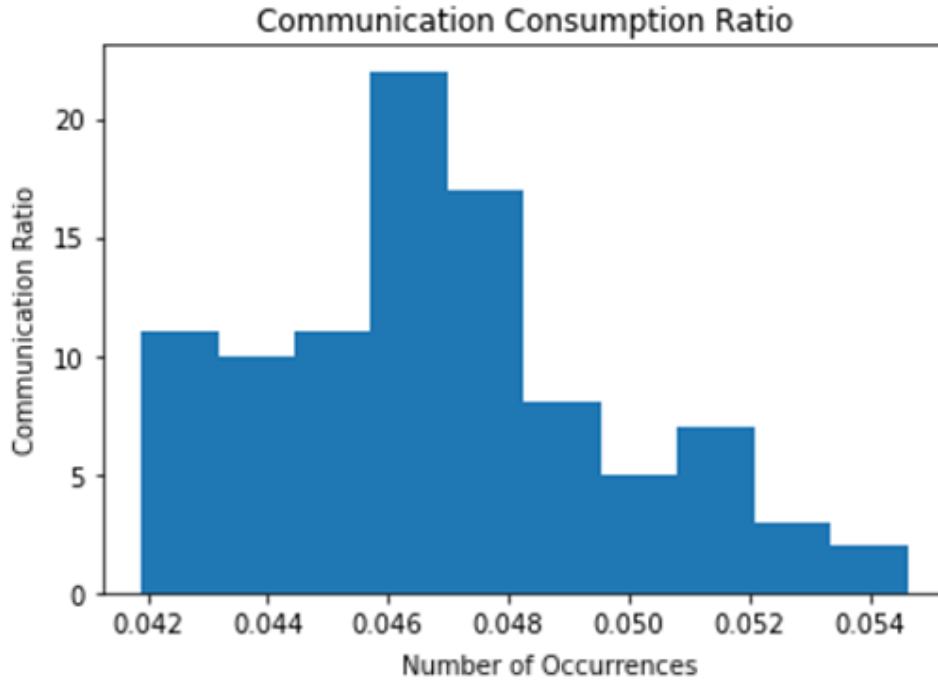
Παράξαμε 20 τοπολογίες (Σχήμα 6-3) για μερικούς συνδυασμούς του πλήθους των εμποδίων και αισθητήρων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρούνται πολύ μεγάλες βελτιώσεις στην ενεργειακή κατανάλωση των αισθητήρων, κάτι που συμβαίνει εξαιτίας του μεγάλου αριθμού τοποθέτησης των αισθητήρων, που δημιουργεί πυκνά δίκτυα. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση των εμποδίων αυξάνει ελαφρώς την ενεργειακή κατανάλωση, ανεξάρτητα από τον αριθμό των αισθητήρων της τοπολογίας, κάτι αναμενόμενο καθώς τα εμπόδια εμποδίζουν την επικοινωνία ορισμένων αισθητήρων μεταξύ τους. Ακόμη παρατηρείται σημαντική βελτίωση στο

*consumptionRatio* καθώς αυξάνεται ο αριθμός των αισθητήρων, που είναι επίσης αναμενόμενο, καθώς υπάρχουν πολλά clusters αισθητήρων, στα οποία μικρές τιμές της ακτίνας επικοινωνίας είναι αρκετές για την επίτευξη της συνδεσιμότητας.



Σχήμα 6-3: *Communication Ratio* για διάφορους αριθμούς αισθητήρων και εμποδίων

Για να μελετήσουμε την κατανομή του communication energy consumption ratio σε 100 τοπολογίες του αλγορίθμου μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης, παράξαμε 100 τοπολογίες με 40 εμπόδια και 450 αισθητήρες. Βλέπουμε στο Σχήμα 6-4: Ιστόγραμμα αποτελεσμάτων μετά την προσομοίωση 100 τοπολογιών με στόχο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης επικοινωνίας ότι η διασπορά των τιμών του *consumptionRatio* δεν είναι μεγάλη. Μάλιστα η κατανομή των τιμών του προσεγγίζει την κανονική κατανομή, κάτι που είναι αναμενόμενο, λόγω του κεντρικού οριακού θεωρήματος, το οποίο έχει εφαρμογή δεδομένης της ύπαρξης πολλών τυχαίων μεταβλητών που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

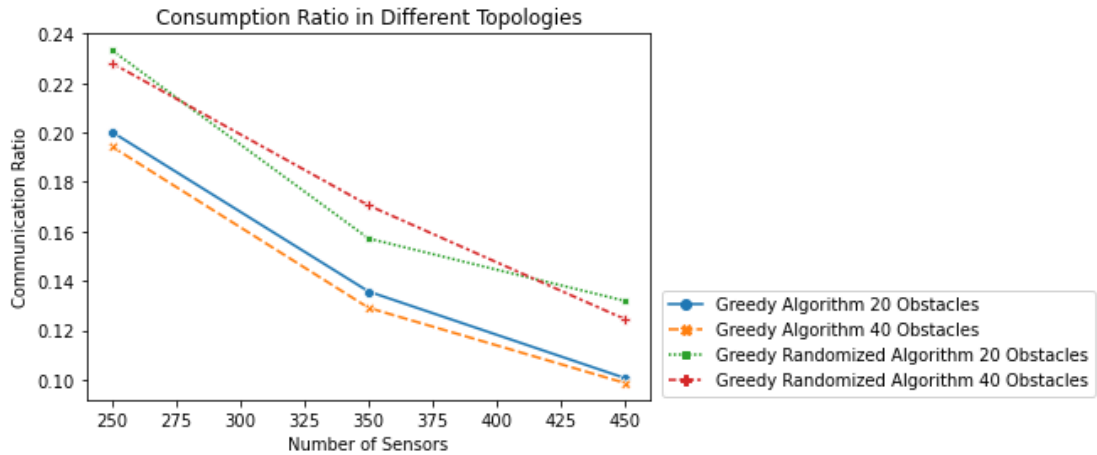


Σχήμα 6-4: Ιστόγραμμα αποτελεσμάτων μετά την προσομοίωση 100 τοπολογιών με στόχο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης επικοινωνίας

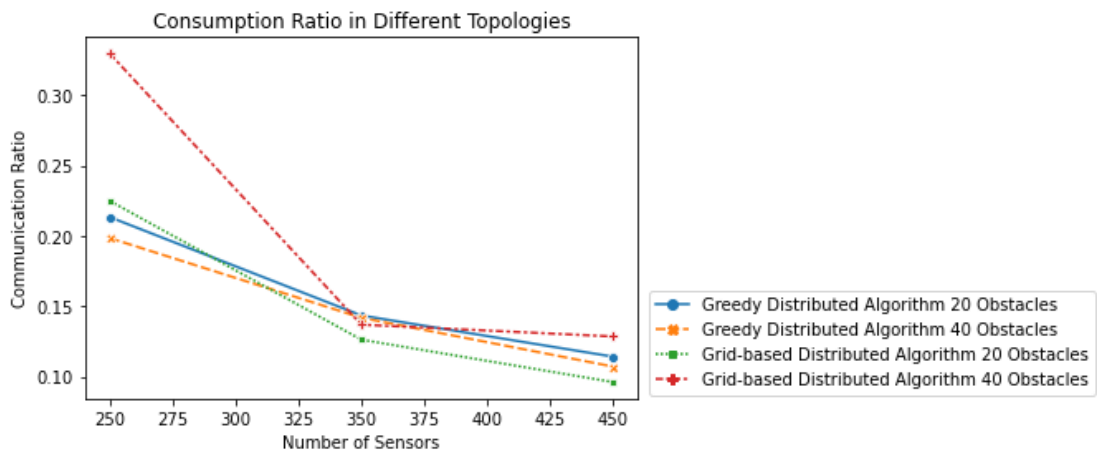
## 6.6 Αξιολόγηση Αλγορίθμων Μείωσης Ενεργειακής Κατανάλωσης Αίσθησης

Οι δύο κεντροποιημένοι αλγόριθμοι – Άπληστος κεντρικός (5.4.1) και Τυχαιοποιημένος κεντρικός (5.4.2) – και οι δύο κατανεμημένοι αλγόριθμοι – Κατανεμημένος τοπικός (5.5) και grid based (5.6) αξιολογούνται μέσω ορισμένων προσομοιώσεων. Οι αλγόριθμοι τερματίζουν όταν η κάλυψη ξεπεράσει το 99% της Feasible coverable region. Για διάφορες τιμές αισθητήρων και εμποδίων παρουσιάζουμε τις μεταβολές σε  $ConsumptionRatio(r_s(i))$  – τον λόγο ενεργειακής κατανάλωσης της ενέργειας αίσθησης (6.1), *redundant sensors* – το ποσοστό των αισθητήρων με μηδενική ακτίνα αίσθησης και  $totalEnergyRatio(i)$  – τον συνολικό λόγο ενεργειακής κατανάλωσης (6.1).

### 6.6.1 Λόγος Κατανάλωσης Ενέργειας Αίσθησης



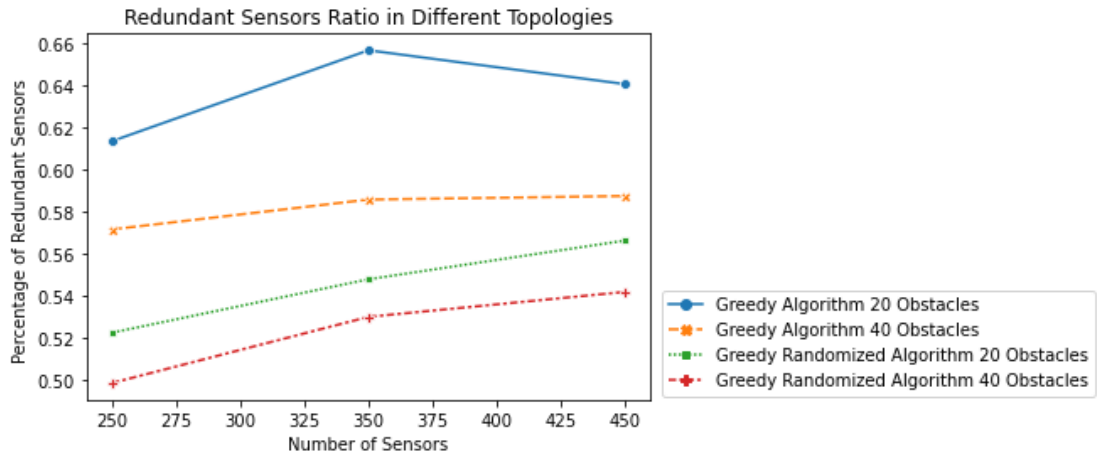
Σχήμα 6-5 Αξιολόγηση Κεντρικοποιημένων Αλγορίθμων – Consumption Ratios



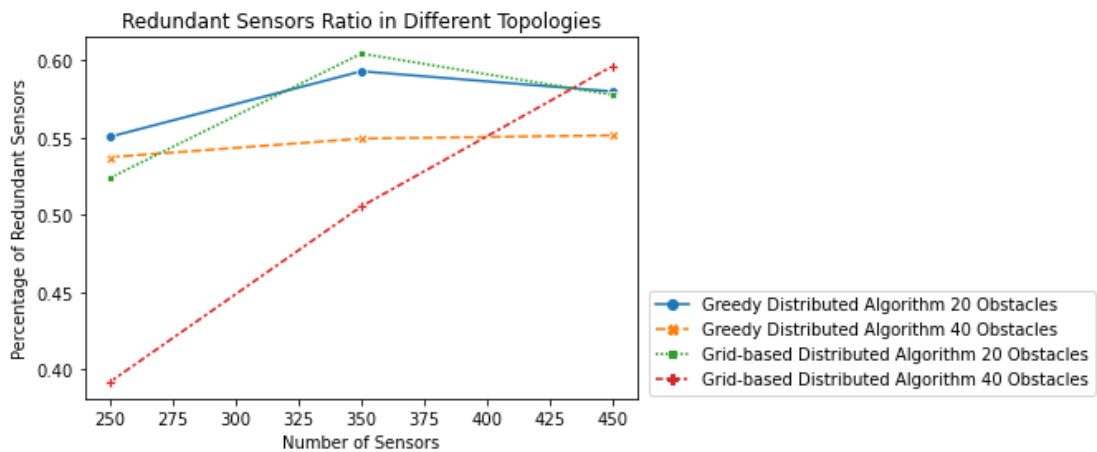
Σχήμα 6-6 Αξιολόγηση Κατανεμημένων Αλγορίθμων – Consumption Ratios

Στο Σχήμα 6-5 Αξιολόγηση Κεντρικοποιημένων Αλγορίθμων – Consumption Ratios παρατηρούμε τις τιμές του  $ConsumptionRatio(r_s(i))$ , μετά την εκτέλεση κεντρικοποιημένων αλγορίθμων και στο Σχήμα 6-6 Αξιολόγηση Κατανεμημένων Αλγορίθμων – Consumption Ratios μετά την εκτέλεση κατανεμημένων αλγορίθμων, για τοπολογίες με διάφορα πλήθη εμποδίων και αισθητήρων. Παρατηρούμε ότι η αύξηση του αριθμού των εμποδίων προκαλεί μείωση του ratio, κάτι αναμενόμενο καθώς συνεπάγεται μείωση της περιοχής που καλείται να καλύψει το δίκτυο (Coverable region). Επίσης ο αριθμός των αισθητήρων παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς μεγαλύτερος αριθμός αισθητήρων συνεπάγεται μείωση του λόγου κατανάλωσης. Τις καλύτερες επιδόσεις σημειώνει ο Άπληστος Κεντρικοποιημένος Αλγόριθμος. Για μεγάλους αριθμούς αισθητήρων ωστόσο (450), παρατηρούμε ότι οι τιμές των κατανεμημένων αλγορίθμων δεν διαφέρουν σημαντικά. Ο τυχαιοποιημένος κεντρικοποιημένος αλγόριθμος είναι ελαφρώς χειρότερος, ένα αναμενόμενο trade-off με τον μικρότερο χρόνο εκτέλεσής του.

## 6.6.2 Ποσοστό Απενεργοποιημένων Αισθητήρων



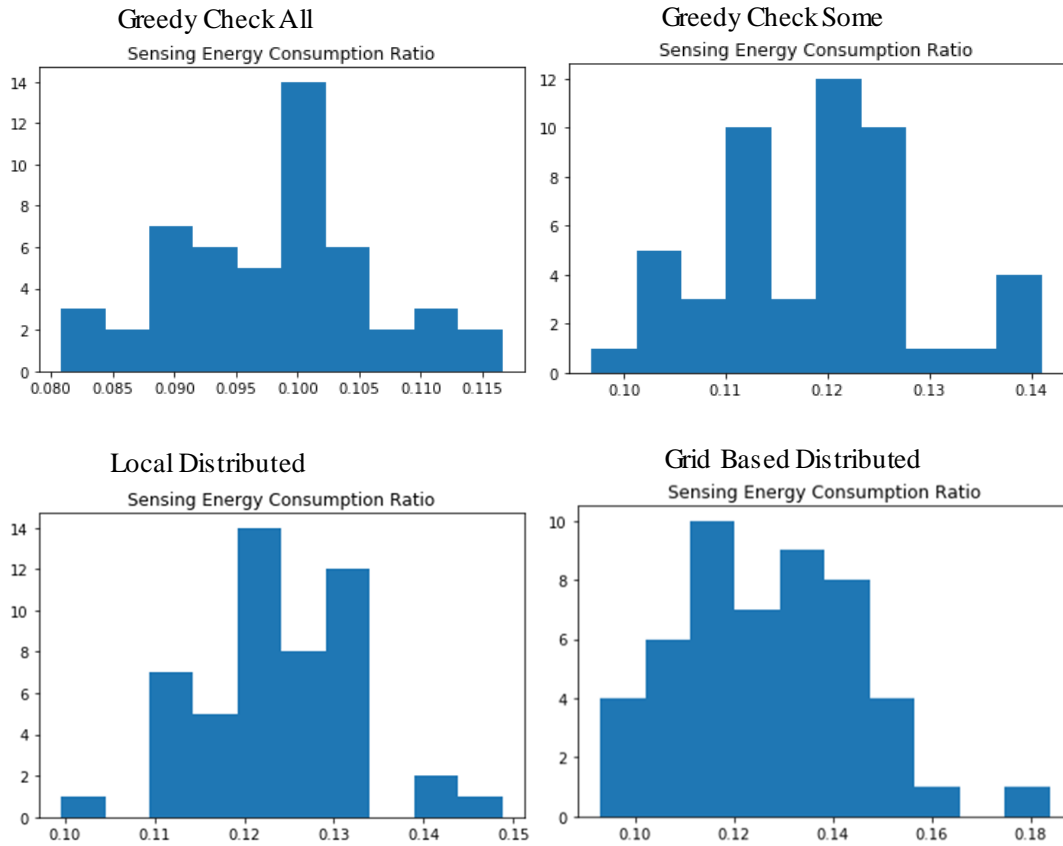
Σχήμα 6-7 Αξιολόγηση Κεντρικοποιημένων Αλγορίθμων – Redundant Sensors



Σχήμα 6-8 Αξιολόγηση Κατανεμημένων Αλγορίθμων – Redundant Sensors

Στο Σχήμα 6-7 Αξιολόγηση Κεντρικοποιημένων Αλγορίθμων – Redundant Sensors βλέπουμε τις τιμές των αδρανών αισθητήρων (μηδενική ακτίνα αίσθησης), μετά την εκτέλεση κεντρικοποιημένων αλγορίθμων και στο Σχήμα 6-8 μετά την εκτέλεση κατανεμημένων αλγορίθμων, για τοπολογίες με διάφορα πλήθη εμποδίων και αισθητήρων. Βλέπουμε ότι η αύξηση του αριθμού των εμποδίων προκαλεί αύξηση των περιττών αισθητήρων, κάτι αναμενόμενο καθώς τα εμπόδια παρεμβάλλονται πιο δύσκολα στην περιοχή που καλύπτουν οι αισθητήρες, κι έτσι είναι πιο πιθανό ένας αισθητήρας να καλύπτει μεγαλύτερα κομμάτια της περιοχής ενδιαφέροντος, καθιστώντας τους γείτονές του περιττούς. Επίσης ο αριθμός των αισθητήρων παίζει ρόλο, καθώς μεγαλύτερος αριθμός αισθητήρων συνεπάγεται στις περισσότερες περιπτώσεις και αύξηση των περιττών αισθητήρων. Γενικά τα ποσοστά των περιττών αισθητήρων είναι αρκετά υψηλά, κάτι που οφείλεται στον μεγάλο αριθμό αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυά μας.

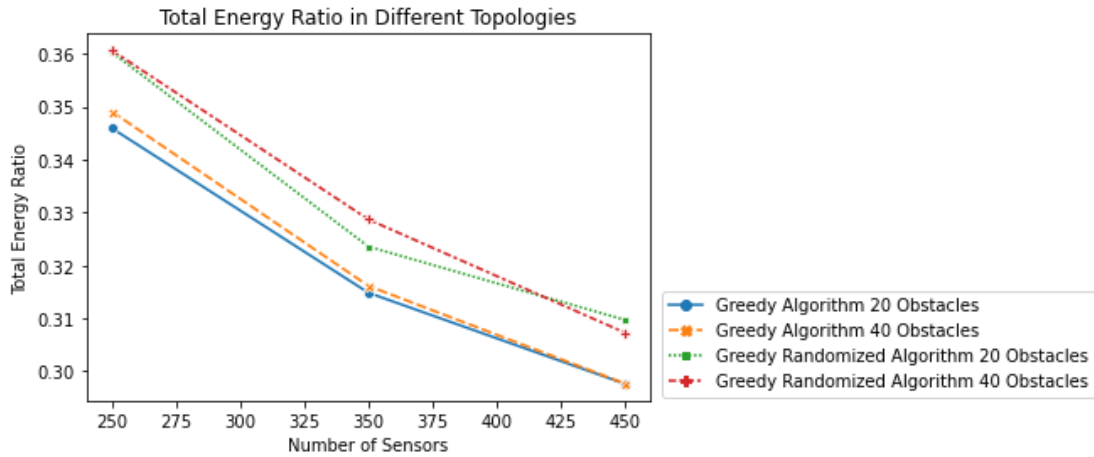
### 6.6.3 Διασπορά Λόγου Κατανάλωσης Ενέργειας Αίσθησης



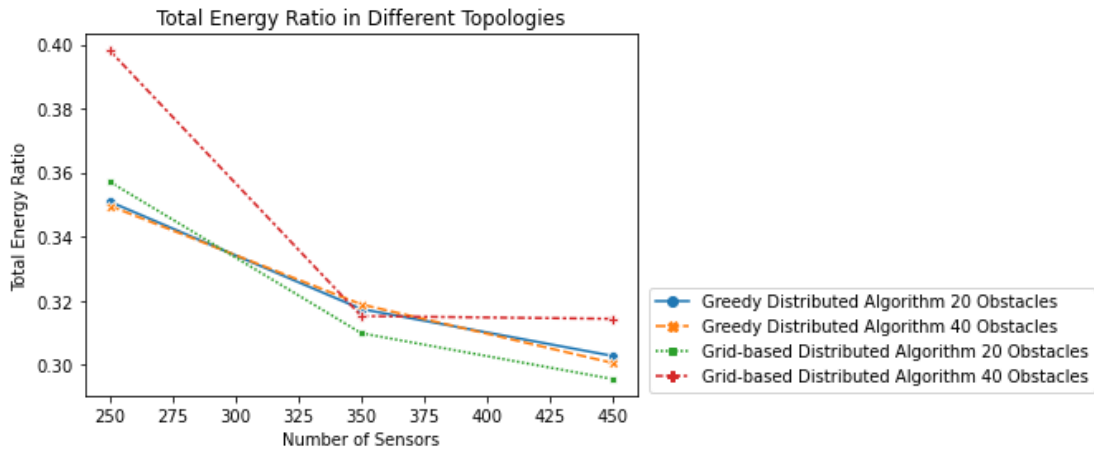
Σχήμα 6-9: Ιστογράμματα κατανομής των τιμών του consumption ratio, μετά την εκτέλεση των αλγορίθμων μείωσης της ακτίνας αίσθησης.

Για την αξιολόγηση της διασποράς των αποτελεσμάτων για τη μετρική consumption ratio των αλγορίθμων προσομοιώσαμε για καθέναν από αυτούς 50 τοπολογίες 450 αισθητήρων και 40 εμποδίων με τις δυνατές τιμές των ακτίνων αίσθησης να είναι  $r_s = \{k * 0.2, k = 0, 1, \dots, 5\}$ . Η κατανομή των τιμών και στους τέσσερις αλγορίθμους, όπως και στην περίπτωση μείωσης της ενέργειας επικοινωνίας, προσεγγίζει την κανονική κατανομή, κάτι που είναι αναμενόμενο, λόγω του κεντρικού οριακού θεωρήματος, το οποίο έχει εφαρμογή δεδομένης της ύπαρξης πολλών τυχαίων μεταβλητών που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

### 6.6.4 Λόγος Κατανάλωσης Συνολικής Ενέργειας



Σχήμα 6-10 Αξιολόγηση Κεντρικοποιημένων Αλγορίθμων – Total Energy Ratio



Σχήμα 6-11 Αξιολόγηση Κατανεμημένων Αλγορίθμων – Total Energy Ratio

Στα σχήματα Σχήμα 6-10 Αξιολόγηση Κεντρικοποιημένων Αλγορίθμων – Total Energy Ratio, Σχήμα 6-11 Αξιολόγηση Κατανεμημένων Αλγορίθμων – Total Energy Ratio βλέπουμε τις τιμές του λόγου συνολικής ενέργειας μετά την εκτέλεση, του αλγορίθμου μείωσης της ενέργειας επικοινωνίας σε συνδυασμό με τους δύο κεντρικοποιημένους και κατανεμημένους αλγορίθμους. Οι τιμές είναι αρκετά πιο ψηλές από τις επιμέρους περιπτώσεις των λόγων επικοινωνίας και αίσθησης. Ο λόγος αύξησης είναι ότι πλέον λαμβάνεται υπόψιν και το κόστος τοποθέτησης των αισθητήρων, που είναι ένα σημαντικό μέρος του συνολικού ενεργειακού κόστους, και είναι σταθερό. Όσον αφορά την επίδραση των εμποδίων και των αισθητήρων, οι τάσεις είναι παρόμοιες με την περίπτωση του λόγου ενέργειας αίσθησης. Με την αύξηση του αριθμού των αισθητήρων έχουμε μείωση του συνολικού ratio. Όσον αφορά τον αριθμό των εμποδίων, ως προς τους αλγόριθμους μείωσης της ενέργειας αίσθησης αύξηση συνεπάγεται μείωση του ratio. Αντίθετα, ως προς τον αλγόριθμο μείωσης της ενέργειας της επικοινωνίας αύξηση του αριθμού των εμποδίων συνεπάγεται αύξηση του ratio. Επομένως δεν έχουμε ξεκάθαρα συμπεράσματα, μιας και οι τιμές και 40 και 20 εμπόδια είναι πολύ κοντά.

### 6.6.5 Συγκρίσεις

Για τοπολογίες με 450 αισθητήρες και 40 εμπόδια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε 50 τοπολογίες, για όλους τους αισθητήρες. Παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-5 Παρουσίαση διαφόρων μετρικών για 50 προσομοιώσεις μίας τοπολογίας με 450 αισθητήρες και 40 εμπόδια, μερικά συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους διάφορους αλγόριθμους.

	Greedy chek all	Greedy chek some	Greedy Distributed	Grid distributed
Redundant Sensors	0.5942	0.5615	0.6150	0.5966
Consumption Ratio	0.1001	0.1212	0.1221	0.1285
Total ratio	0.2982	0.3049	0.3066	0.3143

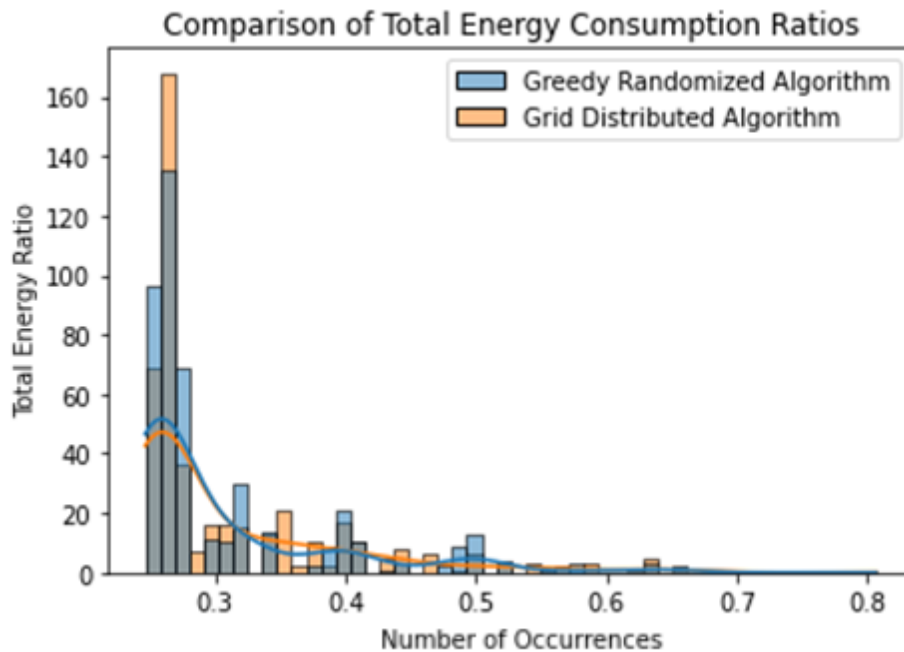
Πίνακας 6-5 Παρουσίαση διαφόρων μετρικών για 50 προσομοιώσεις μίας τοπολογίας με 450 αισθητήρες και 40 εμπόδια

Τις καλύτερες επιδόσεις, όσον αφορά τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης πετυχαίνει ο Άπληστος Κεντρικοποιημένος Αλγόριθμος. Ωστόσο η εκτέλεσή του είναι αρκετά πιο αργή σε σχέση με τον Τυχαιοποιημένο Κεντρικό αλγόριθμο που είναι ο πιο γρήγορος. Οι Κατανεμημένοι Αλγόριθμοι πετυχαίνουν ελαφρώς χειρότερες επιδόσεις, κάτι αναμενόμενο, καθώς οι αποφάσεις λαμβάνονται με τη χρήση πληροφορίας τοπικά, σε μία γειτονιά. Στο κομμάτι των περιττών αισθητήρων (ακτίνα αίσθησης ίση με μηδέν) βλέπουμε ότι οι κατανεμημένοι αλγόριθμοι πετυχαίνουν ελαφρώς καλύτερα ποσοστά.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει να δούμε την κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης σε κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, ως ποσοστό προς τη μέγιστη κατανάλωσή του. Έτσι μπορούμε να παρατηρήσουμε τη διασπορά των τιμών κατανάλωσης ενέργειας στους διάφορους αισθητήρες, καθώς για την αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου είναι σημαντική όχι μόνο η μείωση της μέσης ενεργειακής κατανάλωσης αλλά και η αποφυγή ύπαρξης κόμβων μεγάλης ενεργειακής κατανάλωσης, των οποίων η μπαταρία θα καταναλωθεί σύντομα, με αποτέλεσμα όχι μόνο τη μείωση της κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος, αλλά και με κίνδυνο να υπονομευθεί η συνδεσιμότητα του δικτύου.

Στο Σχήμα 6-12 Σύγκριση κατανομής ενεργειακής κατανάλωσης ανάμεσα στον Τυχαιοποιημένο Κεντρικοποιημένο Αλγόριθμο και τον Κατανεμημένο Αλγόριθμο βασισμένο σε πλέγμα βλέπουμε μία σύγκριση της κατανομής της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης ανάμεσα στον Τυχαιοποιημένο Κεντρικοποιημένο Αλγόριθμο και τον Κατανεμημένο Αλγόριθμο βασισμένο σε πλέγμα. Παρατηρούμε ότι και στους δύο αλγόριθμους τα αποτελέσματα είναι παρόμοια και αρκετά ενθαρρυντικά, με το μεγαλύτερο ποσοστό των αισθητήρων να έχει χαμηλά ratio ενεργειακής κατανάλωσης. Υπάρχουν όμως ορισμένες περιπτώσεις που η ενεργειακή κατανάλωση φτάνει σε αρκετά μεγάλα επίπεδα, πραγμα το οποίο μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου.





Σχήμα 6-12 Σύγκριση κατανομής ενεργειακής κατανάλωσης ανάμεσα στον Τυχαιοποιημένο Κεντρικοποιημένο Αλγόριθμο και τον Κατανεμημένο Αλγόριθμο βασισμένο σε πλέγμα

Στην περίπτωση του Κατανεμημένου Αλγορίθμου και καθώς δεν αποφασίζουμε ντετερμινιστικά το ποσοστό κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος (επιλέγουμε το ποσοστό κάλυψης της περιφέρειας κάθε αισθητήρα) ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ τελικού ποσοστού κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος και *consumptionRatio*. Τις τιμές βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα για 20 εκτελέσεις του αλγορίθμου σε μία τοπολογία 450 αισθητήρων και 40 εμποδίων. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 6-13 οι δύο τιμές αυτές παρουσιάζουν μία συσχέτιση, την οποία μπορούμε να μελετήσουμε χρησιμοποιώντας τις μετρικές Pearson Correlation Coefficient και Spearman Correlation Coefficient. Η μετρική Pearson Correlation Coefficient είναι ένα μέτρο γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο συνόλων δεδομένων  $X$ ,  $Y$ , τα οποία παρουσιάζουν κανονική κατανομή. Λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[-1,1]$ , με το 0 να υποδηλώνει απουσία γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων, και τις τιμές -1, 1 γραμμική συσχέτιση. Ορίζεται ως το πηλίκο της συνδιακύμανσης των δύο τυχαίων μεταβλητών, προς το γινόμενο των τυπικών τους αποκλίσεων και συμβολίζεται  $\rho_{X,Y}$ .

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X * \sigma_Y}$$

Η μετρική Spearman Correlation Coefficient είναι ένα μέτρο της μονοτονικής σχέσης μεταξύ δύο συνόλων δεδομένων. Παίρνει τιμές από -1 έως 1, με το 0 να υποδηλώνει απουσίας συσχέτισης μεταξύ των δύο συνόλων και τα -1, 1 να υποδηλώνουν αυστηρή μονοτονική συσχέτιση. Ορίζεται ως το Pearson Correlation Coefficient των μεταβλητών κατάταξης των δύο συνόλων  $r_{X,Y}$ .

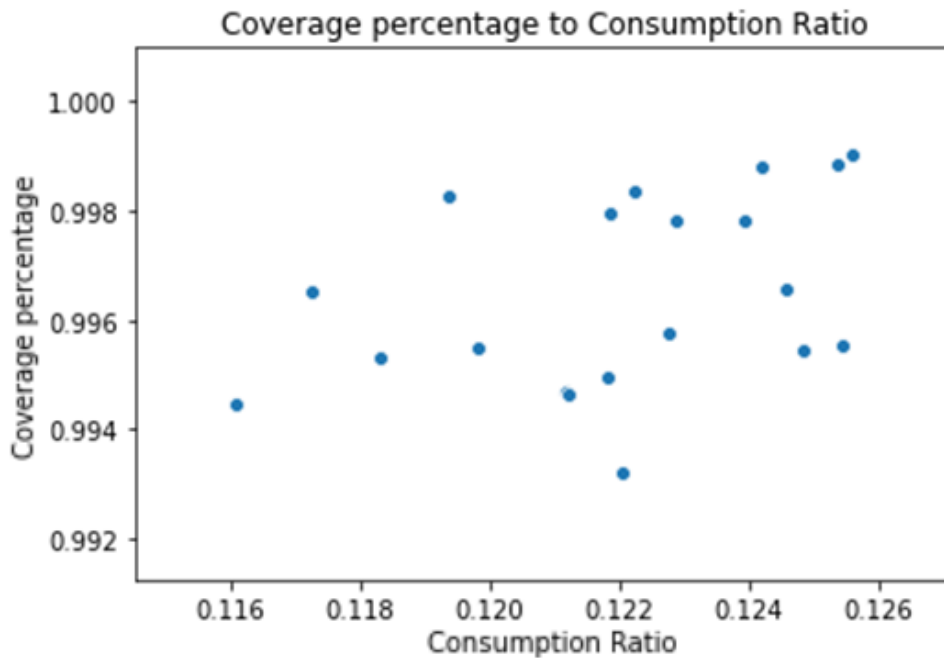
$$r_{X,Y} = \rho_{R(X),R(Y)} = \frac{\text{cov}(R(X), R(Y))}{\sigma_{R(X)} * \sigma_{R(Y)}}$$

Για τις παρακάτω τιμές κάλυψης και λόγου κατανάλωσης ενέργειας έχουμε τις τιμές:

*Spearman Correlation* = 0.684848

*Pearson Correlation* = 0.490084

Βλέπουμε ότι η μετρική συσχέτισης Spearman έχει υψηλότερη τιμή από τη μετρική συσχέτισης Pearson, κάτι που συμβαίνει διότι, οι τιμές κάλυψης και λόγου κατανάλωσης στις προσομοιώσεις δεν είναι κανονικές κατανομές, παρόλο που παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες. Έτσι η μετρική Spearman είναι η πλέον κατάλληλη για την ανάδειξη της συσχέτισης ανάμεσα στο ποσοστό κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος και του ενεργειακού λόγου κατανάλωσης.



Σχήμα 6-13 Σχέση του ποσοστού κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος και του consumptionRatio της ενέργειας αίσθησης (σε 50 εκτελέσεις του κατανεμημένου τοπικού αλγορίθμου)

## Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα – Επίλογος

### 7.1 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα κάλυψης μίας μη κυρτής περιοχής του Ευκλείδειου επιπέδου από αισθητήρες μεταβλητών ακτίνων αίσθησης και επικοινωνίας, οι οποίοι σχηματίζουν ένα ασύρματο συνδεδεμένο δίκτυο. Το δίκτυο αυτό καλύπτει το σύνολο του πεδίου ορατότητας των αισθητήρων, με ταυτόχρονη παρουσία εμποδίων σε αυτόν. Το πρόβλημα μελετήθηκε με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της συνολικής ενέργειας στο δίκτυο (επικοινωνίας, αίσθησης), κάτι που συνεπάγεται την αύξηση της διάρκειας ζωής του. Αυτό επιτεύχθηκε με τη μείωση των αντιστοιχων ακτίνων αίσθησης και επικοινωνίας των αισθητήρων. Αξιοποιήσαμε έναν αλγόριθμο μείωσης της ενέργειας επικοινωνίας (5.2), τον οποίον συνδυάσαμε στη συνέχεια με τρεις αλγορίθμους που αναφέρονται στο [25]. Ο ένας από αυτούς είναι ένας άπληστος κεντροκοποιημένος αλγόριθμος, με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και μεγάλη πολυπλοκότητα εκτέλεσης. Χρησιμοποιείται επίσης ένας τυχαιοποιημένος κεντρικός αλγόριθμος με ελαφρώς χειρότερη επίδοση, αλλά πολύ μικρότερη πολυπλοκότητα. Εξετάζεται ακόμη ένας κατανεμημένος αλγόριθμος, ο οποίος, μιας και λαμβάνει αποφάσεις σε επίπεδο γειτονιάς αισθητήρων, μπορεί να κλιμακωθεί πιο ικανοποιητικά από τους άλλους δύο. Ο κατανεμημένος αυτός αλγόριθμος βασίζεται για τον τερματισμό του στο ποσοστό κάλυψης της περιφέρειας κάθε κόμβου, το οποίο πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από ένα σταθερό όριο (5.5.2). Αν και ο υπολογισμός αυτού του ποσοστού γίνεται τοπικά, βελτιώνοντας το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου, δεν εγγυάται την επίτευξη ενός συγκεκριμένου ποσοστού κάλυψης, με αποτέλεσμα να παρατηρείται, σημαντική διακύμανση στα τελικά ποσοστά κάλυψης. Προτείνεται ένας ακόμα κατανεμημένος αλγόριθμος, ο οποίος, για να ορίσει τη γειτονιά ενός αισθητήρα, διαμερίζει την περιοχή ενδιαφέροντος μέσω ενός τετραγωνικού πλέγματος. Σαν κριτήριο τερματισμού αυτού του αλγορίθμου επιλέγεται το ποσοστό κάλυψης των γειτονικών, ως προς έναν κόμβο, τετραγωνικών περιοχών του πλέγματος (5.6.2). Διασφαλίζεται έτσι η επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος χωρίς τις διακυμάνσεις της προηγούμενης κατανεμημένης μεθόδου. Εκτελούνται προσομοιώσεις για τους αλγορίθμους αυτούς, για τοπολογίες με διάφορα πλήθη εμποδίων και αισθητήρων και συγκρίνονται οι επιδόσεις τους. Παρατηρείται ακόμη η διασπορά των τελικών ενεργειών των αισθητήρων μετά την εκτέλεση των διάφορων αλγορίθμων.

Πρέπει να τονιστεί ότι όλοι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούμε δεν διαθέτουν κάποιο λόγο προσέγγισης της βέλτιστης λύσης – είναι ευριστικοί, επομένως είναι πιθανό σε κάποιες προβληματικές περιπτώσεις να μην αντιμετωπίσουν ικανοποιητικά το πρόβλημα – να μην πετύχουν ικανοποιητική μείωση της ενέργειας. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ύπαρξης εμποδίων, τα οποία δυσχεραίνουν τον υπολογισμό κάποιου φράγματος στην επίλυση του προβλήματος.

## 7.2 Δυνατές Επεκτάσεις

Η παρούσα εργασία θα μπορούσε μελλοντικά να επεκταθεί προς τις εξής κατευθύνσεις

**Τρισδιάστατη Επέκταση:** Μία προφανής επέκταση είναι η ανάλυση που γίνεται στην παρούσα να επεκταθεί στην περίπτωση του τρισδιάστατου χώρου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να γίνουν σημαντικές αλλαγές στη μοντελοποίηση του προβλήματος. Αντί για δίσκους στο επίπεδο, θα έχουμε σφαίρες. Αυτή η αλλαγή θα αυξήσει κατακόρυφα την πολυπλοκότητα. Οι γράφοι επικοινωνίας και εξάρτησης θα γίνουν πολύ πιο σύνθετοι, και όλοι οι αναφερόμενοι αλγόριθμοι θα παρουσιάσουν κατακόρυφη αύξηση στο χρόνο εκτέλεσής τους.

**Βελτίωση μείωσης της ενέργειας επικοινωνίας:** Αντί να υπολογίζεται το ελάχιστο συνδυαστικό δένδρο για όλους τους κόμβους του δικτύου (συμπεριλαμβανομένων αυτών με μηδενική ακτίνα αίσθησης), να χρησιμοποιούνται από τους περιττούς κόμβους, μόνο όσοι είναι απαραίτητοι για να διατηρηθούν συνδεδεμένοι όσοι κόμβοι έχουν μη μηδενική ακτίνα αίσθησης.

**Ανάπτυξη διαφορετικών προσεγγίσεων:** Όπως αναφέρθηκε, λόγω της φύσης του προβλήματος είναι αρκετά δύσκολο να δοθεί ένα αυστηρό φράγμα προσέγγισης της βέλτιστης λύσης, με τη χρήση των άπληστων προσεγγιστικών αλγορίθμων που χρησιμοποιούμε στο παρόν. Μία διαφορετική προσέγγιση παρουσιάζεται, για κυρτό χώρο ενδιαφέροντος, στο [ [32]]. Χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος ενισχυτικής μάθησης (Multi Agent Nash Q-learning). Θα μπορούσε να επεκταθεί ο αλγόριθμος αυτός στην περίπτωση της μη-κυρτής περιοχής της εργασίας μας.

**Προβληματικές Περιπτώσεις:** Οι αλγόριθμοι της εργασίας μας παρουσιάζουν ορισμένες προβληματικές περιπτώσεις. Το πιο σύνηθες φαινόμενο είναι η αρχική αύξηση της ακτίνας κάποιου αισθητήρα, ο οποίος όμως σύντομα καταλήγει να μην έχει υψηλό λόγο ενέργειας – περιοχής που καλύπτει. Λύση σε αυτό το ζήτημα θα μπορούσε να είναι η δημιουργία νέων προσεγγίσεων και κριτηρίων για τη μείωση της ακτίνας κάποιων τέτοιων κόμβων, σε κάθε επανάληψη των αλγορίθμων.

## Βιβλιογραφία

- [1] A. Boukerche, B. Turgut, N. Aydın, M. Z. Ahmad, L. Bölöni και D. Turgut, «Routing protocols in ad hoc networks: A survey,» *Computer Networks*, τόμ. 55, αρ. 13, pp. 3032-3080, 2011.
- [2] A. Boukerche, Algorithms and Protocols for Wireless, Mobile ad hoc Networks,, John Wiley & Sons, 2009.
- [3] J. Hill, «System architecture for wireless sensor networks, Ph.D. thesis,» UNIVERSITY OF CALIFORNIA, Berkeley, 2003.
- [4] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam και E. Cayirci, «Wireless sensor networks: a survey,» *Computer Networks*, τόμ. 4, αρ. 38, pp. 393-422, 2002.
- [5] M. Barthélemy, «Spatial Networks,» *Physics Reports*, τόμ. 499, αρ. 1-3, pp. 1-101, 2011.
- [6] C. H. Comin και L. d. F. Costa, «Spatial Networks: When Topology Meets Geometry,» 2018.
- [7] M. Roughan, J. Tuke και E. Parsonage, Estimating the Parameters of the Waxman Random Graph, Springer International Publishing, 2019.
- [8] P. Madhumangal, «Intersection Graphs: An Introduction,» *Annals of Pure and Applied Mathematics*, τόμ. 4, αρ. 1, pp. 43-91, 2013.
- [9] A. Baddeley, Spatial Point Processes and their Applications, Nedlands WA 6009, Australia: School of Mathematics & Statistics, University of Western Australia, 2007.
- [10] S. Boyd και L. Vandenberghe, Convex Optimization, New York: Cambridge University Press, 2004.
- [11] M. Hartikainen, K. Miettinen και M. M. Wiecek, «Constructing a Pareto Front Approximation for Decision,» Department of Mathematical Information Technology, University of Jyväskylä, Finland.
- [12] I. Santín, C. Pedret και R. Vilanova, Control and Decision Strategies in Wastewater Treatment Plants for Operation Improvement, Switzerland: Springer Cham, 2017.
- [13] C. Zhu, C. Zheng, L. Shu και G. Han, «A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks,» *Journal of Network and Computer Applications*, τόμ. 35, pp. 619-632, 2012.
- [14] T. Abhishek, P. G. Hari, D. Tanima, M. Rahul, S. KK και J. Satyabrat, «Coverage and connectivity in wsns: A survey, research issues and challenges,» *IEEE Access*, τόμ. 6, pp. 26971-26992, 2018.
- [15] B. Azzedine και S. Peng, «Connectivity and coverage based protocols for wireless sensor networks,» *Ad Hoc Networks*, αρ. 80, pp. 54-69, 2018.
- [16] F. Nack, «An Overview on Wireless Sensor Networks,» *Journal of Computer Research and Development*, τόμ. 42, 2005.
- [17] K. Deepa, L. Ching-Yung και L. Chun-Shien, «Visual Sensor Networks,» *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, τόμ. 2007, p. 3, 2007.
- [18] P. SANTI, Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, τόμ. 37, John Wiley & Sons,, 2005, pp. 165-194.

- [19] S. Raghunathan V, «Energy-aware wireless micro-»,  
*IEEE Signal Processing Magazine*, τόμ. ||, αρ. 19, pp. 40-50, 2002.
- [20] J.-F. Chamberland και V. Veeravalli, «Decentralized detection in sensor networks», *IEEE Transactions on Signal Processing*, τόμ. ||, αρ. 51, pp. 407-416, 2003.
- [21] D. Tian και N. D. Georganas, «Location and calculation-free node-scheduling schemes in large wireless sensor networks», *Ad Hoc Networks*, τόμ. 2, αρ. 1, pp. 65-85, 2004.
- [22] Z. Liao, J. Wang, S. Zhang, J. Cao και G. Min, «Minimizing movement for target coverage and network connectivity in mobile sensor networks», *IEEE Trans. Parallel Distributed Systems*, τόμ. 26, αρ. 7, pp. 1971-1983, 2015.
- [23] J. Jiang, Z. Song, H. Zhang και W. Dou, «Voronoi-Based Improved Algorithm for Connected Coverage Problem in Wireless Sensor Networks», School of Computer National University of Defense Technology, Changsha, China, 2005.
- [24] S. Chellappan, X. Bai, B. Ma, D. Xuan και C. Xu, *IEEE Trans. Parallel Distributed Systems*, τόμ. 18, αρ. 2, pp. 199-211, 2007.
- [25] C. Tsanikidis, M. Vitoropoulou, V. Karyotis και S. Papavassiliou, «On the Energy-Efficient Coverage of Network Regions with Convex Opaque Obstacles», *IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 135-142, 2018.
- [26] Y. Xin, Z. Zhang και Y. Liu, «A Coverage Holes Detecting Algorithm in Wireless Sensor Networks», *Journal of Convergence Information Technology*, τόμ. 6, pp. 159-168, 2011.
- [27] C. Buchta, «Zufallspolygone in konvexen Vielecken», *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, τόμ. 1984, αρ. 347, pp. 212-220, 1984.
- [28] Z. Zhou, S. R. Das και H. Gupta, «Variable radii connected sensor cover in sensor networks», *ACM Transaction on Sensor Networks*, τόμ. 5, αρ. 8, 2009.
- [29] M. Vitoropoulou, «Socio-aware Content Allocation in Complex Networks via Efficient Monitoring of Information Dissemination», 2021.
- [30] H. Chi-Fu και T. Yu-Chee, «The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network», Springer Science + Business Media, Department of Computer Science and Information Engineering, National Chiao-Tung University, 1001 Ta Hsueh Road, Hsin-Chu, 30050, Taiwan, 2005.
- [31] H. Farman, H. Javed, J. Ahmad, B. Jan και M. Zeeshan, «Grid-Based Hybrid Network Deployment Approach for Energy Efficient Wireless Sensor Networks», *Journal of Sensors*, τόμ. 2016, p. 14, 2016.
- [32] C. S. Sharma Anamika, «A distributed reinforcement learning based sensor node scheduling algorithm for coverage and connectivity maintenance in wireless sensor network», *Wireless Networks*, τόμ. 26, αρ. 6, pp. 441-4429, 2020.